

TECNOLOGIA MECCANICA

Riassunti Corso Prof. Gaetano Palazzo / Prof. Carlone



Riorganizzato da: Di Palma Felice
06/09/2013

INDICE 1

ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO: 1-24

- Generalità utensili 1-3
- Criteri di usura 4
- Moti 5
- Relazione Taylor 6-7
- Tornitura 8-10
- Fresatura 11-15
- Foratura 16-18
- Lavorazioni Taglio Rettilineo
- (limat. , Broccia , Rulli) 18-20
- Ottimizzazione 20-24

CONTROLLO NUMERICO : 24-29

- Generalità 24-26
- Codifica 27-29

SALDATEURE : 30-46

- Saldatura a gas 31-32
- Saldature ad arco 33-37
- Saldatura laser 38-39
- Saldature per res e press. 40-41
- Saldature eterogenee 42-43
- Zona term. alterata 44-46

DEFORMAZIONE PLASTICA : 47-56

- Generalità 47-49
- Fucinatura e stampagg. 50-51
- Laminazione 52-55
- Trafilatura 55-56
- Estrusione 56

FORMULARIO : 57-59

INDICE 2 (pag. 57)

SALDATURE : 58-62

UTENSILI : 63-77

TORNITURA: 78-79

FORATURA: 80-82

FRESATURA: 83-86

MOTO RETTIL.: 87-90

DEFORMAZIONE PLASTICA: 91-107

- GENERALITÀ : 91-94
- ESTRUSIONE: 95-96
- FUCINATURA: 97-100
- TRAFILATURA: 101-103
- LAMINAZIONE: 104-107

FORMULARIO : 108-110

INDICE 3 (pag. 111)

ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO: 112-152

- Generalità utensili 112-113
- Criteri di usura 115
- Relazione Taylor 124-127
- Tornitura 114-130
- Fresatura 131-139
- Foratura 140-147
- Lavorazioni Taglio Rettilineo
(limat. , Broccia , Rulli) 148-152
- Ottimizzazione 172-181

CONTROLLO NUMERICO : 153-194

- Ciclo lavoraz. 153-155
- Tolleranze 156-160
- Rugosità 161-165
- Macchin. e utens. 166-171
- Generalità contr. num. 182-189
- Part Program 190-194

SALDATURE : 195-204

Asportazione di truciolo - Utensili

L'asportazione di truciolo è una lavorazione tecnologica che viene eseguita su un semilavorato per:

- 1) Ridurre la rugosità superficiale
- 2) Ottenere una geometria finale del pezzo le cui dimensioni sono funzionali a quelle di progetto

Il movimento della macchina utensile durante la lavorazione è detto **moto di lavoro**

Lavorazioni:	TORNITURA		LIMATURA	
	FRESATURA	moto di taglio	PIALLATURA	moto di taglio
	FORATURA	rotatorio	STOZZATURA	rettilineo
	RETIFICA		BROCCATURA	

Gli utensili che vengono utilizzati per queste macchine sono **monotaglienti** o **pluritaglienti**, a seconda se essi contengono uno o più (per.) taglienti. Gli utensili **monotaglienti** vengono adoperati per tornitura, limatura, piallatura o stozzatura, gli utensili **pluritaglienti** vengono adoperati per fresatura, foratura, rettifica e broccatura.

Le caratteristiche per valutare gli utensili sono:

- **DUREZZA A FREDDO**: è la durezza a temperatura ambiente viene misurata con la prova Rockwell
- **DUREZZA A CALDO**: è la durezza del materiale durante l'asportazione di truciolo, in quanto nella lavorazione la temperatura aumenta, aumenta la durezza dei materiali e diminuisce la loro durezza
- **TENACITÀ**: è un parametro collegato allo snervamento e all'incrudimento, in quanto durante lo snervamento alcuni piani cristallini si rompono e altri piani vanno a sovrapporre questa falla, deformandosi. In questo modo il materiale resiste meglio agli sforzi esterni in quanto i piani cristallini si compattano maggiormente.
- **AUTOLUBRIFICABILITÀ**: è la capacità di ridurre l'attrito tra il materiale stesso sottoposto ad asportazione di truciolo e utensile senza l'utilizzo di oli.

Per costruire gli utensili si utilizzano diversi materiali in funzione delle loro caratteristiche e del costo. Prima si utilizzavano gli **acciai ipereutectoidici** (con percentuale di carbonio minore del 0,8%). Un pro può mantenere basse velocità di taglio [$V < 200$ metri al minuto] perché all'aumentare di essa aumenta la temperatura e si riduce molto durezza e tenacità → bassa produttività. Per ovviare a questi problemi si è soliti aggiungere elementi alliganti quali Tungsteno, Cobalto, Nichel, Cromo, Molibdeno o grafite. Generalmente Molibdeno (o grafite) si trova in natura come MoS_2 si dissolve di Molibdeno; è un lubrificante solido (olio per motore diesel) e permette di lubrificare a se stesso riducendo l'attrito e abbassando la temperatura. Il Cromo, Cobalto e il Tungsteno aumentano la tenacità dell'utensile e ne riducono le dimensioni del grano, infatti Cr, Ni e C producono carburi (molto duri) mentre il Tungsteno (W) riduce di molto la velocità critica di tempra (in questo modo l'utensile non perde la martensite durante la lavorazione avendo sempre proprietà di tempra e non di ricottura durante i raffreddamenti spontanei).

Acciai bainitici: contengono il 5% di elementi alliganti e raggiungono velocità di taglio anche di 400 metri al minuto. Costituiscono i materiali HSS (non più usati).

Acciai AISI leganti contengono fino al 18% di elementi alliganti e raggiungono velocità di taglio anche di 600 metri al minuto. Costituiscono gli **acciai HSS** (High Speed Steel).

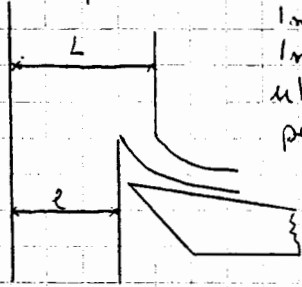
Materiali ceramici sono simili ai diamanti artificiali e vengono utilizzati per lavorare metalli duri come il Titanio. Sfruttano generalmente gli ossidi metallici o i carburi. Il carburo di Tungsteno raggiunge anche velocità di 2000 metri al minuto e temperature elevatissime (che potrebbero comprometterne le proprietà o alterarle).

Generalmente gli acciai (normali o HSS) sono forati da una barretta dello stesso materiale, i materiali ceramici sono costituiti da un supporto (generalmente di acciaio) su cui viene montato l'inserto vero e proprio di materiale ceramico sagomato opportunamente. Di conseguenza questi materiali ceramici non resistono a flessione né a taglio ma resistono a sopportare gli sforzi di compressione.

Per sagomare questi inserti (molto duri) si utilizza la tecnologia delle polveri tranne un processo definito sinterizzazione, che permette di pressare e cuocere in determinate forme le polveri compatte del solido che si vuole ottenere con un elemento legante (come il cobalto) che, fondendo prima delle polveri lo lega (quasi come se le saldasse).

Taglio ortogonale

Si ottiene attraverso il moto relativo tra un utensile che affonda nel pezzo da tagliare e il pezzo stesso che ne esce ridotto di dimensioni e produce scorie sotto forma di truciolo. In realtà non è proprio un taglio bensì uno strappo del materiale.



Infatti il distacco del truciolo non avviene nel contatto tra utensile e pezzo ma leggermente più avanti rispetto all'utensile perché si supera la resistenza a compressione del materiale da tagliare, cioè si supera la forza unitaria di taglio a causa della forte compressione del materiale da parte dell'utensile. È così il truciolo si "strappa" e il materiale da una larghezza originale L passa ad una larghezza pari ad l , dove $L-l$ è la profondità a cui l'utensile affonda nel pezzo.

La superficie del pezzo dopo la lavorazione avrà una rugosità diversa da quella del pezzo prima della lavorazione e la qualità della superficie lavorata (cioè poca rugosità) dipende dalla geometria dell'utensile scelto.

Generalmente in tornitura si utilizza un utensile monotagliante, invece gli utensili pluri-taglienti sono preferiti per altre lavorazioni, come la fresatura. La velocità di taglio è la velocità con cui si muove la lancia rispetto all'utensile e si esprime in $[m/min]$, tutta v. l'utensile potrebbe anche non traslare ma ruotare mentre la lancia trasla (si genera un moto elicoidale), in questo caso si individua una velocità tangenziale del pezzo in rotazione.

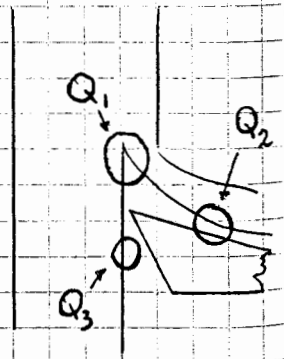
$$v_t = \frac{\pi D n}{1000} = \left[\frac{m}{min} \right] \quad \text{dove } D \text{ è il diametro in mm e } n \text{ è il numero di giri del pezzo.}$$

Si possono individuare tre zone di deformazione, ad esse vengono associate determinate quantità di calore generate da altre temperature di taglio, dovute al passaggio di energia meccanica in energia termica in prossimità del taglio, cioè del punto di rottura.

• Zona primaria di deformazione: qui viene generata una quantità di calore Q_1 che fa aumentare la temperatura del pezzo in quanto parte dell'energia fornita si trasforma in calore. Il calore Q_1 viene allontanato con il truciolo che si strappa, per cui la temperatura del pezzo in lavorazione è minore di quella dell'utensile.

• Zona secondaria di deformazione: si trova nell'interfaccia tra utensile e truciolo, qui si ha generazione di calore Q_2 per l'attrito tra il truciolo che scorre sull'utensile e l'utensile stesso.

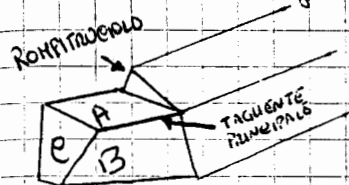
• Zona terziaria di deformazione: si trova sotto il tagliante dell'utensile. Si genera calore Q_3 per via dell'attrito tra la parte già lavorata del pezzo e la parte sottostante dell'utensile a causa del ritorno elastico delle superficie già lavorate del pezzo.



Si nota che $Q_1 \gg Q_2 \gg Q_3$ e che parte di Q_1 passa per conduzione all'utensile, tutto Q_2 passa nell'utensile stesso, mentre Q_3 viene ripartito tra utensile e pezzo. Tutti questi contributi di calore fanno aumentare la temperatura dell'utensile (dovuta ad attrito e conduzione).

Temperatura di taglio: temperatura dell'utensile ottenuta tramite il passaggio di calore generato nelle tre zone di deformazione.

È la velocità di taglio che ovviamente influenza la temperatura di taglio.



L'utensile ha una forma simile a quella schematizzata. Esso è formato dallo stelo (geometria di una barretta) che permette il passaggio dell'utensile sulla macchina, e da una testa sagomata che contiene le superfici attive di taglio.

(A) → PETTO

(B) → FACCIA DI SPOGLIA PRINCIPALE

(C) → FACCIA DI SPOGLIA SECONDARIA

L'intersezione tra (A) e (B) genera il Tagliente principale che penetra nel materiale e genera truciolo, mentre l'intersezione tra (A) e (C) genera un possibile Tagliente secondario. La presenza o meno di taglienti secondari permette la distinzione tra utensili pluritaglienti oppure utensili monotaglienti. Il petto dell'utensile è quello su cui scivola il truciolo, dietro di esso vi è un gradino, il ROMPTRUCIOLO che deforma improvvisamente il truciolo e lo sfaccia, esso è utile per la sicurezza dell'operatore e delle macchine (evita l'arruotamento del truciolo sull'utensile) e abbassa la temperatura di taglio abbattendo il calore. Si possono avere vari tipi di truciolo:

- Continuo: ha sezione costante e non si rompe mai, cioè non si sfaccia e non allontana il calore.
- Fluttuante: ha una sezione che varia per deformazione ma anch'esso non si sfaccia e quindi non allontana il calore, tuttavia è meno pericoloso del continuo.
- Segmentato: costituito da tanti elementi collegati tra loro da un sottile limbo, c'è maggiore allontanamento di calore per convenzione perché aumenta la superficie di scambio tra aria e truciolo.
- Discontinuo: formato da tanti elementi che si allontanano rapidamente causando un abbassamento forte della temperatura di taglio (non c'è conduzione).

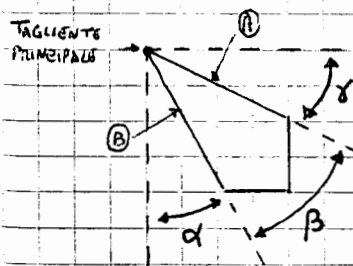
Per questo è preferito il truciolo discontinuo o segmentato; inoltre per ridurre la temperatura di taglio, ovvero per ridurre l'attrito, si ricorre anche a fluidi lubrificanti, emulsioni d'olio e acqua iniettati direttamente sulla lavorazione.

Nell'utensile con apporto l'unica parte sagomata è dove va l'inserto. Esso viene avvitato sullo stelo che avrà in negativo la geometria dell'inserto. Gli inserti possono avere forma triangolare (3 taglienti), romboidale (2 taglienti) o quadrata (4 taglienti).



Angoli caratteristici e criteri di usura

Considero una sezione della testa con un piano ortogonale alla testa stessa.



α ≡ angolo di spoglia inferiore

β ≡ angolo di taglio

γ ≡ angolo di spoglia superiore

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

Generalmente $2^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ - 14^\circ$ e $-4^\circ \leq \gamma \leq 10^\circ$ cioè si evince dai criteri di usura.

Durante la lavorazione si cerca di lavorare il più velocemente possibile senza interferenze alla finitura superficiale e solo alla fine si considera la finitura superficiale a scapito della velocità.

PASSATA: passaggio dell'utensile sul pezzo che permette di eliminare una parte (o tutto) il volume da rimuovere dal pezzo in esame.

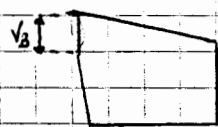
La lavorazione si divide in due fasi

- 1) **SGROSSATURA** comprende una o più passate dell'utensile sul pezzo si punta ad avere la massima produttività a scapito della finitura superficiale
- 2) **FINITURA** comprende l'ultima passata, porta il pezzo alle dimensioni finali e permette di avere qualità superficiali ottimali

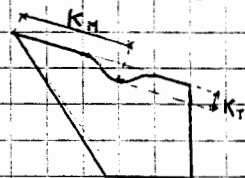
Sembra logico che nella sgrossatura l'utensile è sollecitato di più e si usura di più rispetto alla fase di finitura. È quindi importante conoscere la durata dell'utensile che se HSS può essere riaffilato, se inserto sostituito, tramite le relazioni di Taylor che sfruttano i criteri di usura.

Criteri: • Labbro di usura • Cratere di usura

Il criterio del labbro di usura interessa il tagliente principale e la faccia di spoglio principale. Durante la lavorazione il tagliente principale tende ad arrotondarsi generando un labbro d'usura. L'utensile può lavorare fino a quando $VB \leq 1 \text{ mm}$



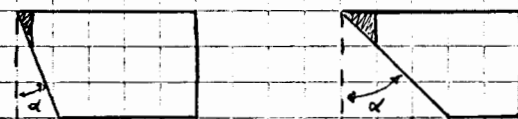
Il criterio del cratere di usura tiene conto dell'usura che avviene sul petto dell'utensile a causa dello scorrimento del truciolo sul petto stesso. I parametri del cratere sono la profondità del cratere K_T e la distanza tra il centro del foro e il tagliente principale K_M .



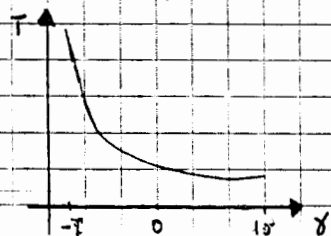
L'utensile risulta usurato (quindi da cambiare) se $K_T/K_M > 0,4$

Questo criterio è più severo in quanto tiene conto del labbro di usura, infatti se il tagliente principale arrotonda il valore K_M diminuisce.

Per quanto riguarda l'angolo α , esso deve essere più piccolo di 14° perché aumentando a partire da 8° gli utensili tendono ad essere più a punta e quindi hanno una sezione resistente più piccola (e si possono lavorare solo materiali con basse resistenze al taglio. Tuttavia occorre fare α il più grande possibile perché a punta di 8° si nota che dura, per il criterio del labbro di usura, molto di più l'utensile con α maggiore. Inoltre α non può essere più piccolo di 2° per via del ritorno elastico del materiale e per via del moto elicoidale tipico del taglio obliquo. Esso infatti genera una superficie con un angolo d'elica obliquo per cui $\alpha \geq 2^\circ$ (di cui 1° per l'elica e 1° per l'obliquità).

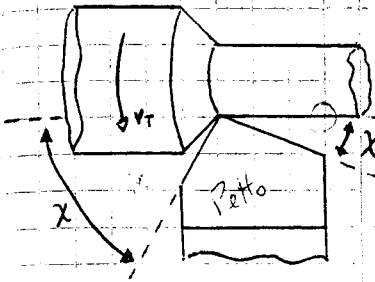


Di conseguenza $2^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ$; per materiali difficili da lavorare si sceglie α piccolo, mentre per materiali facili da lavorare si sceglie α grande. A partire da α se α aumenta la sezione resistente si riduce e l'utensile più sottile conelli minori, tuttavia all'aumentare di α il cratere di usura tende ad avvicinarsi al truciolo, si riduce la temperatura di taglio (meno attrito), aumenta K_M e l'utensile dura di più. Lo svantaggio è che l'utensile è sollecitato maggiormente da forze di taglio e flessione (no compressione). Sopportano bene flessione e taglio materiali come l'acciaio, e ceramici invece resistono bene a compressione, di conseguenza $\alpha > 0 \rightarrow$ forze di taglio e flessione \rightarrow acciaio HSS temperature limitate $0^\circ < \alpha < 10^\circ$
 $\alpha < 0 \rightarrow$ forze di compressione \rightarrow inserto alle temperature $-7^\circ < \alpha < 0^\circ$



Al diminuire di α la temperatura di taglio aumenta di molto e per questo è conveniente usare materiali ceramici se $-7^\circ < \alpha < 0^\circ$ in quanto resistono meglio a compressione e riescono a sopportare temperature molto più elevate degli acciai HSS.

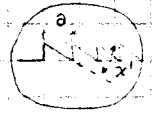
Considerando l'operazione di formatura si introducono gli angoli di registrazione χ e χ' essi sono importanti in fase di rifinitura del pezzo in lavorazione.



χ è formato dall'asse del pezzo e dal tagliante principale

χ' è formato dall'asse del pezzo e dal tagliante secondario

Mentre χ genera la geometria finale del pezzo, l'angolo χ' definisce la qualità superficiale del pezzo finito, in quanto il moto elicoidale fa in modo da lasciare un'elica sulla superficie lavorata. χ' ha valori molto piccoli, anche inferiori al grado, perché la qualità del pezzo finito è correlata al tagliante secondario, e l'altezza del solco è praticamente proprio l'angolo χ' . Se riduco χ' infatti vado a ridurre il solco lasciato dall'utensile, tuttavia non posso rendere χ' zero perché in questo caso il tagliante secondario sfiorerebbe sul pezzo (lavorazione peggiore). Questo angolo è quindi impostato grande in fase di sgrossatura e viene reso molto piccolo in fase di finitura.



Moti di lavoro

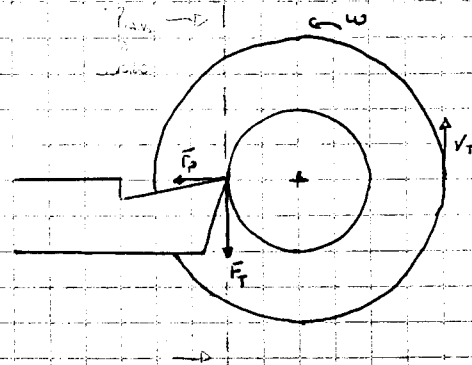
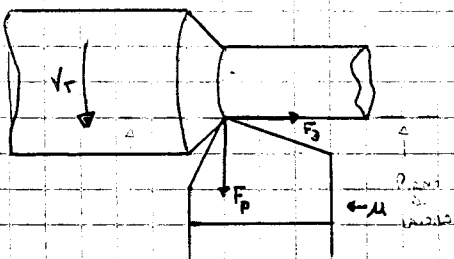
Per ottenere l'asportazione di truciolo abbiamo bisogno di 3 moti di lavoro:

1) **MOTO DI TAGLIO:** può essere prodotto o dal pezzo in rotazione o dall'utensile. I moti possono essere due: o rotatorio del pezzo in lavorazione o rettilineo prodotto dall'utensile monotagliante. Si calcola una velocità di taglio $v_t = \frac{\pi D n}{1000}$ che si calcola in $\frac{m}{min}$, dove il fattore 1000 è dovuto al fatto che il diametro D del pezzo in rotazione si esprime in millimetri e n è il numero di giri compiuti dal pezzo in un minuto.

2) **MOTO DI AVANZAMENTO:** definito è l'avanzamento, cioè lo spostamento che compie il pezzo o l'utensile per ogni giro (dell'utensile o del pezzo). a si esprime in millimetri a giro e indica di quanto si sposta l'utensile (o il pezzo) ogni giro. Si definisce la velocità di avanzamento $u = a \cdot n$ [mm/min] e ci dice di quanti millimetri si ha spostamento relativo ogni minuto.

3) **MOTO DI APPOSTAMENTO** definito è la profondità di passata, il moto di spostamento è caratteristico dell'avvicinamento dell'utensile al pezzo ortogonalmente all'asse del pezzo. La profondità di passata indica quanto affonda l'utensile nel pezzo.

Relazioni di Taylor



Durante la lavorazione l'utensile risente di alcune forze:

- **FORZA DI TAGLIO** si oppone all'asportazione di truciolo, ovvero alla rimozione del truciolo dal metallo base ed è dovuta alla velocità di taglio v_t
- **FORZA F_f** si oppone all'avanzamento dell'utensile
- **FORZA F_p** si oppone alla penetrazione dell'utensile nel materiale

Queste forze si oppongono alla lavorazione (non si possono conoscere a priori) e per vincerle abbiamo bisogno di una potenza detta al massimo. Il massimo è l'organo che in lavorazione serve il pezzo per l'utensile; la Potenza al massimo è la potenza che serve a vincere le forze che ostacolano la lavorazione.

Si definisce un Piano di lavoro per capire l'influenza di queste forze: esso è il piano parallelo all'asse di rotazione del pezzo, perpendicolare all'asse dell'utensile e passante per la punta dello stesso. Su di esso le proiezioni di F_d e F_r sono proprio F_d e F_r mentre $F_p = 0$ perché perpendicolare al piano di lavoro.

La Relazione di Taylor permette di esprimere la durata dell'utensile T in funzione dei parametri di taglio della lavorazione.

Relazione di Taylor
$$V_T \cdot T^m \cdot a^n \cdot p^r = V_1$$

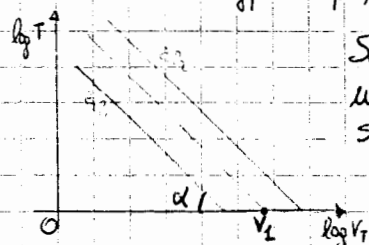
dove V_T = velocità di taglio T = durata utensile m = coefficiente di durata a = avanzamento
 n = coefficiente di avanzamento p = profondità di passata r = coefficiente di profondità
 V_1 = velocità specifica di taglio

m, n, r dipendono dal materiale dell'utensile e dal pezzo in lavorazione
 V_1 è la velocità specifica di taglio, cioè quella per cui l'utensile dura 1 minuto
 T , la durata si calcola in minuti.

Supponiamo in prima approssimazione che T non dipenda né da a né da p $V_T \cdot T^m = V_1$

Facendo delle prove con 5 velocità diverse ognuna delle quali provata 3 volte per assegnare materiali, Taylor definì determinate conclusioni.

Scriviamo la legge semplificata in termini logaritmici: $\log V_T + m \log T = \log V_1$



Scegliendo V_T diverse si hanno rette parallele tra loro. E' d'uso scegliere una retta media al fine di ridurre errori dovuti a verifiche sperimentali e, definito l'angolo α si nota che:

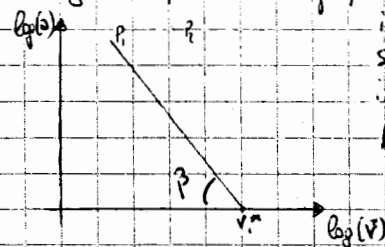
$$m = -\frac{1}{\log \alpha}$$

V_1 è l'intersezione tra la retta media e l'asse $\log V_T$ perché esse è la velocità che fa durare l'utensile 1 minuto $\log T = \log 1 = 0$

Ritornando ora alla legge completa ho: $V_T \cdot T^m \cdot a^n \cdot p^r = V_1^*$

dove V_1^* è la velocità che fa durare l'utensile 1 minuto se $a^n \cdot p^r = 1$

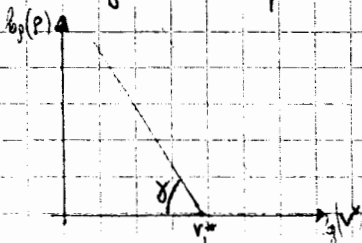
Disegno quindi il grafico per capire come varia a al variare di V fissando p



in modo che si abbia sempre $a^n \cdot p^r = 1$
 si individua quindi un angolo β che permette di calcolare il valore in molte pressioni e sulla retta si trova il punto proprio dove $a^n \cdot p^r = 1$ per cui quel punto ha ascissa pari al valore V_1^*

$$m = -\frac{1}{\log \beta}$$

Analogamente posso costruire un diagramma per capire come varia p al variare di V fissando a

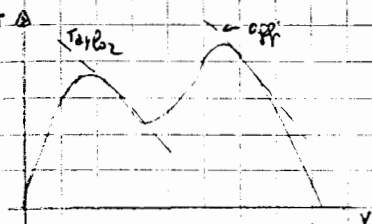


Si individua un angolo γ per cui $r = -\frac{1}{\log \gamma}$

E analogamente si può trovare il valore V_1^*

Di solito però si impone la durata dell'utensile per poi risalire ai parametri di lavorazione (v_r, a, p). Tuttavia in lavorazione non si pensa solo alla durata dell'utensile ma, tramite queste relazioni, si cerca di individuare una velocità più economica di lavorazione v_e e la velocità di massima produttività v_p .

Taylor, per queste relazioni, si basò su velocità di taglio relativamente basse sfruttando materiali simili all'HSS. Ai giorni nostri i materiali sono cambiati e le velocità possibili sono molto più alte. Facendo delle prove con materiali esamici si è notato che le relazioni di Taylor in buona approssimazione sono valide anche per i materiali esamici che usiamo ai giorni nostri in quanto l'andamento delle curve è molto simile.



Non è detto che fissati i parametri ricavati teoricamente la macchina riesca a sopportare la lavorazione, per questo devo calcolare la POTENZA AL MANUBRIO.

$$P_m = F_r \cdot v_r + F_a \cdot u + F_p \cdot v_p$$

Dalla mia scomposizione sul piano di lavoro noto che $F_p = 0$. Inoltre siccome l'utensile viene messo a una determinata profondità di passata prima di lavorare il pezzo, cioè prima di iniziare l'avanzamento $v_p = 0$. Per cui: $P_m = F_r \cdot v_r + F_a \cdot u$.

Siccome F_r non è noto a priori, per una sua stima si ricorre a una Pessione di taglio K_T fornita da una relazione che tiene conto di una pressione specifica di taglio K_S definita come la forza necessaria ad asportare un truciolo di sezione pari a 1 mm².

Definito β l'angolo di taglio dell'utensile, $R_m \equiv$ carico a trazione dell'acciaio, RELAZIONI DI KROENENBERG
HB \equiv durezza Brinnell della ghisa

$$\begin{aligned} \text{ACCIAI} &\rightarrow K_S = 2,4 R_m^{0,454} \beta^{0,666} \\ \text{GHISE} &\rightarrow K_S = 0,9 HB^{0,4} \beta^{0,666} \end{aligned}$$

Definita q la sezione del truciolo (materiale asportato) $q = p \cdot a$ ho che

$$F_T = K_T \cdot q \quad K_T = K_S \cdot q^{1-\frac{1}{n}} \Rightarrow F_T = K_S \cdot q^{1-\frac{1}{n}}$$

In effetti K_T è influenzato da vari parametri (temperatura di taglio, velocità, ecc) per cui la sezione è elevata a $1-\frac{1}{n}$ diversa dalla n di Taylor che tiene conto di tutti questi altri parametri.

Siccome $q = a \cdot p$ posso trascurare F_a tutto la variabile a è implicita in F_r , ricordando che $v_r = \frac{\pi D m}{1000}$ ho che:

$$P_m = K_S \cdot q^{1-\frac{1}{n}} \cdot v_r$$

$$P_m = K_S \cdot q^{1-\frac{1}{n}} \cdot \frac{\pi D m}{1000} \quad m^2 \text{ per } q$$

$$\text{Si può anche scrivere } P_m = F_r \cdot v_r = K_S (a \cdot p)^{1-\frac{1}{n}} \cdot \frac{\pi D m}{1000}$$

Su ogni motore in commercio, fra le varie caratteristiche vi è la potenza di fuga P_H cioè la potenza che il motore riesce realmente a fornire. Essa può essere moltiplicata per il rendimento della macchina η o per il rendimento totale della catena cinematica $\eta_{tot} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \eta_n$ ottenuto dal prodotto dei rendimenti dei singoli organi che compongono la catena stessa. In ogni caso sia η che P_H sono noti.

Per fare in modo che la mia macchina riesca a lavorare correttamente essa deve fornire una potenza maggiore di quella al mandrino calcolata teoricamente, per cui la condizione necessaria di funzionamento è che:

$$P_m < P_H \eta$$

η è solitamente compreso fra 0,85 e 0,95

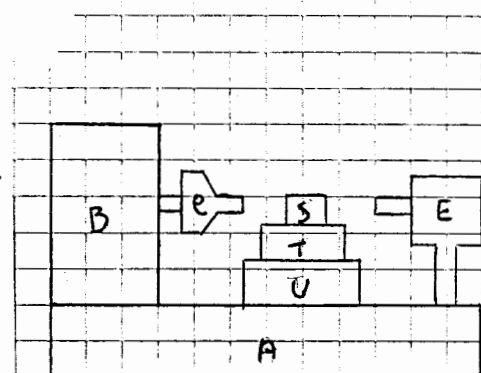
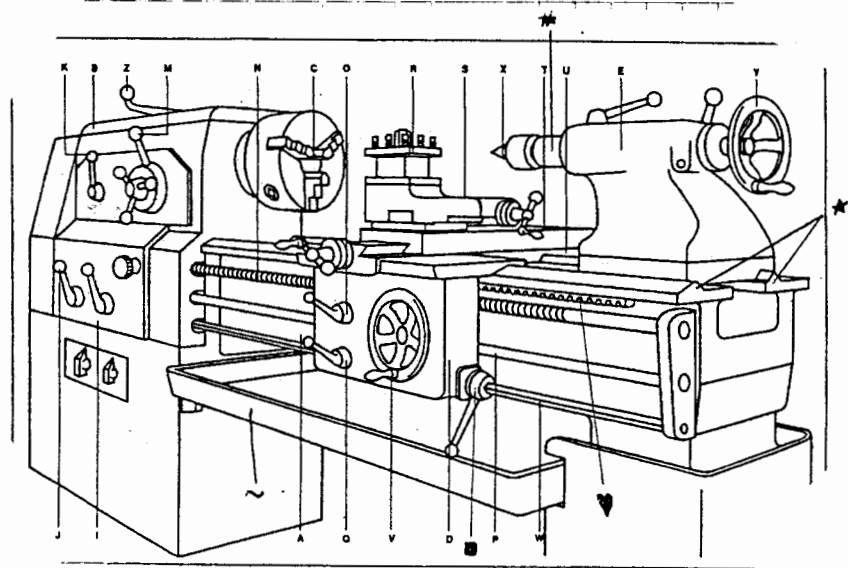
P_H si calcola in Kilowatt

TORNITURA

È una lavorazione con asportazione di truciolo che sfrutta il tornio. Ha i seguenti Mot. di lavoro:
 moto di taglio rotatorio impartito al pezzo da un sistema di serraggio del mandrino
 moto di avanzamento dell'utensile che viene fissato al tornio tramite il portautensile
 moto di appostamento impartito all'utensile, ortogonale al moto di avanzamento
 Ci sono due tipi di tornio:

- **Tornio PARALLELO** in cui l'asse di rotazione del pezzo è parallelo alla direzione del moto di avanzamento dell'utensile
- **Tornio FRONTALE** in cui l'asse di rotazione del pezzo è ortogonale alla direzione del moto di avanzamento dell'utensile

Il tornio frontale è preferito per pezzi molto grandi perché il parallelo avrebbe bisogno di un mandrino molto grande.



(A) Base: È una parte della macchina che supporta tutti gli organi fissi e mobili del tornio. È generalmente in ghisa per le sue proprietà antivibranti. Ha delle guide che servono per lo spostamento della slitta principale e della testa mobile. Su di essa ci sono dei rilievi triangolari (*) fatti per evitare spostamenti circolari dei pezzi durante la lavorazione l'eventuale ruota di questi pezzi compie solo un abbassamento dei componenti del tornio, ma non spostamenti trasversali.

(B) Testa fissa: È la sede del motore elettrico, del cambio principale e del cambio secondario. Il cambio principale trasmette il moto al mandrino permettendo la scelta del numero di giri del pezzo. Il cambio secondario invece permette l'avanzamento automatico dell'utensile facendo muovere di moto rettilineo uniforme la slitta principale. Sfrutta il sistema vite-madrevite (M) e una chioccia che si può agganciare o meno alle vite che ruota; la vite è in cima al basculante ed è fissata alla slitta. Avvicinamento di precisione con utilità e velocità.

(C) Mandrino: Serrare rigidamente il pezzo da lavorare sulla macchina e gli impartisce il momento torcente. Esso è collegato all'albero del mandrino che fa parte del cambio principale. In realtà il cambio principale ha 3 alberi: l'albero primario collegato tramite un sistema cinghia-puleggia al motore della macchina e tramite ruote dentate trasmette il moto all'albero secondario, che presiede alla ruota dentata che permette il cambio di velocità trasmettendo all'albero del mandrino, per cui si può variare la velocità (e il numero di giri) del pezzo. Si possono trovare vari tipi di mandrino a sezione circolare in cui ci sono 3 o 4 sezioni in cui sono presenti degli elementi che servono a avvicinare o allontanare il pezzo dallo strumento.

Mentre il mandrino a 3 griffe è auto centrante, quello a 4 griffe non per forza lo è, e, a seconda della disposizione delle griffe, può anche permettere un arco gireo. Un altro modo per fissare il pezzo sulla macchina è il sistema punta e contropunta (la punta sulla testa fissa (A) e la contropunta sulla testa mobile (B)) che garantisce il fissaggio del pezzo con precisione assoluta che evita che il pezzo frastuoli, ma non c'è l'attivo meccanismo per la rotazione ad altissime velocità.

⑤ Testa mobile: Può spostarsi sul bancoale avvicinandosi o allontanandosi dalla testa fissa. Può scegliere la contropunta per il fissaggio forte (X). Sceglie un albero forzato con foro conico detto **cammotto** (H), che può scegliere una punta elicoidale fissa che non ruota ma avanza con la testa mobile verso il pezzo per eventuali brotture oppure scegliere un cuscinetto e una contropunta rotante che insieme ruotano a folle permettendo il sistema punta-contropunta. L'eventuale posizione del cammotto (più o meno sporgente dalla testa mobile) è regolata da un volantino (Y).

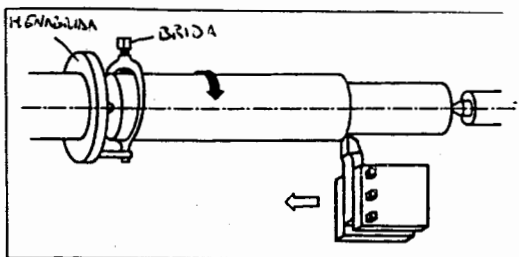
⑥ Slitta inferiore permette l'avanzamento dell'utensile verso il mandrino. È collegata alla manderite (N) che ne permette di generare la pletatura ponendo l'avanzamento pari al passo, è collegata alla cremagliera (V), e a una barra scanalata (W) sulla quale può operare una leva di sicurezza (M) che gestisce l'avvio e il bloccaggio della slitta stessa.

⑦ Slitta trasversale permette lo spostamento trasversale della slitta parallelamente al piano del bancoale per impartire la profondità di passata, muovendosi ortogonalmente all'asse di rotazione del pezzo, permette la sfaccatura, cioè la riduzione della larghezza del pezzo tramite una tornitura mai eliminata, ma piana. Inoltre rende le cavi del pezzo perfettamente ortogonali alle generatrici permettendone la rifinitura. Anche essa può essere spostata in automatico tramite il sistema vite-matrevite.

⑧ Slitta portautensile presenta l'alloggio su cui viene montato l'utensile. Può ruotare intorno al proprio asse e formare qualsiasi angolo con l'asse di rotazione del pezzo per effettuare lavorazioni coniche. L'alloggio su cui viene montato l'utensile si chiama portautensile (B) e su di esso è montato lo stelo dell'utensile, presenta 4 viti e la rotazione è permessa tramite un dado posto al centro.

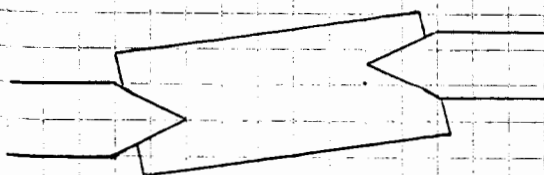
Al di sotto del bancoale c'è anche una vaschetta sottobancoale (C) per la raccolta del liquido lubrificante e il suo riciclo. Siccome il moto sulla testa fissa è trasmesso tramite ingranaggi, vi è un meccanismo, detto tasta di cavallo che può modificare la distanza tra gli ingranaggi permettendone una certa intercambiabilità tra ingranaggi di diametri diversi.

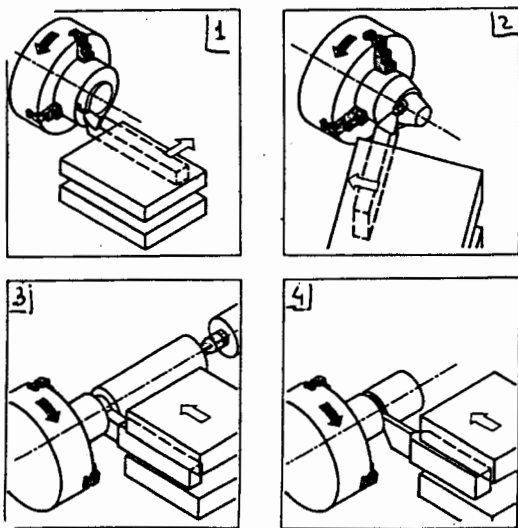
Principali lavorazioni:



- Tornitura cilindrica esterna tra punte: Il pezzo è fissato tra le punte, non c'è abbastanza forza d'attacco per trasmettere la rotazione al pezzo, per cui essa avviene tramite brida e menabrida; in questo modo il perno della brida scende e fissa il pezzo alla menabrida che ruota quindi insieme all'albero stesso.

- Tornitura conica con spostamento della contropunta: La contropunta può essere spostata ortogonalmente all'asse di rotazione per avere forme coniche. Se, vista dall'alto, la contropunta è più in alto della punta la base maggiore del troncato di cono si ha sulla contropunta. Viceversa se la contropunta è più in basso della punta (vista dall'alto) la base maggiore è sulla punta.



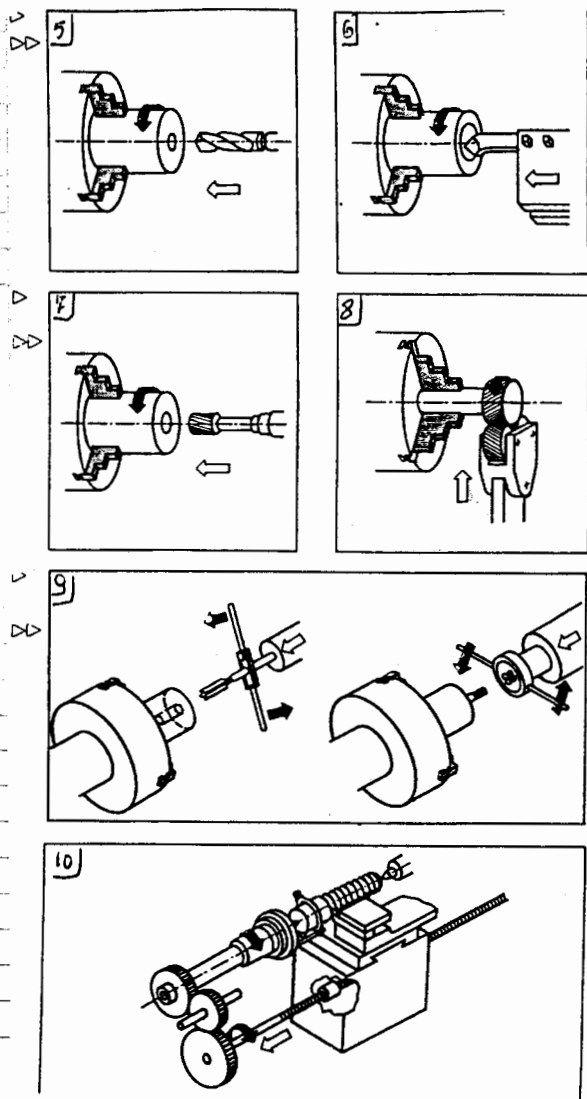


Spacciatrice (1) lo spostamento dell'utensile è ortogonale all'asse di rotazione tramite la slitta trasversale. Permette la finitura della base libera del pezzo e rende perfettamente ortogonale la stessa base libera rispetto alla sua rotazione.

Formatura conica (2) il carotello portautensile presenta un'inclinazione rispetto all'asse di rotazione del pezzo che ne permette la lavorazione.

Formatura (3) viene formata una gola facendo avanzare l'utensile ortogonalmente all'asse del pezzo in un dato punto.

Troncatrice (4) Taglio del materiale sul tornio stesso in modo da avere già una base finita e ortogonale al pezzo stesso.



Foratura con punta elicoidale (5) con mandrino autocentrante a 3 griffe, la carotapunta elicoidale avanza verso il pezzo che ruota.

Alesatura (formatura cilindrica interna) (6) si usa per fori di grande diametro dopo la foratura con punta elicoidale sfruttando un utensile da interni. Si usa perché la foratura non permette rifinitura elevata e filo perfettamente cilindrico. Essendo una rifinitura l'alesatore può essere un utensile monogolante o plurigolante (c'è mono tunnel).

Alesatura (con alesatore a dati) (7) l'utensile è plurigolante.

Grafomatrice (8) permette di eseguire zigrinatura. Il processo avviene per deformazione plastica.

Filettatura (9) con filetti e giramanchio attaccati alla testa mobile, in cui gira la vite da filettare. Per poi sfaccare la vite il mandrino viene messo in rotazione nel senso inverso a quello precedente.

Filettatura con vite e mandrino (10) la slitta trasla con un avanzamento pari al passo della filettatura tramite la chioccia.

Se il pezzo da lavorare è molto lungo, si ricorre alle lunette, fissate al carro che fa sì che il pezzo non si muova. Ha tre cuscinetti all'interno.

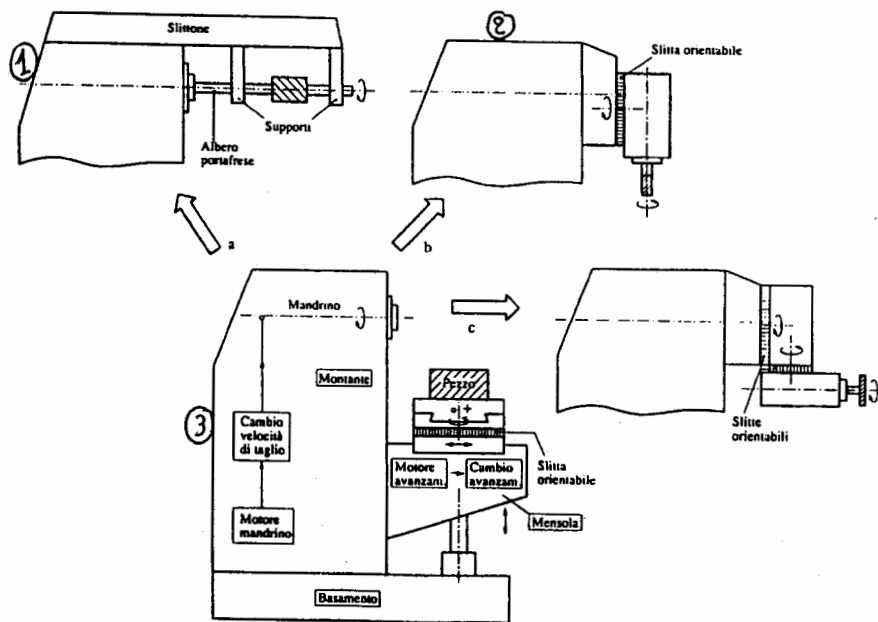


Il Passaggio barra è una caratteristica della macchina e indica la grandezza del diametro della barra da lavorare. Un'altra caratteristica importante della macchina è la distanza tra le punte e indica la massima lunghezza della barra da lavorare.

FRESATURA

è una lavorazione per asportazione di truciolo eseguita con una macchina utensile detta fresatrice e con un utensile pluritagliente detto fresa. Permette di eseguire lavorazioni su superficie piane o anche superficie di rivoluzione.

Moti: velocità di taglio della fresa (ruota sempre la fresa o moto rotatorio), avanzamento del pezzo, spostamento del pezzo o dell'utensile. Di conseguenza l'utensile ruota, il pezzo avanza e lo spostamento può essere del pezzo o dell'utensile.



Ci sono 3 tipi di fresatrici:

- ① A testa orizzontale
- ② A testa verticale
- ③ Universale

• La fresatrice a testa orizzontale presenta l'asse di rotazione dell'utensile parallelo alla superficie da lavorare. Qui lo slittone sostiene l'albero portafresa tramite due supporti che gli permettono la rotazione se collegato al mandrino. Va e' fisso, ma può slittare verso sinistra e verso

destra. il basamento è fissato al suolo e il montante (parte laterale) può contenere il motore principale.

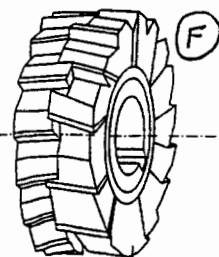
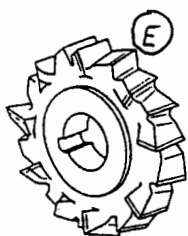
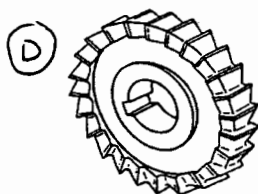
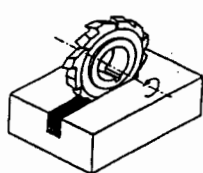
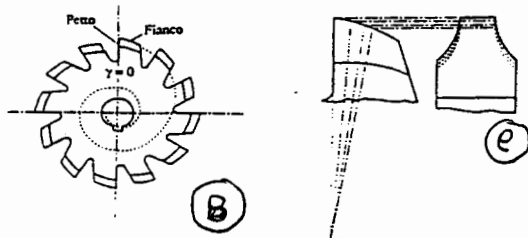
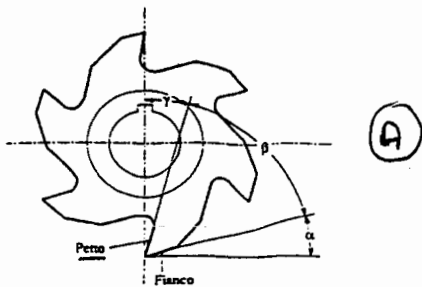
• La fresatrice a testa verticale ha l'asse di rotazione dell'utensile perpendicolare alla superficie da lavorare. A destra della slitta orientabile (vedi figura) c'è la testa verticale che ospita la fresa. La slitta si chiama orientabile perché può ruotare (prima della lavorazione, non durante) e questo permette anche di fare smussi.

• La fresatrice universale presenta invece una testa che può ruotare anche di 90° (gli spostamenti e le rotazioni vanno fatti prima della lavorazione).

Di solito il basamento viene fissato al suolo tramite una fondazione (alta forza in gioco), per isolarlo dalle vibrazioni degli smorzatori per evitare di trasmettere vibrazioni (il collegamento tra basamento e suolo non è rigido). Sopra al basamento c'è il montante che ospita gli organi che permettono i moti di lavoro, ovvero il motore principale del mandrino a cui è associato il cambio principale per la definizione della velocità di rotazione della fresa, il tutto collegato all'albero del mandrino. Attivo al montante vi è una mensola che può sollevarsi o abbassarsi rispetto al basamento; all'interno di essa vi è un motore ausiliario e un cambio secondario che permettono di impostare l'avanzamento dell'utensile. Sulla mensola infatti ci sono delle slitte: una permette il movimento del pezzo parallelamente all'asse del mandrino, una orientabile permette la lavorazione con diverse direzioni e un'altra infine permette lo spostamento trasversale rispetto all'asse del mandrino.

La fresatrice universale è la più costosa tra le tre (ha flessibilità di lavorazione), la fresatrice a testa orizzontale è preferita per superfici molto estese sfruttando grandi fresa, mentre la fresatrice a testa verticale viene utilizzata per lavorazioni di piccoli pezzi.

Sul singolo dente si individuano tutti i parametri dell'ingente monodentale (es. il petto della fresa è il primo a sinistra indicato in (A) ortogonale al piano del foglio). Il troncato va nella cosa presente tra due denti consecutivi. In base al numero di denti della fresa si sceglie sia l'avanzamento che lo spessore, infatti maggiore è il volume di troncato speso, maggiore deve essere il vano tra due denti (minore deve essere il numero di denti stessi).

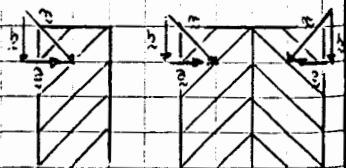


La fresa a denti fresati (A) è costruita da acciaio HSS per cui, quando si usura, essa va affilata sul fianco, riducendone il fianco e quindi il diametro, per cui la sua geometria varia nel tempo perché riducendo il diametro della fresa aumenta la larghezza del dente.

La fresa a profilo costante (B) ha una geometria diversa, in quanto ha una forma tale per cui il fianco del dente ha una curvatura che segue la spirale di Archimede (passo costante). In questo caso l'angolo $\gamma = 0$, l'ingente usurato viene affilato sul petto e, in questo modo, il profilo del dente non viene modificato e nemmeno la lunghezza del tagliente.

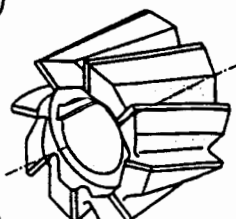
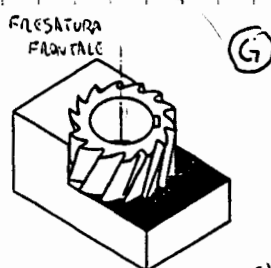
I denti possono avere varie forme: possono essere
(D) denti dritti, per cui i taglienti principali sono paralleli tra loro e paralleli all'asse di rotazione della fresa (utili per la produzione di corse in pezzi piani); possono essere denti inclinati
(E) o elicoidali rispetto all'asse di rotazione, che riducono eventuali vibrazioni: se utili dovuti alla forza di taglio in quanto la lunghezza dei denti non viene sollecitata contemporaneamente, ma in maniera graduale, quindi la forza

di taglio è più piccola, i denti hanno meno sezione resistente e l'aumentare del numero di denti aumenta la finitura. Tuttavia i denti elicoidali presentano eccentricità in quanto esse usate di una forza ortogonale a quella di avanzamento che tende a farlo deviare dalla sua direzione di avanzamento.
 $m = z + 2$ e si oppone all'avanzamento a produrre eccentricità.

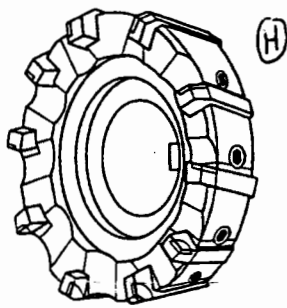


La ruota dentata a denti bieleoidali (F) riduce le vibrazioni elicoidali, in quanto l'eccentricità è dovuta a due contributi uguali ed opposti, per cui l'eccentricità è nulla.

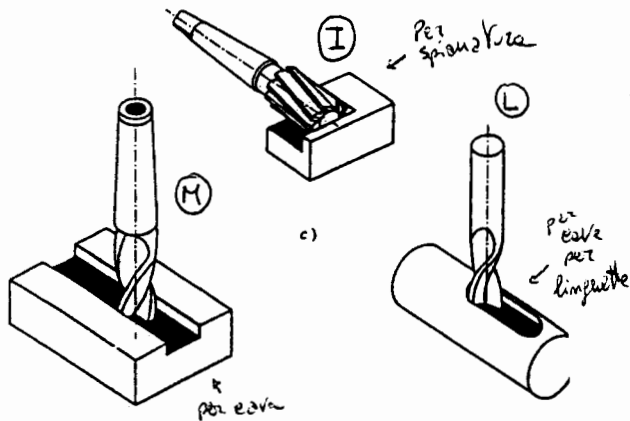
Generalmente la fresatura a testa verticale si chiama fresatura frontale, la fresatura a testa orizzontale si chiama fresatura periferica.



Il verso di rotazione per fresa a denti inclinati è antiorario rispetto a perché c'è una forza trasversale (parallela all'asse di rotazione) che deve essere rivolta sempre verso l'albero del mandrino, altrimenti esso tenderebbe a fiond via la fresa dall'albero del mandrino. Questo tipo di fresa ha anche dei difetti: che gli permettono di resistere a forze radiali.



La frese a inserti riportati (H) è utile per spianature di superficie e presenta vari alloggi per inserti (tutensili mono-taglienti), ognuno dei quali è regolabile ed è bloccato tramite una vite a bruciola (con la testa a foro esagonale). Il costo di questa frese è elevato, ma gli inserti da sostituire costano relativamente poco.



Le frese a candeola o bottone sono formate dalle frese stesse e dal codolo che serve a bloccare l'utensile nell'albero del mandrino. Il codolo può essere conico (I) che si incastra nel mandrino e genera un forte attrito che permette la rotazione della frese e impedisce spostamenti relativi in quanto l'estremità presenta un mascello quadrato. Il codolo conico può anche avere un mascello filettato per essere avvitato nel mandrino (M) oppure il codolo può essere cilindrico (L) e viene bloccato nel mandrino tramite le sue piffa autocentranti.

Ci sono anche delle frese di forma che hanno le dimensioni dell'elemento geometrico da generare come per esempio quello conico a denti inclinati.

Tramite queste frese si possono generare vari tipi di cava, tra cui quella dritta fatta da una frese a candeola, oppure quella a coda di rondine generata da una cava dritta (preceduta fatta con una frese a candeola). Tramite una frese conica con denti inclinati c'è anche la cava a T rovesciata, utile per bloccare i pezzi sulle slitte oppure le morse che poi bloccano i pezzi, ed ottenerla da una cava dritta (generata da una frese a candeola), tramite una frese per cava a T, che è una frese di forma.

Le frese in HSS vengono catalogate in 3 categorie e permettono la selezione dell'utensile in funzione del materiale su cui lavorare e il numero di denti della frese:

- TIPO N: maggior numero possibile di denti. Vengono scelte per materiali duri o in fase di finitura (meno spazio tra i denti) ideale per poco truciolo da rimuovere.
- TIPO D: meno denti e punta di diametro e vengono scelte per materiali normalmente lavorabili e in fase di sgrossatura.
- TIPO T: minor numero di denti, sono in grado di espellere bene il truciolo e vengono scelte per lavorazioni difficili che "impantanano la macchina" per la difficoltà di espulsione del truciolo e per lavorare materiali duri.

Fresatura periferica

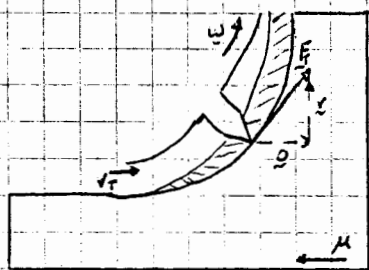
La fresatura periferica può essere concorde (se $V_r / V_m > 1$) o discorda (se $V_r / V_m < 1$)

Il dente genera un truciolo a sezione non costante, infatti man mano che il dente avanza, il truciolo aumenta di sezione.

Si chiama truciolo a virgola il truciolo con spessore variabile a seconda che l'utensile tocchi totalmente o solo in parte il pezzo su cui lavorare.

Nella lavorazione il pezzo avanza con velocità di avanzamento v_a mentre l'utensile ruota con una

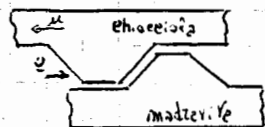
velocità angolare ω (aut. orz.)



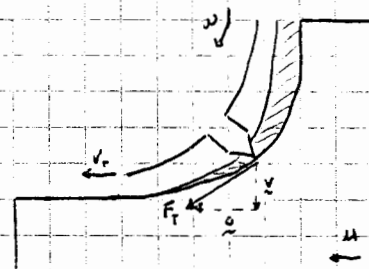
La fresatura periferica discorde presenta una velocità di taglio periferica V_T discorde rispetto alla velocità di avanzamento del pezzo $V_T \neq \mu$.

Analizzando le forze in gioco si nota che la forza di taglio F_T , perpendicolare al petto dell'utensile, si può scomporre in una componente orizzontale Q e una componente verticale Z .

Questa componente verticale Z porta il pezzo a sollevarsi dalla tavola porta pezzo, per cui è necessario progettare un suo sistema di fissaggio. In definitiva questo sistema è tale perché impedisce vibrazioni che tendono a ruotare il pezzo e lo guida positivamente. Tuttavia la forza orizzontale Q tende ad opporsi all'avanzamento del pezzo e un vantaggio perché annulla i giochi presenti nell'accoppiamento vite-madrevite (che generano l'avanzamento del pezzo); la forza Q infatti tende a fare in modo che la chioccia resti attaccata alla madrevite (per cui essa rimane solida).



Pro: { Forza orizzontale opposta all'avanzamento contro } { vibrazioni della macchina
chioccia solida alle madrevite } { distacco del pezzo dal piano di lavoro



La fresatura periferica concorde presenta una velocità di taglio periferica V_T concorde rispetto alla velocità di avanzamento del pezzo $V_T = \mu$.

Analizzando le forze in gioco, questa volta la scomposizione di F_T è diversa. Infatti la componente verticale Z punta verso il basso e aiuta a mantenere il pezzo sulla tavola consentendo una stabilità nel bloccaggio. La componente orizzontale Q , invece, è concorde all'avanzamento, per cui essa non solo non elimina i giochi vite-madrevite, ma li aumenta. Ciò avviene ogni volta che ingranza un dente e si generano delle vibrazioni; per ovviare ciò esiste una macchina con recupero automatico dei giochi che riesce a porre il contatto vite-madrevite eliminando o per meglio annullando, la componente orizzontale Q .

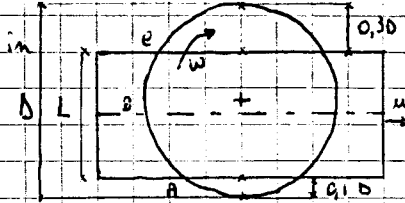
Come nella fresatura periferica discorde il dente taglia gradualmente il truciolo, che aumenta gradualmente il suo spessore; non ci sono vibrazioni dovute al contatto dente-pezzo e la forza di taglio F_T (che dipende dalla sezione del truciolo) ha anch'essa un incremento graduale la qualità superficiale è però minore rispetto alla fresatura periferica concorde a causa del ritorno elastico del materiale, per cui il secondo dente sfreierà sul fianco principale sul materiale già lavorato, aumentando la rugosità del pezzo.

Nella fresatura periferica concorde il dente incontra il pezzo nel punto in cui il truciolo ha il massimo spessore (massima sezione) e la lavorazione avviene tramite un'azione che genera delle vibrazioni, che però non sussistono per via del fatto che la forza di taglio F_T ha una componente che spinge il pezzo sulla tavola (le vibrazioni vengono smorzate). In questo modo il dente non sfreia più sulla superficie già lavorata, per cui essa ha una finitura superficiale migliore di quella generata con la fresatura periferica discorde, sempre a patto che la macchina abbia il recupero automatico dei giochi.

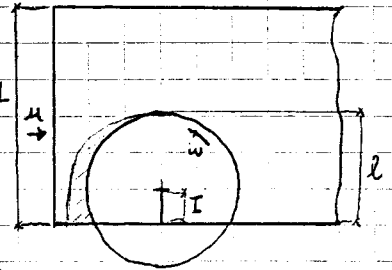
Fresatura frontale

Per la fresatura frontale si deve distinguere in primo luogo il caso in cui $D > L$ e il caso in cui $D < L$, dove D è diametro della fresa, mentre L è larghezza del pezzo da lavorare.

Nel caso in cui: $D > L$ il truciolo generato non è più a rigole, in quanto il dente asporta una sezione costante del truciolo. Generalmente in questo caso più denti lavorano contemporaneamente. Per essere certi che la componente orizzontale delle forze di taglio di tutti i denti in presa dia un totale che si oppone all'avanzamento si deve avere che $AB > BE$, dove l'arco AE si definisce arco di contatto, l'arco di rotazione della frese deve essere spostato verso l'arco di uscita BE (l'arco AB è l'arco di imbocco). Inoltre la sporgenza dell'utensile dal lato dell'arco di imbocco vale $0,1 D$, mentre quella del lato dell'arco di uscita vale $0,3 D$. In genere si deve fare in modo che $1,3 L < D < 1,7 L$.



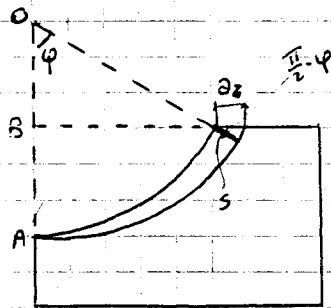
Nel caso in cui: $D < L$ la lavorazione deve avvenire per gradi. In questo caso il truciolo è a rigole, tuttavia esso viene considerato costante. La rotazione permette al truciolo di essere espulso dalla parte libera, in questo modo esso non si inceppa e non sfiscia sul pezzo già lavorato. Per fare in modo che la componente orizzontale delle forze di taglio sia sempre opposta all'avanzamento del pezzo bisogna che $I \leq l/3$, dove I è la distanza fra il centro dell'utensile e il bordo del pezzo lavorato. Siccome il ritorno elastico dovrebbe essere nullo da tutti i denti e utile inclinare leggermente la frese ($\max 1^\circ$), in modo che esse ingranino i denti gradualmente senza che essi tocchino già la superficie già lavorata.



Calcolo della potenza al mandrino

$$P_m = F_t v_t + F_a u + F_p v_p \quad \text{durante la lavorazione si presuppone che } v_p = 0$$

inoltre siccome u è molto piccolo si trascuri anche $F_a u$ anche se F_a è grande e non va trascurata in fase di progettazione. $P_m \approx F_t v_t$



Fresatura periferica

O = centro rotazione utensile
 az = avanzamento per dente
 Z = numero di denti
 $AB = p$ = profondità di passata
 $OA = D/2$ = raggio utensile
 q = sezione del truciolo

$$a = az \cdot Z$$

$$u = a \cdot n = az \cdot Z \cdot n \quad \text{per cui}$$

$$az = \frac{u}{Z \cdot n} \quad \text{valore noto}$$

$$F_t = K_T \cdot q \quad \text{ma } q \text{ varia per cui: essere } q_{\max} \text{ associato a } S_{\max}$$

$$s = az \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi) = az \sin \varphi \quad BO = \frac{D}{2} - p = \frac{D}{2} \cos \varphi \quad (\text{considerando } s \rightarrow 0)$$

$$\cos \varphi = \frac{2}{D} (\frac{D}{2} - p) = \frac{D - 2p}{D} \quad \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - (\frac{D - 2p}{D})^2} \quad \sin \varphi = 2 \sqrt{\frac{p}{D} (1 - \frac{p}{D})}$$

$$\text{però linearizzare supponendo } 1 - \frac{p}{D} \rightarrow 1 \quad \sin \varphi = 2 \sqrt{\frac{p}{D}} \quad S_{\max} = \frac{2u}{\pi n} \sqrt{\frac{p}{D}}$$

$$q = s_{\max} \cdot l = \frac{2u}{\pi n} \sqrt{\frac{p}{D}} \cdot l = 2azl \sqrt{\frac{p}{D}} \quad \text{con } l = \text{larghezza dente}$$

Ricordando che $F_t = K_s \cdot q$ (1-11) dove K_s è dato dalle relazioni di Koenenbergs

però quindi ricavare P_m e verificare che $P_m < \eta P_H$

Per fresatura frontale il truciolo ha sezione costante, per cui: $F_t = K_T \cdot q = K_T \cdot az \cdot Z \cdot p$

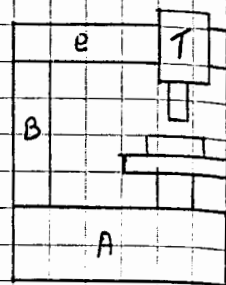
$$Z = \text{numero denti in presa} \quad az \cdot Z \cdot p = \text{sezione del truciolo} \quad F_t = K_T \cdot az \cdot Z \cdot p$$

La quantificazione dell'energia riguarda il totale della potenza al mandrino più quella del motore ausiliario per far spingere il pezzo. Per fresatura periferica si considera una $P_{\text{motor}} = P_{m0} + 0,15 P_m$ per quella frontale $P_{\text{motor}} = P_m + 0,15 P_m$

FORATURA

Si esegue con uno strumento, definito **trapano**; esso può essere:

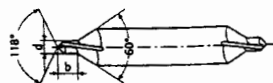
- **Sensitivo**: è quello manuale, le cui forze in gioco vengono imposte dall'operatore al manovello.
- **Da banco**: presenta un montante (B) fissato su un basamento (A). Sul montante c'è un braccio (C) in cui c'è la testa del trapano (D). Qui può esserci un motore elettrico (non molto grande).
- **A colonna**: identico a quello da banco tranne per il fatto che il motore elettrico non è piccolo ma grande, per cui esso è posizionato non nella testa del trapano ma nel montante.
- **Radiale**: ha un braccio lungo su cui la testa per forare viene usata per grandi pezzi; e il braccio può ruotare attorno al montante.



Questi trapani possono essere a testa singola o a testa multiple con mandrini multiple.

La foratura avviene in varie fasi: 1) Centatura 2) Foratura 3) Allargatura (svasatura) 4) Alesatura 5) Filettatura.

- **Centatura**: operazione preliminare eseguita per ottenere fori ad elevata precisione tramite una punta da centri (1) (usata anche per la sede di punta e contropunta in tornitura).



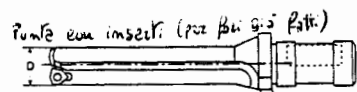
1



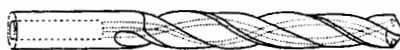
2



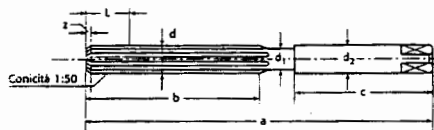
3



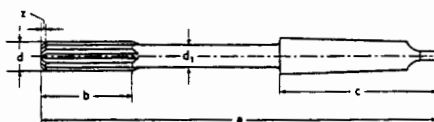
4



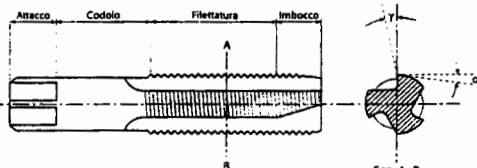
5



6



7



Sez. A-B

- Denti iniziali
- Denti intermedi
- Denti sbalzati



Essa ha una parte conica che termina con un fiotto a sezione circolare con diametro molto molto piccolo e fa in modo che la punta elicoidale possa essere posizionata esattamente sull'asse del foro. Non è sempre utilizzata, ma solo quando c'è bisogno di tolleranze strettissime [come guide preliminari] oppure su superfici inclinate per evitare che la punta elicoidale sfilii.

- **Foratura** si esegue con la punta elicoidale (5) che all'interno ha dei canali che portano del fluido e arrivano alla punta stessa in cui scorre liquido lubrificante. Genera fori con elevata rugosità superficiale e sezione circolare a causa delle vibrazioni torsionali e flessionali. La punta infatti deve sopportare una coppia di forze resistenti e la sua snellezza tende a farla flettere.

- **Allargatura** permette di allargare fori già effettuati. Per fori grandi si possono utilizzare anche diverse punte per allargatura (3) (4) con diametri via via crescenti. La svasatura cilindrica o conica è effettuata con la punta per svasatura (2) e consiste in una allargatura parziale del foro in quanto non termina il foro.

- **Alesatura** operazione di finitura che migliora il foro già eseguito con punta convenzionale. Elimina la rugosità superficiale e la sezione circolare del foro. Gli alesatori hanno un numero di taglienti elevato (però tenuto da asportare) e possono avere i taglienti lunghi (6) che garantiscono perfetta concentricità e vengono arrodati a mano, oppure hanno i taglienti corti (8) e garantiscono la mancanza di disassamenti e vengono azionati da macchine utensili. Queste punte hanno un'estremità conica per facilitare il bloccaggio nel mandrino.

• **Baratura** si esegue con il barano è una forma di alesatura per fori di grande lunghezza e consiste in una macchina azionata tramite una barra scanalata, per cui l'utensile ruota e trasla la barra viene generalmente pretesionata e il primo foro viene eseguito con il processo Mannesmann.

• **Filettatura** viene eseguita tramite il maschio (17). Si genera un foro di diametro più piccolo del maschio leggermente conico e di solito si utilizzano 3 maschi: 1) **filletti** con taglianti in filettare da gola con denti sbazzatori che sbazzano la filettatura 2) **denti intermedi** svolgono la filettatura (ma c'è il ritorno elastico) 3) **denti finitori** tempiano conto del ritorno elastico e completano la filettatura.

Le operazioni si complicano per fori ciechi per la difficoltà ad espellere il truciolo.

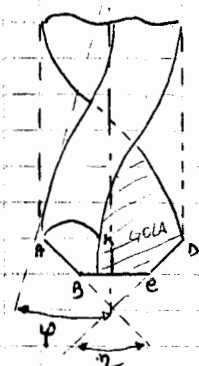
Le punte si suddividono in 3 categorie (a seconda degli angoli della punta, dell'elica e dei materiali).

• **Tipo N** utili per materiali di durezza media (acciai, ghise)

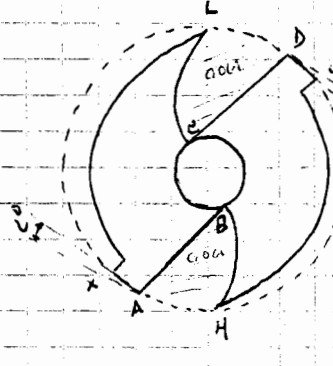
• **Tipo D** utili per materiali molto duri

• **Tipo T** utili per materiali teneri (anche se duttili) che impongono la macchina

Geometria della punta



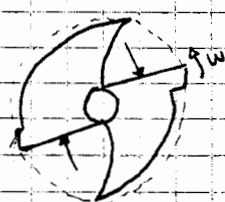
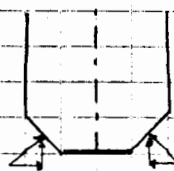
VISTA LATERALE



VISTA FRONTALE

La punta si compone di due taglianti. Essa presenta un esodo cilindrico o conico per il centraggio sul mandrino e una parte cilindrica con due scanalature elicoidali opposte con inclinazione ψ , la cui intersezione con la superficie di estremità forma i due taglianti AB e ED, che lavorano frontalmente asportando il truciolo su una superficie ortogonale all'asse di rotazione del pezzo da forare. Per materiali teneri si sceglie ψ piccolo per facilitare l'uscita del truciolo, in quanto all'aumentare di ψ si avvicinano i punti omologhi dell'elica, riduendo in cui viene asportato il truciolo. I due taglianti

sono collegati da un tratto BE che non ha taglianti: al taglio e viene a incidere il materiale lavorato, il punto A e il punto D nella vista laterale sono i taglianti secondari che rifiniscono la superficie interna del foro. I due taglianti principali formano un angolo α . Gli spigoli elicoidali di gola [A, X oppure D, Y] formano il **quadretto**, caratterizzato da un piccolo angolo di spigolo inferiore di circa 2 gradi; in questo modo evita lo strisciamento tra la superficie cilindrica generata dal foro e la faccia di spigolo secondaria AX o DY. Il petto dell'utensile coincide con la gola nella vista laterale, mentre la faccia di spigolo principale è la figura ABK nella vista laterale oppure ABLX o DENV nella vista frontale. I punti L e H permettono di evitare possibili interferenze nella lavorazione dei taglianti. Il cerchietto della vista frontale è il mozzico, l'unica parte piena della punta, che serve a trasmettere il momento torcente alla punta stessa; il suo diametro d è circa $[0,1 D; 0,2 D]$ dove D è il diametro della punta. A causa delle sue dimensioni ridotte si ha scarsa finitura superficiale e scarsa elasticità perché essendo la sezione resistente piccola, si hanno oscillazioni flessionali e torsionali anche a causa della grande snellezza.



Una grossolana schematizzazione delle forze (considerate sempre applicate in mezzo) mostra che sia nella vista laterale che in quella frontale le componenti orizzontali di queste forze si annullano a vicenda, per cui si

ha che c'è una forza verticale nella vista laterale che si oppone alla discesa (avanzamento) dell'utensile e due forze

verticali nella vista frontale che formano una coppia che genera un momento che si oppone alla rotazione dell'utensile stesso.

Potenza al mandrino

I nostri parametri fondamentali in questo caso sono v_r e a perché non c'è profondità di passata.

$$v_r = \frac{\pi D n}{1000}$$

D = diametro punta elicoidale

n = giri al minuto

$2z$ = avanzamento del tagliante a giro

$$a = 2 a_z$$

2 sono i taglianti.

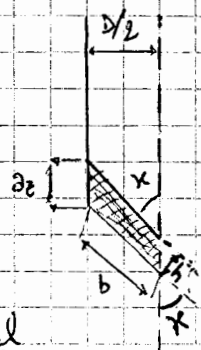
per cui a è noto

$$P_m = F_r v_r \quad \text{ma } F_r = K_T \cdot q = K_T (b \cdot h) \quad \text{definito } X = \pi/2$$

$$h = 2z \sin X \quad b \sin X = D/2 \quad b = \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\sin X}$$

nel caso di foratura vale la relazione $K_T = K_S \frac{1}{h^2}$ dove K = coefficiente del materiale da forare

$$F_r = K_T \cdot q = K_S b h^{1-2} \quad P_m = K_S b h^{1-2} \cdot \frac{\pi D n}{1000} \cdot 2$$



In foratura quindi $K_T \neq K_S q^{1/2}$ bensì $K_T = K_S \frac{1}{h^2}$ K_S è tabellata

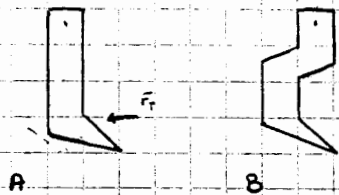
Alla potenza al mandrino c'è un fattore 2, in quanto la F_r che agiscono insieme sono due, per cui $P_m = F_r v_r$ dove $w = 2 \pi r$ $v_r = \frac{w}{2}$ $P_m = F_r \cdot v_r \cdot 2$

LAVORAZIONI A TAGLIO RETTILINEO

Generalmente sono la limatura e piallatura, la strozzatura e la brocciatura. È un gruppo di lavorazioni usato per la realizzazione di superfici esterne piane (limatura, piallatura) o superfici interne partendo da fori pre-esistenti (strozzatura). Queste lavorazioni hanno tutte in comune basso produttività e scarsa finitura superficiale, tuttavia gli utensili monofilanti adoperati hanno un basso costo rispetto a quelli per esempio della fresatura. Lo scarso rendimento di queste lavorazioni è dovuto principalmente a:

- 1) Inerzia delle masse in movimento che causa perdita di tempo nell'inversione del moto
- 2) Esistenza di una corsa attiva che genera l'usile, ma anche di una corsa passiva in cui non si ha spostazione di truciolo.

Piallatura e limatura hanno un moto di taglio (o dell'utensile o del pezzo) rettilineo alternato parallelo alla superficie da lavorare con corsa attiva e corsa passiva. L'utensile può essere rettilineo (A) usato prevalentemente in finitura, oppure curvilineo (B) usato in strozzatura. La profondità di passata è sempre dovuta all'appostamento dell'utensile. Analizzando la forza a cui sono soggetti gli utensili si nota che l'utensile rettilineo è sottoposto a una F_r che tende a spostarlo dal suo asse e a farlo strisciare sulla parte già lavorata.



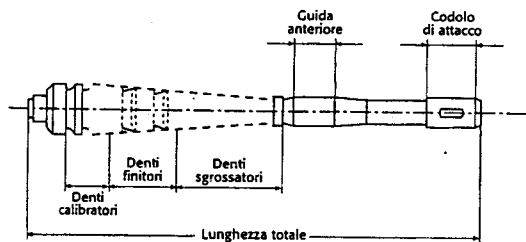
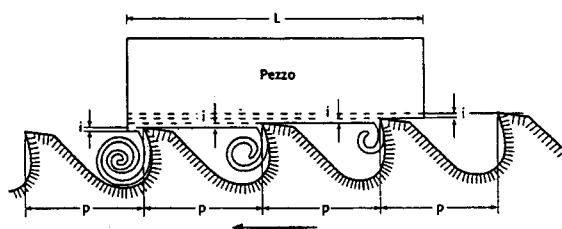
L'utensile curvilineo invece soggetto alla F_r tenderà anche esso ad incurvare, ma per la sua forma non tenderà a strisciare sulla parte già lavorata. Per questo l'utensile curvilineo è utilizzato in strozzatura mentre quello rettilineo in finitura (preferito al curvilineo poiché più economico, ovvero per regioni di costo).

La strozzatura eseguita con la strozzatrice, ha un moto rettilineo di taglio alternato verticale. Essa è preceduta sempre dall'utensile mentre la profondità di passata è definita dall'appostamento del pezzo. In questa lavorazione l'utensile scende e sposta truciolo, poi esso risale, il pezzo si apposta nuovamente e l'utensile quindi scende di nuovo per spostare truciolo (attenzione al possibile piccolo urto elastico del pezzo).

Questi procedimenti sono simili a quelli di tornitura, per cui le equazioni della potenza al mandrino sono le stesse, cambia solo il taglio che non è più obliquo ma rettilineo.

La brocciatura viene eseguita con la broccia, un utensile pluritagliente, che viene spinto al fine. Principale della lavorazione da eseguire. Il rendimento è...

elevato perché in una sola passata si termina la lavorazione (sia di interni che di esterni)



Essa ha un codolo di attacco che viene bloccato nel mandrino della macchina, una guida anteriore che entra con strettissime tolleranze nel foro e guida la broccia nella lavorazione allineando l'asse della broccia con quello del foro. La broccia viene immersa nella parte del codolo nel foro in modo che scorra all'interno di esso e all'uscita del foro esce prima il codolo che viene appoggiato al mandrino. Collegati alla guida ci sono 3 tipi di utensili:

- **denti sgrossatori** (sportano molto veloce e la sezione cresce andando dalla guida alla punta della broccia).
- **denti finitori** (rifiniscono la superficie e anche loro hanno sezione crescente)
- **denti calibratori** (tutti alla stessa altezza, vengono usati per il ritorno deciso del materiale)

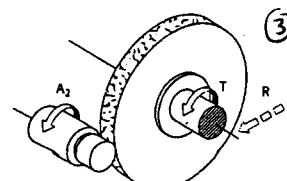
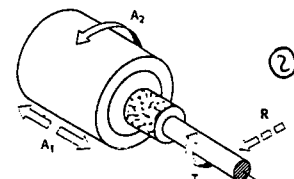
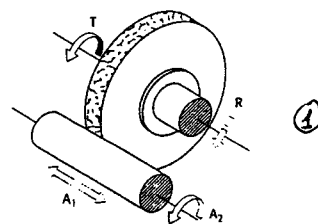
La broccatura è conveniente solo per grandi serie di produzione. La broccia presenta un passo costante tra tutti i denti della stessa serie e decrescente fra denti sgrossatori e denti finitori. La lunghezza della broccia deve essere al massimo 1 metro e non può essere un multiplo del passo dei denti, perché non si può permettere che un dente entri e un altro esca contemporaneamente (fori viziosi della forza). Se abbiamo bisogno di una broccia più lunga se ne devono costruire due, queste limitazioni sulla lunghezza sono dovute alla necessità di evitare deformazioni nel metallo HSS di cui è costruita la broccia in fase di produzione. Da ricordare infine che la profondità di passata in questo caso è definita dall'incremento i che ci dà e quanto aumenta l'altezza dei denti all'avanzare della broccia. L'incremento è costante nella stessa serie di denti ed è nullo nei denti calibratori.

B

Rettifica

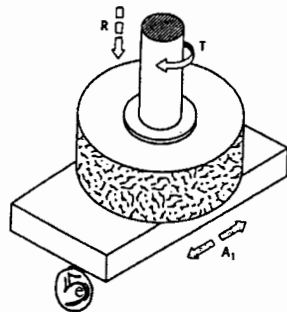
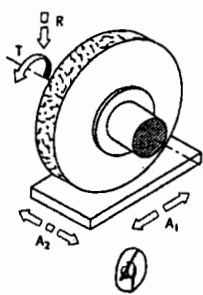
È l'ultima operazione a cui viene sottoposto il materiale prima di essere messo in commercio. Viene eseguita con la rettificatrice tramite la mola. La mola è costituita da un legante che tiene insieme numerosi microutensili (schegge). Il legante può essere plastico, cemente o metallico e in esso è annegata una polvere di materiali (silicio, diamante artificiale ecc.). È come una cartavetro 3D che asporta microtrucioli che possono generare scintille per la grande temperatura raggiunta.

- La **rettifica in fondo** ① ha una velocità di taglio della mola anche di 10000 giri/min. R è il moto di spostamento (definisce p) A_1 è il moto traslatorio rettilineo alternato del pezzo e A_2 è il moto rotatorio del pezzo stesso.



- La **rettifica in fondo per interni** ② presenta l'asse della mola non in asse con il pezzo.

- La **rettifica a ruffo** ③ è caratterizzata dal fatto che il pezzo ruota ma non trasla, il moto traslatorio è prodotto dalla mola (che ha spostamenti radiali) ed è indicato per pezzi di piccole dimensioni.



• Retifica in piano tangenziale (4) presenta l'asse della mole parallelo all'asse della superficie in lavorazione

• Retifica frontale (5) presenta l'asse della mole perpendicolare all'asse della superficie in lavorazione

I parametri fondamentali della mola sono:

- **Durezza del legante**: indica quali materiali si può lavorare. Per materiali teneri si usano mole con alta durezza (l'utensile si consuma di meno), per materiali duri si usano mole con bassa durezza (l'utensile si consuma di più).

- **Struttura**: indica la porosità del legante e se sulla superficie ha molte cavità o è chiusa. Per materiali teneri serve un'altra porosità (per generare l'effetto che impasta la macchinina, con esso viene inglobato nei pori della mole), per materiali duri serve una bassa porosità.

- **Tipo di abrasivo**: legato al materiale da lavorare

- **Qualità del legante**: legato alla durezza della mole

Se come la mole hanno altissime velocità esse devono essere bilanciate staticamente e dinamicamente e non devono avere eccentricità.

OTTIMIZZAZIONE

L'ottimizzazione è l'insieme delle attività decise finalizzate alla formulazione di una funzione obiettivo (modello matematico di ciò che si vuole ottimizzare in funzione di alcune variabili) e dalla sua massimizzazione o minimizzazione. Generalmente l'ottimizzazione prevede 3 fasi:

- 1) Valutazione dell'opportunità di ottimizzazione (se conviene o no)
- 2) Formulazione della funzione obiettivo in base alle variabili di processo
- 3) Selezione delle variabili fondamentali della funzione obiettivo e loro miglioramento

L'opportunità di ottimizzare è legata allo specifico sistema produttivo: infatti un sistema **Flow-shop** consiste in una produzione lungo una catena, si possono ottimizzare carichi di lavoro lungo la linea e gli spostamenti del pezzo, ma c'è scarsa flessibilità di lavorazione. Il sistema **Job-shop** consiste invece in una lavorazione per reparto, per cui c'è un'elevata flessibilità ma molti tempi morti: l'ottimizzazione risulterebbe inefficiente perché la perdita di tempo sta all'esterno del processo produttivo. Si cerca allora di avere una produzione cellulare (sistema ibrido).

Generalmente le funzioni obiettivo più adoperate sono:

- **Massima produttività**: minimo tempo unitario di produzione t_1
- **Massima economia**: minimo costo unitario di produzione c_1
- **Massima redditività**: massimo profitto

dove il profitto è dato da $\frac{P_1 - c_1}{t_1}$ cioè $\frac{\text{prezzo unitario} - \text{costo unitario}}{\text{tempo unitario}}$

Il processo di lavorazione prevede solitamente l'utilizzo di diverse macchine secondo il processo multistadio. Su ogni macchina il pezzo subisce una lavorazione ripartita in più passi. Variabili dell'ottimizzazione multipasso saranno quindi il numero di passi N_p , la profondità p , l'avanzamento a e la velocità di taglio v_t e il problema viene scomposto nelle sue varie parti. Generalmente nell'ottimizzazione multipasso si fissa p e si cerca v_t sfruttando un avanzamento massimo a_{max} . Il problema viene semplificato notevolmente nel caso di ottimizzazione monopasso, ove $N_p=1$, la profondità p è fissata e nuovamente si cerca v_t in funzione di a_{max} .

La scelta non ottimizzata si ha quando non c'è economia di scala e il tempo di realizzazione è basso. Nel caso in cui si ha ottimizzazione, la scelta dei parametri di taglio segue questo ordine $p \rightarrow a \rightarrow v_t$. Ovviamente si deve tener conto dei limiti di progetto, si cerca di rimanere nella zona di massima efficienza e si punta ad avere una determinata finitura superficiale (influenzata sia dall'avanzamento che dalla profondità di passata che possono innescare ingenti vibrazioni durante la lavorazione).

- p è influenzata dal massimo sovramestello da eliminare, dalle lunghezze del tagliente e dai materiali in lavorazione.
- a influenza la finitura superficiale, la forza di taglio (evitare deformazioni del nostro utensile a causa della sua snellezza), l'usura dell'utensile e le caratteristiche della macchina. Il minimo valore di a deve evitare il rifiuto del tagliente (si ha quando la deformazione del pezzo è puzamente elastica non si ha asportazione di truciolo, si ha incrudimento e aumenta la durezza del pezzo).
- v_t per la sua scelta si tiene conto della temperatura di taglio, usura dell'utensile e richiesta di potenza. Si fa attenzione al tagliente di riparto: a basse velocità il materiale tende ad accumularsi sul petto dell'utensile perché frenato dall'attrezzo, si forma una sorta di tagliente di riparto, l'angolo γ aumenta e aumenta la rugosità. Questo accumulo può staccarsi e posizionarsi sul pezzo generando una usura adesiva (si stacca una parte del pezzo) o usura diffusiva (diffusa su tutto il pezzo ed influenzata dalla temperatura).

Molte volte la lavorazione si suddivide in varie passate di sgrossatura, una di finitura (rende un buon le condizioni di asportazione in finitura) e una di finitura (la cui p è massimo 1 mm). Si cerca sempre di minimizzare le passate di sgrossatura.

Si definisce Tasso di asportazione di materiale quanto volume di materiale viene asportato in un determinato tempo di lavorazione.

$$MRR = \frac{\text{Volume}}{\text{Tempo}}$$

Nella lavorazione la rugosità del pezzo dipende dallo spazio lasciato dal tagliente quando esso asporta materiale. Per calcolarlo si distingue anche tra utensile ricordato e utensile non ricordato: generalmente si ha che:

$$R_a = \frac{R_t}{4} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{utensile non ricordato} \\ \text{utensile ricordato (raggio di ricordo } r) \end{array} \right.$$

$$R_t = \frac{a}{\sin \phi + \sin \phi'} \cdot 1000 \text{ } [\mu m]$$

$$R_t = \frac{a^2}{8r} \cdot 1000 \text{ } [\mu m]$$

Definisce il tempo di lavorazione come il rapporto fra lunghezza L e velocità di avanzamento $v_a = m \cdot a$

$$T_L = \frac{L}{v_a} = \frac{L}{m \cdot a} \text{ } [min]$$

Nell'ott. m. zazione monopassa la profondità di passata è unica e nota, per cui la scelta ricade sui parametri a e v_t . Le funzioni obiettivo ricercate riguardano il tempo e il costo.

- Si definisce tempo unitario di produzione t_1 , il tempo necessario alla realizzazione di un singolo pezzo.

Supponendo infatti di voler produrre un certo numero di pezzi (N_u), un certo tempo viene speso nella preparazione t_{prep} (attrezzaggio macchina, lettura e interpretazione del ciclo di lavorazione), poi si ha una spesa di tempo per il ciclo di lavorazione stesso t_{ciclo} (che esiste nel tempo di serraggio, tempo di spostamento utensile, tempo di lavorazione, tempo di controllo e verifica, tempo di smontaggio) ed eventualmente si ha anche il tempo di cambio utensile t_{cu} .

$$t_1 = \frac{t_{prep}}{N_u} + t_{ciclo} + \frac{t_{cu}}{N_u}$$

È evidente che solo alcuni contributi temporeali sono influenzati dai parametri di taglio (ovvero il t_{cu} e il tempo di lavorazione t_l). Si possono quindi raggruppare tutti i contributi "costanti" sotto la voce tempi parivi t_p per cui si ha un cambiamento della formula per la definizione di t_1 .

$$t_1 = t_p + t_l + \frac{t_{cu}}{N_u}$$

Si può quindi cercare il parametro v_p , ovvero la velocità di massima produttività m. m. in ipotesi di escursioni trascurabili rispetto alla lunghezza del pezzo per cui il tempo di lavorazione è uguale a quello di asportazione $t_l = t_a$.

$$t_l = \frac{L}{v_t} = \frac{\pi D L}{v_t \cdot a} = \frac{\lambda'}{v_t}$$

$$t_a = \frac{\lambda}{v_t} = t_l = \frac{\lambda'}{v_t}$$

$\lambda' \approx \lambda$ l'apice indica la somma di lunghezza lavorazione e escursione.

$$N_u = \frac{T}{t_a}$$

T = durata tagliente

Per Taylor semplificato $v T^m = v_1$

$$T = \frac{v_1^{1/m}}{v}$$

per cui $N_u = \frac{v_1^{1/m}}{v^{1/m}} \cdot \frac{v}{\lambda} \Rightarrow \frac{1}{N_u} = \frac{\lambda}{v_1^{1/m}} \cdot v^{(1/m-1)}$

Però $t_1(v_t)$ ed ho che

$$t_1 = t_p + \frac{\lambda'}{v_t} + t_{cu} \cdot \frac{\lambda}{v_1^{1/m}} v^{(1/m-1)}$$

La somma dei 3 contributi che formano t_1 mostra la presenza di un minimo in corrispondenza del quale si ha la condizione di massima produttività, e quindi v_p .

$$\frac{\partial t_1}{\partial v} = 0 \quad \frac{\partial t_p}{\partial v} + \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\lambda'}{v} \right) + \frac{\partial}{\partial v} \left(t_{cu} \frac{\lambda}{v_1^{1/m}} v^{(1/m-1)} \right) = -\lambda' v^{-2} + \frac{t_{cu} \lambda}{v_1^{1/m}} \left(\frac{1}{m} - 1 \right) v^{1/m-2} = 0$$

$$v^{1/m} = \frac{\lambda'}{\lambda} \cdot \frac{v_1^{1/m}}{t_{cu} \left(\frac{1}{m} - 1 \right)}$$

ma $\lambda' = \lambda$

$$v_p = \frac{v_1}{\left[t_{cu} \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \right]^m}$$

- Si definisce costo unitario di produzione e_1 il costo totale per la realizzazione di un singolo pezzo.

Esso è la somma del costo del pezzo e_g , del costo del posto di lavoro e_o per il tempo unitario di produzione e del costo dell'utensile e_u , rapportato al numero di pezzi lavorabili con il singolo tagliente. Il costo del posto di lavoro è la somma del costo della manodopera, dell'ammortamento della macchina e di spese generali (generalmente calcolato come percentuale).

$$e_1 = e_g + e_o t_1 + \frac{e_u}{N_u}$$

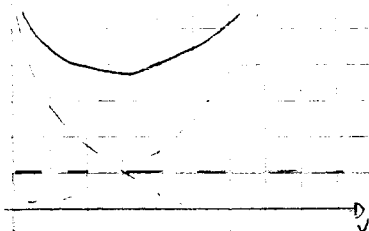
$$e_o = (e_{org} + e_{man})(1+k)$$

Il costo dell' utensileria va calcolato in base alle tecnologie di utensile adoperato, in quanto un utensile in HSS può essere riaffilato n volte con un costo di riaffilazione e_{rip} e a fine vita venduto a un valore utensile usurato e_{mu} ; un utensile ad inserti invece ha un certo numero di taglianti m_t , non può essere riaffilato e comporta un costo d'acquisto della placchetta portautensile e_p , che può essere utile per m_t taglianti. Solitamente m_t è un numero grande per cui e_p/m_t è trascurabile

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{HSS} \rightarrow e_u = \frac{e_{asa} + n e_{rip} - e_{mu}}{1+n} \\ \text{INSERTO} \rightarrow e_u = \frac{e_{asa}}{m_t} + \frac{e_{pb}}{m_t} \end{array} \right.$$

Costo dell' utensileria e costo del pezzo non dipendono dai parametri di taglio per cui possono essere aggregati sotto la voce costi fissi: e_f , per cui

$$e_1(v_f) = e_f + e_0 \left(t_p + \frac{\lambda'}{v_f} + t_{eu} \frac{\lambda}{v_f^{1/n}} v_f^{(1/n-1)} \right) + e_u \frac{\lambda}{v_f^{1/n}} v_f^{(1/n-1)}$$



Graficando e_1 in funzione di v_f si trova una situazione analoga a quella precedente, per cui esiste il minimo

$$\frac{\partial e_1}{\partial v_f} = 0 \quad - e_0 \lambda' v_f^{-2} + e_0 \left(t_{eu} + \frac{e_u}{e_0} \right) \frac{\lambda}{v_f^{1/n}} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) v_f^{1/n-2} = 0$$

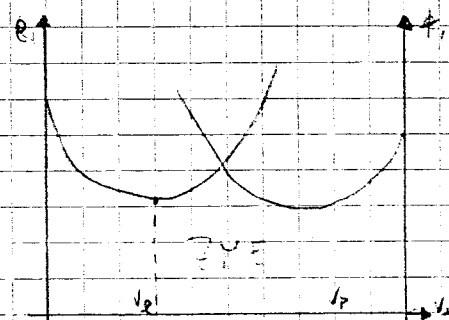
Individuo quindi la velocità di massima economia v_e

$$v_e^{1/n} = \frac{\lambda'}{\lambda} \cdot \frac{v_1^{1/n}}{(t_{eu} + \frac{e_u}{e_0})^{1/n-1}}$$

$$v_e = \frac{v_1}{\left[\left(t_{eu} + \frac{e_u}{e_0} \right) \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]^m}$$

Nota subito che $v_e < v_p$

Rappresentando le due curve in un unico diagramma si nota l'esistenza di una zona comprese tra v_e e v_p detta **zona di massima efficienza** in cui un aumento dei tempi è legato alla diminuzione dei costi e viceversa. All'esterno se aumentano i tempi aumentano anche i costi.



Consideriamo una forma cilindrica esterna. Si può cercare di non considerare l'avanzamento massimo possibile, e poi cercare v_f , ma si può anche cercare a una **ottimizzazione combinata**, cioè cercare i due parametri ottimali contemporaneamente si deve cercare alle due funzioni obiettivo t_1 e e_1 e bisogna sfruttare la legge di Taylor completa $v T^{\alpha} a^{\beta} p^{\gamma} = v_*$ dove $\alpha + \beta + \gamma = 1/n$

$$T v^{1/n} a^{m/n} p^{1/n} = v_*$$

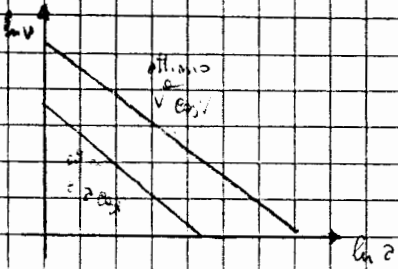
$$T v^{\alpha} a^{\beta} p^{\gamma} = K \quad \text{dove} \quad \alpha + \beta + \gamma = 1/n$$

Essendo p nota la posso inglobare nella costante $K \Rightarrow T v^{\alpha} a^{\beta} = K'$

Cerco quindi massimi e minimi delle funzioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial t_1}{\partial v_f} = 0 \\ \frac{\partial e_1}{\partial v_f} = 0 \end{array} \right.$$

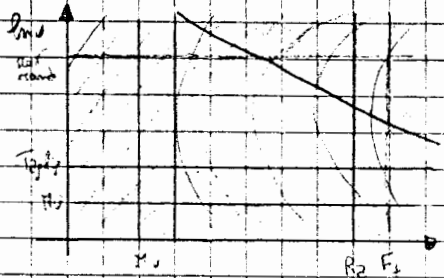
La soluzione va cercata facendo il rapporto membro a membro per $\alpha = \beta$. Tuttavia nella pratica si sa che $\alpha > \beta$. Non riusciamo quindi a trovare una coppia di valori a e v_f che ci forniscono un punto ottimo. Ci dobbiamo limitare a stringere i possibili valori ottimali in una zona ricorrendo alla rappresentazione logaritmica.



La procedura analitica indica che la condizione migliore di lavorazione si ha al crescere dell'avanzamento e al diminuire della velocità di taglio.

Nel caso di presenza di vincoli (esp. reale) si individua una condizione di ottimo sulla frontiera della zona delle soluzioni ammissibili corrispondenti all'avanzamento massimo.

La zona delle soluzioni ammissibili è definita in base a vincoli presenti su velocità e avanzamento. Essi possono essere ortogonali se dipendono da un solo parametro o obliqui se dipendono da K_1 e K_2 (es. Potenza al mandrino).



Diagrammando le curve isocosto o isocrono si notano subito che, decrescenti all'aumentare di a e al diminuire di v .

Conviene sempre cercare la condizione di ottimo sulla curva, la cui tangente si trova in corrispondenza del massimo avanzamento consentito.

Se il punto di tangenza è escluso da altri vincoli si cerca l'intersezione tra il massimo avanzamento e il vincolo considerato.

CONTROLLO NUMERICO

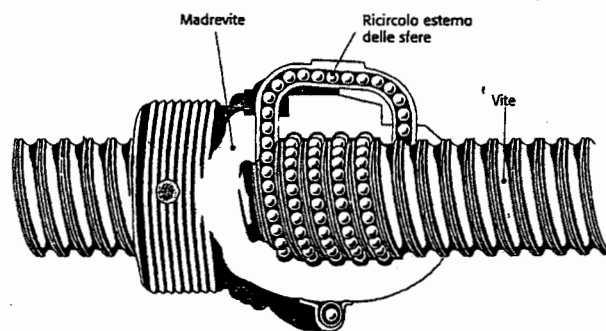
Per automazione si intendono i metodi finalizzati alla riduzione (o eliminazione) dell'intervento umano nella lavorazione, integrando varie tipologie di lavorazione su un'unica macchina (centro di lavoro) e richiedendo gli spostamenti del pezzo tra le macchine in questo modo si riducono tempi parivi, costi ed errori tramite intervento tra pezzo e tavola porta pezzi (pallet) e si aumenta la flessibilità delle macchine tramite magazzini utensile molto attrezzati.

Le varie lavorazioni possono essere impostate e modificate tramite stesura di un **part program** scritto in un linguaggio standard ISO 6983 comprensibile alla macchina, mentre prima l'automazione era rigida (movimenti meccanici dovevano essere progettati ad ogni modifica e il percorso utensile era imposto tramite lo sezionamento di un traliccio) ora la flessibilità è dovuta alla tecnologia del controllo numerico. Per **controllo numerico** si intendono le tecniche finalizzate al comando e controllo di macchine mediante un calcolatore. Lo sviluppo del CN passa attraverso 5 fasi:

- **Macchina tradizionale**: intera lavorazione controllata dall'operatore
- **Macchina a comando numerico**: interpretiamo il part program ma non c'è un controllo per il corretto svolgimento delle azioni comandate
- **Macchine utensili a controllo numerico**: garantisce il controllo tramite l'impiego di sensori e trasduttori, il controllo può essere puntuale, in rapido o continuo, la eventuale correzione può essere a obiettivo (riallineo della traiettoria per arrivare al punto finale) o a traiettoria (si riparte sulla traiettoria già calcolata il più brevemente possibile)
- **Macchine utensili a controllo numerico computerizzato**: è una macchina utensile a controllo numerico gestita da un calcolatore, per cui c'è una migliore gestione degli utensili, attenzione alla loro usura, e sono macchine **multiscopo** (integrano diverse tipologie di lavorazione sulla stessa macchina)
- **Macchine a controllo numerico diretto**: qui l'intero reparto di produzione è formato da macchine e automatizzato e gestito da un unico server centrale, che organizza la lavorazione in base alla disponibilità, garantisce massima flessibilità e qualità di lavorazione. Richiede la formazione di un uomo specializzato → il programmatore.

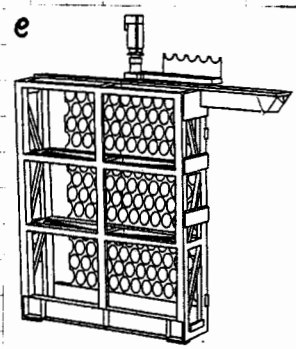
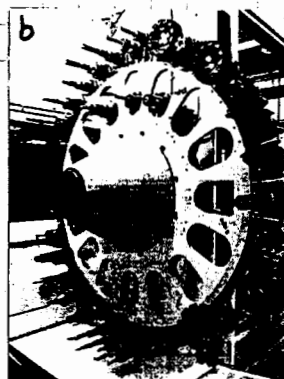
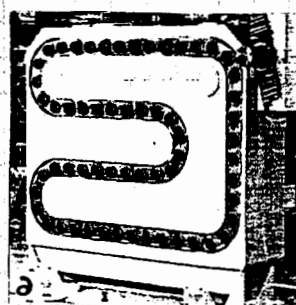
I materiali generalmente impiegati per la costruzione di queste macchine sono ghise e acciai. Si punta sempre a massimizzare le caratteristiche di rigidità statica e dinamica riducendo le deformazioni elastiche dovute a forze di taglio e aumentando lo smorzamento delle vibrazioni, cercando specialmente di evitare il fenomeno dello stick-slip, cioè il movimento a scatti a basse velocità. La ghisa viene usata per le strutture fisse perché ha alti valori di rigidità e ottime caratteristiche di smorzamento interno (nelle strutture cristalline ci sono lamelle o fiocchi di grafite). L'acciaio viene impiegato per le strutture soldate e soprattutto per le guide (responsabili della precisione degli spostamenti), l'acciaio non garantisce smorzamenti, per questo si rivestono le guide con materiali plastici, o si utilizza un sostentamento idrostatico (l'olio mantiene separati i due organi in movimento relativo), oppure si utilizzano sfere per trasformare l'attrito da radente a rotolante.

Un aspetto interessante delle macchine a EN è l'utilizzo di rulli a circolazione di sfere, che generano il movimento rettilineo di ogni asse con elevato rendimento, eliminazione del fenomeno di attrito, giochi ridotti anche se il costo è elevato e si pone il problema della reversibilità del moto.



La notevole flessibilità della macchina a EN è data dalla sua programmabilità nonché dall'elevato numero di utensili in magazzino. Il magazzino può essere di 3 tipi:

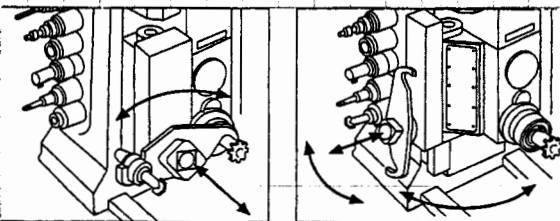
- A carena (a)
- A tamburo (b)
- A rastrelliera (c)



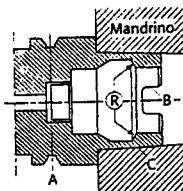
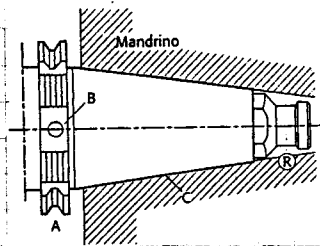
Caratteristiche fondamentali di un buon magazzino sono:

- 1) la capacità, cioè il numero massimo di utensili presenti contemporaneamente
- 2) la modularità, cioè la possibilità di espandere il magazzino
- 3) il tipo di movimento per la ricerca utensile (unidirezionale o bidirezionale)
- 4) la possibilità di gestire gli alloggi utensile in maniera random
- 5) la riproposta del dispositivo di cambio utensile (che deve consentire la sostituzione dell'utensile nel più breve tempo possibile)

Tutti i movimenti riguardanti il cambio utensile non devono indurre vibrazioni significative della macchina e possono essere effettuati direttamente dal mandrino. In alternativa si sfruttano un braccio scambiatore, dotato di varie pinze e griglie di lavoro, che preleva l'utensile successivo durante la lavorazione ed opera il cambio utensile prontamente quando richiesto.



La necessità di effettuare svariate cambi utensile impone l'utilizzo di una interfaccia standardizzata tra utensile e mandrino, il **portautensile**, esso può essere ISO (a) o HSK (b)



Entrambe le soluzioni hanno due parti ben distinte separate da una flangia [A] scanalata. Essa ha una scanalatura assiale per il centro di trascinamento che trasmette la coppia del mandrino all'utensile, e una scanalatura circolare per la pinza del braccio scambiatore.

Il portautensile ISO presenta una parte frustoconica piena e termina con un collo a fungo (per l'afferraggio e bloccaggio nel mandrino). Qui, il riferimento del porta utensile, cioè la definizione della sua posizione all'interno del mandrino è ottenuta in direzione sia assiale che radiale mediante battuta della superficie frustoconica sulle superficie interne del mandrino.

Il portautensile HSK presenta un corpo cavo nel cui interno agisce il dispositivo di ritenzione o bloccaggio. Il riferimento radiale è dato dal contatto della superficie frustoconica con quella interna del mandrino, mentre il riferimento assiale è dato dalla battuta tra la superficie piena della flangia e quella piena esterna del mandrino. Ad alte velocità è preferibile l'HSK, perché la cavità interna permette di seguire meglio l'espansione del mandrino in caso di deformazione elastica e il riferimento assiale è sempre assicurato.

Prima di montare un utensile nel magazzino serve misurare le quote D e L ed altri **correttori**, che rappresentano le caratteristiche geometriche di rilievo dell'utensile e permettono di riportare i punti controllati dalla macchina ai punti in cui avviene la lavorazione, inoltre consentono di disporre della funzione di compensazione utensile (avvicinamento automatico dell'utensile al pezzo di lavoro da parte della macchina). La misurazione e/o regolazione dei correttori si chiama **presetting** e avviene nella **tool room**.

Di solito i correttori vengono immessi sul portautensile che individua le informazioni tramite una codifica a barre o un chip magnetico, di solito, associato al comando di richiamo utensile (comando T) vengono immesse 3 informazioni, ovvero il numero del magazzino (se ce ne è più di uno), l'utensile o la stazione di prelavoro, la locazione in memoria dei correttori.

La definizione e/o la sua selezione può essere effettuata in 3 modi:

- A stazione codificata (si definisce la stazione di prelavoro dove deve stare l'utensile)
- A utensile codificato (l'utensile ha un numero di serie per cui la macchina lo cerca finché non lo trova)
- A utensile programmato (il numero dell'utensile viene convertito nel numero della stazione in cui esso si trova tramite una tabella)

Il sistema di controllo degli assi si basa su **trasduttori** e **segnali**.

I trasduttori trasformano la grandezza di interesse (spazio, velocità, accelerazione ecc) in segnali elettrici inviati alla macchina, in analogico se il segnale elettrico ha una variazione continua, o in digitale se le variazioni sono discrete (impulsi).

Il controllo della velocità è affidato a un trasduttore formato da una dinamo tachimetrica, realizzata con materiali ferromagnetici, che genera un segnale proporzionale alla velocità di rotazione dell'axe su cui è collegata.

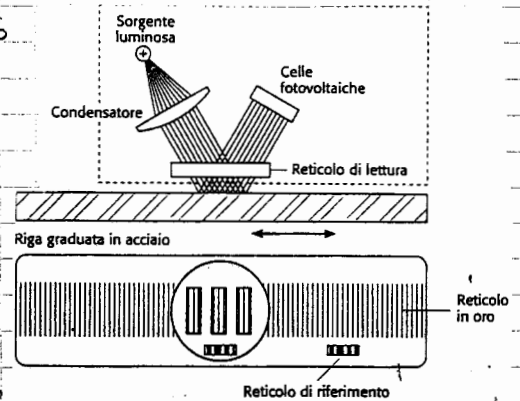
Il trasduttore di posizione è diretto se misura direttamente lo spostamento della tavola; è invece indiretto se misura l'angolo di rotazione delle v.le di comando della tavola. Ci sono vari tipi di trasduttori.

- **Potenzimetro**: è un filo conduttore di sezione costante S_0 e lunghezza L_0 alle cui estremità viene imposta una tensione V_0 . Un cursore mobile, collegato a un millivoltmetro che misura la tensione V è collegato all'organo mobile, in questo modo, sfruttando la legge di Ohm si ricava la lunghezza L

$$V:RI \quad R = \rho \frac{L}{S_0} \quad V/V_0 = L/L_0 \quad L = V \cdot L_0 / V_0 \quad \text{errore del 5\%}$$

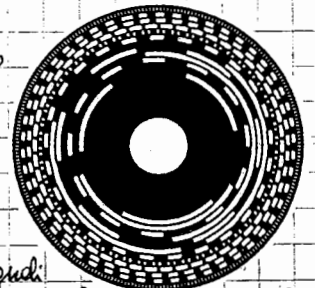
Per diminuire l'errore si utilizzano fili conduttori con avvolgimenti a gree per aumentare la lunghezza del conduttore a parità di lunghezza dell'asse.

- **Righe ottiche** formate da un regolo in acciaio fissato lungo l'asse da controllare sul quale è fotoreso un reticolo in oro che alterna bande opache e bande riflettenti. Un reticolo di lettura con le stesse bande, ma su retro contrastose insieme alla sorgente luminosa + condensatore e il gruppo di celle fotovoltaiche, la parte mobile. La luce emessa dalla sorgente, radizzata dal condensatore batte sul reticolo e viene riflessa fino ad arrivare alle celle fotovoltaiche tramite il reticolo di lettura e viene convertita in segnale sinusoidale e quindi in un'onda quadra (cioè a impulsi). Per conoscere il vero dello spostamento si deve combinare l'informazione di 2 segnali ottenuti dai gruppi di celle sfasate di un numero intero di passi più un quarto. Questo trasduttore può essere assoluto o incrementale, generalmente è incrementale (si deve impostare sempre la zero pezzo all'avvio), può essere assoluto con un reticolo di riferimento.



- **Inductosyn** è un trasduttore diretto formato da una scala fissa lungo l'asse da controllare su cui vi è un filo di rame avvolto a gree, e uno slider sull'organo mobile su cui ci sono due circuiti simili a quelli della scala distanziati fra loro di $1/4$ di passo (per capire il vero dello spostamento). Durante il movimento relativo fra scala e slider, si raccoglie sulla scala una tensione alternata indotta che permette di risalire allo spostamento relativo. Essi sono analogico e assoluto e cioè, ma incrementale per numero di cicli, per cui essi richiede, all'accensione, l'azzeramento degli assi.

- **Encoder rotativo** è molto simile a quello a righe ottiche, è un disco dotato di fori che ruota tra un led e un fotodiodo e, invece di usare il fenomeno della riflessione, sfrutta quello della trasmissione della luce. Il segnale corrisponde a un'onda quadra ove a ogni impulso corrisponde un passaggio in una foratura. È un tipo indiretto e può essere incrementale (solo forature tutte uguali sulla circonferenza più grande) o assoluto (con ulteriori forature presenti su circonferenze più interne e concentriche).



- **Resolver** è costituito da un sistema rotore-statore collegato sull'asse per rilevare una misura angolare; infatti rotore e statore hanno avvolgimenti con accoppiamento variabile in funzione della posizione angolare per cui incrementando un elemento si ricava una tensione variabile sull'altro e si risale velocemente all'angolo.

L'unità di governo è l'organo centrale della macchina e ha una struttura basata generalmente su 3 schede:

- scheda microprocessore: gestisce interfaccia, memoria e comunicazioni;
- scheda master: unità di calcolo, interpolazione e controllo degli assi;
- scheda input/output

Essa esegue programmi, li prova in aria, permette l'editing o caricamento dei programmi durante la lavorazione, compensa eventuali errori ecc ecc.

La programmazione delle macchine utensili (sketch part program) può essere effettuata:

- tramite programmazione manuale ove l'operatore scrive manualmente il part program
- tramite programmazione interattiva o conversazionale ove il part program è ricavato dalla macchina attraverso indicazioni fornite dall'utente con codici
- tramite programmazione automatica basata su codici APT o software CAD/CAM
Il codice APT è universale e si basa su istruzioni facilmente comprensibili dall'operatore; questo codice viene utilizzato per creare un file CL (center location) che contiene dati relativi alle caratteristiche dell'utensile. Il CL-file viene poi elaborato dal post processor che lo rende intelligibile al tipo di macchina usata. I software CAD/CAM permettono di generare part-program tramite modelli 3D del pezzo lavorato e del pezzo e informazioni base dell'operatore.

Le informazioni tipiche del part program sono di 3 tipi:

- informazioni sulla traiettoria degli utensili e sulle modalità di movimento
- informazioni su parametri tecnologici (velocità di taglio, avanzamento, ecc)
- informazioni ausiliarie necessarie alla lavorazione (selezione utensili, fluidi di lavoro, ecc)

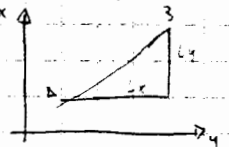
Ogni riga del part program si chiama blocco di istruzioni, ogni istruzione prevede un carattere alfabetic di indirizzo seguito da un valore numerico. Alcune istruzioni sono di tipo modale, cioè rimangono finché non vengono annullate o sostituite.

Le istruzioni secondo la norma ISO sono:

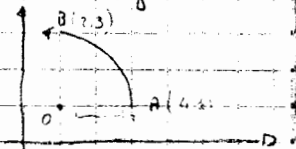
- tipo N: assegna un numero progressivo e identificativo al singolo blocco
- tipo G: funzioni preparatorie, riguardano le varie modalità operative
- tipo S o F: la prima indica la velocità di taglio, la seconda l'avanzamento
- istruzioni dimensionali: definiscono il percorso, sono i nomi degli assi X, Y, Z, A, B
Nel caso di interpolazione circolare si usano anche gli assi I, J, K
- tipo T: indica la scelta utensile e di solito è seguito da 3 gruppi di dati, il primo indica il numero di magazzino, il secondo l'utensile o la stazione di pulizia, il terzo la locazione in memoria dei correttori
- tipo M: permettono l'esecuzione di operazioni varie da parte della macchina queste istruzioni possono anche essere personalizzate

Gli spostamenti possono essere comandati specificando la velocità tramite la funzione F, oppure possono essere spostamenti in rapido tramite G00 (il punto finale può essere descritto in termini assoluti G90 o in termini incrementali G91).

Gli spostamenti in rapido non hanno alcun controllo di traiettoria e vengono effettuati alla massima velocità (FPPPP), per questo conviene scomporre la traiettoria prima in una salita dal pezzo su un piano di sicurezza e poi puntando alla massima velocità verso il punto di arrivo senza alcuna scomposizione. Gli spostamenti con interpolazione sono codificati da G01 (interpolazione lineare), G02 (interpolazione circolare oraria), G03 (interpolazione circolare antioraria). I movimenti di interpolazione prevedono il calcolo dei punti di controllo intermedio e la scomposizione delle velocità lungo gli assi controllati. La scomposizione delle velocità è definita sempre dall'avanzamento $[mm/rev]$ o dalla velocità di avanzamento $[mm/min]$. Dati gli assi X e Y, la scheda master genera questi calcoli per il rilevamento delle velocità V_x e V_y :

$$V_x = V \cdot \frac{L_x}{L} = \frac{V L_x}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad V_y = \frac{V L_y}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$


Per quanto riguarda l'interpolazione circolare il verso viene stabilito guardando dall'alto il pezzo e oltre alle istruzioni G02 o G03, si sfruttano le coordinate ausiliarie I, J, K (che "sostituiscono" gli assi X, Y, Z), che esprimono in maniera incrementale lo spostamento preso dal punto di partenza al centro della circonferenza. Generalmente l'istruzione è seguita dalle coordinate del punto di arrivo B e degli assi ausiliari che riportano in maniera incrementale la posizione del centro della circonferenza vista dal punto iniziale A. In alternativa agli assi ausiliari si può usare direttamente il raggio della circonferenza tramite il comando ausiliario R.



Il comando G04 comanda la sosta dell'utensile in una data posizione per effettuare completamente la lavorazione in essere, G33 serve per movimenti di filettatura.

La macchina utensile CV non è in grado di realizzare tratti perfettamente circolari, ma approssima gli archi di circonferenza a poligoni inseriti, circoscritti o sovrapposti all'arco ideale con un errore pari alla tolleranza interna, esterna o totale della macchina.

Nel caso di tolleranza interna, la condizione limite è data da una poligonale con i vertici sull'arco ideale e tangente a una circonferenza concentrica a quella ideale di raggio pari a $R - t_i$ definito θ l'angolo al centro di ogni singolo tratto.

$$R \cos \frac{\theta}{2} = R - t_i \quad \theta = 2 \arccos \frac{R - t_i}{R} \quad m = \text{INT. SUP} \left(\frac{\theta_{tot}}{\theta} \right)$$

dove θ_{tot} è l'intero angolo settore, m è il numero di segmenti della poligonale. Possiamo quindi ricavare l'angolo θ^* corretto, definito come $\theta^* = \theta_{tot}/m$.

Ragionamenti analoghi vengono seguiti nel caso di tolleranze esterne, in cui la poligonale sarà circoscritta al tratto ideale e inserita in una circonferenza concentrica di raggio $R + t_e$, o in caso di tolleranze totali, in cui la poligonale sarà circoscritta a una circonferenza di raggio $R + t_t/2$ e inserita nella concentrica di raggio $R + t_t/2$.

Generalmente il significato del numero che segue le istruzioni S o F è specificato tramite le istruzioni G94 ($V_a \text{ mm/min}$), G95 ($a \text{ mm/rev}$), G96 ($V_t \text{ mm/min}$), G97 ($m \text{ g/min}$). Di solito in fresatura si utilizzano G94 e G97, in tornitura G95, G96. In tornitura inoltre si imposta anche un regime massimo di rotazione del mandrino, per salvaguardare la lavorazione.

Le funzioni da G53 a G59 consentono la definizione e il richiamo delle origini (zero pezzo) e la loro memorizzazione deve essere fatta prima di mandare in esecuzione il part program. Le istruzioni G81, G82 ecc. attivano i cicli fissi di foratura e vengono disattivate tramite G80. Essi sono delle macro e necessitano delle coordinate del foro (X, Y), la quota finale (Z) di lavorazione, l'eventuale quota (R) di risalita e la velocità di avanzamento (F). Nei blocchi successivi si possono ripetere unicamente le coordinate dei fori.

Il part program inizia con un simbolo di percentuale % seguito dalle specifiche del pezzo in lavorazione; a seguire viene sempre imposto il blocco di sicurezza con istruzioni base come G90 G40 G80 G53 G17 G71 G94 G87.

Infine il comando G41 attiva la compensazione utensile, attraverso cui la macchina, conoscendo i correttori dei vari utensili, ricrea in automatico il profilo incrementale lungo il quale si muoverà lo zero utensile così che l'utensile si apposta al pezzo automaticamente e il punto di tangenza diventa il punto su cui noi operiamo senza dover ricorrere alla geometria dell'utensile. G41 attiva la compensazione utensile a sinistra, G42 quella a destra. Per destra o sinistra si intende sempre la posizione dell'utensile rispetto al pezzo in relazione alla direzione e al verso di spostamento dell'utensile stesso. G40 disattiva la compensazione utensile.

SALDATURE

Si definisce **saldatura** l'operazione per unire permanentemente due elementi solidamente dello stesso materiale.

Le saldature possono essere **AUTOGENE** (a gas, ad arco elettrico, al plasma, laser, per pressione e resistenza elettrica, per attrito) oppure **ETEROGENEE** (saldobrasatura, brasatura forte dolce, deep-brazing, ad ondeggiamento).

Le **saldature autogene** si ottengono per fusione dei lembi del giunto, che dà luogo al cordone di saldatura - si può utilizzare (non necessariamente) un metallo esterno al giunto, il metallo d'apporto, che deve essere metallurgicamente simile a quello da saldare.

Le **saldature eterogenee** sono quelle in cui i lembi del giunto (cioè gli elementi da saldare) non fondono, ma fonde il materiale d'apporto (sempre presente), che ha temperatura di fusione più bassa di quella dei materiali da saldare.

L'operazione di saldatura, rispetto alla posizione dell'operatore, può essere eseguita **in piano** (gli element. da saldare sono su un piano orizzontale), **verticale** (gli element. da saldare sono su di un piano verticale rispetto all'operatore), **frontale** (verticale, ma ruotata di 90°), **sopra testa** (gli element. da saldare sono sopra la testa dell'operatore).

Il giunto, cioè l'elemento già saldato, può essere di vari tipi:

• giunto di testa



• giunto a T



• giunto a spigolo



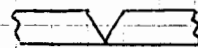
• giunto a T



Per eseguire una corretta saldatura occorre prima pulire bene i lembi da saldare per via chimica o acqua calda, asportare tramite spazzatura meccanica eventuale ossido formato (non fare con il materiale fuso e ridurre l'effetto saldato), eseguire eventualmente la **cianfratura**, cioè un'asportazione di materiale sui lembi per facilitare la penetrazione della saldatura. Essa non è sempre presente, infatti si deve ragionare sullo spessore (nella saldatura il cordone deve interferire tutto lo spessore).

• Per spessori fino a 3 mm non c'è bisogno di cianfratura

• Per spessori tra 3 mm e 6 mm, la cianfratura deve preparare un punto a forma di V



• Per spessori tra 6 mm e 16 mm, la cianfratura deve preparare un punto a forma di doppia V



• Per spessori oltre i 16 mm la cianfratura deve preparare un giunto a forma di U



I criteri seguenti per la preparazione di una saldatura valgono sia per saldatura autogene che eterogenea

Così come per la spoltazione di truciolo, anche qui si parla di passare di saldatura, e generalmente per spessori piccoli si può ricorrere anche a una sola passata. All'aumentare dello spessore aumenta il numero delle passate ed anche la quantità di metallo d'apporto necessaria alla lavorazione



La penetrazione di saldatura indica di quanto la saldatura riesce ad affondare nel materiale (ove si considera nella singola passata)

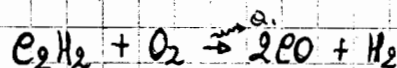
Il rendimento di saldatura tiene conto dell'eventuale consumo ozio del mezzo per saldare e della velocità con cui si esegue la passata (in m/min)

Il metallo d'apporto è una lega (di solito di rame) e, nelle saldature autogene conviene sia metallurgicamente simile (stesso punto di fusione) ai lenti da saldare, in quelle eterogenee conviene invece che abbia un punto di fusione più basso dei lenti.

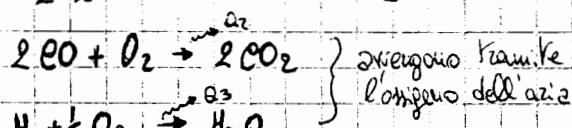
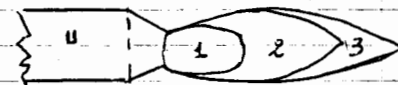
Saldatura autogene

• Saldatura a gas (ossiacetilenica)

sfrutta il combustibile acetilene e il comburente ossigeno in miscela stechiometrica. È una reazione esotermica con sviluppo di fiamma e calore fino a una temperatura di 3100° della fiamma. La miscelazione avviene con il cannello.

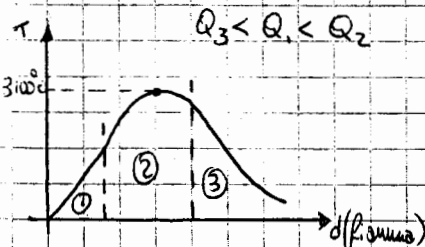


L'uscita del cannello (1)
si chiama **ugello**



} sviluppo fiamme
l'ossigeno dell'aria

La fiamma (1) bianca si chiama **DARDO**, la zona (2) è la **zona riducente** (o di saldatura), qui avviene la 2ª e 3ª reazione, mentre la zona (3) è il **foco** (formato da CO_2 e H_2O)



La saldatura deve avvenire subito dopo la zona riducente e prima del fuoco, ovvero lì dove si raggiunge la temperatura più alta

$$Q_1 \approx 106 \text{ Kcal} \quad Q_2 \approx 137 \text{ Kcal} \quad Q_3 \approx 58 \text{ Kcal}$$

Nell'eseguire una saldatura si deve fare in modo che non ci siano tracce di ossigeno sui materiali da saldare per evitare la formazione di ossidi, per questo la saldatura avviene nella zona riducente, perché lì la reazione assorbe tutto l'ossigeno e contemporaneamente sviluppa il massimo calore alla massima temperatura.

All'atto pratico per regolare la fiamma si apre prima la valvola dell'acetilene (che reagisce con l'ossigeno dell'aria), poi si apre quella dell'ossigeno e si regola la portata per avere una fiamma quasi invisibile oltre al dardo. Se c'è troppo ossigeno la fiamma è blu, se c'è troppo acetilene la fiamma è gialla e il fuoco nero (residui carboniosi).

Troppo acetilene causa perdita di potenza, troppo ossigeno causa la non formazione della zona riducente con la presenza di ossigeno in eccesso.

Il cannello è collegato a una bombola di ossigeno liquido a pressione 2 MPa e a una di acetilene a pressione 1,5 MPa. La bombola di ossigeno si ottiene per imbutitura o con l'ossimartina Hammermann per non avere saldature lungo le generatrici, e la sua parte superiore (ogiva) è bianca, la bombola di acetilene ha l'ogiva grigia ed è riempita da un materiale poroso insieme all'acetilene perché esso è instabile soprattutto se gas, con il materiale poroso le sacche eventuali di gas si distribuiscono uniformemente, per l'acetilene si usa un rubinetto di acciaio (più o meno un lubrificante) mentre per l'ossigeno si usa un rubinetto di rame di elevata precisione.

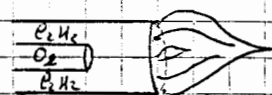
Nei tubi molto è sono delle valvole che garantiscono l'unidirezionalità del getto ed evitano i "ritorni di fiamma".

Il cannello può essere di due tipi: ad alta o a bassa pressione.

- Il cannello ad alta pressione sfrutta l'effetto venturi, infatti il fluido incontrando un restringimento aumenta la sua velocità ma diminuisce la sua pressione, in particolare l'ossigeno incontrando un restringimento subisce una depressione che risucchia l'acetilene (per questo basta regolare l'ossigeno per regolare anche l'acetilene).

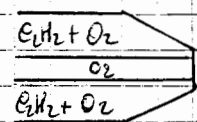


- Il cannello a bassa pressione prevede che i due gas abbiano la stessa pressione, che può essere regolata tramite le rispettive valvole (di solito si regola l'ossigeno).



Questo tipo di saldatura ha basso rendimento, bassa penetrazione di saldatura, alta economicità e trasportabilità. È una saldatura manuale e viene spesso utilizzata per saldature eterogenee perché può essere pilotata, viene anche usata per il taglio.

Il taglio con questa fiamma non avviene per fusione ma per ossidazione, e si usa un cannello in cui la fiamma in uscita è in eccesso di ossigeno, in quanto già nel tubo esterno è presente la miscela. Trovandosi a temperature elevate ma non di fusione si ha ossidazione di O del tubo centrale sul materiale e questa polvere di ossido viene espulsa dalla zona di taglio dall'ossigeno stesso. In questo modo si possono tagliare i materiali che hanno le caratteristiche:



- la temperatura di fusione dell'ossido è minore di quella del materiale da tagliare
- l'ossidazione deve essere esotermica e si legge altro esote
- il metallo deve reagire con l'ossigeno per formare ossidi

Si possono quindi tagliare materiali come acciaio e carbonio.

Si può inoltre mettere della polvere di ferro insieme all'ossigeno, che a contatto con la fiamma si ossida e funge da materiale abrasivo seggiato ad alta velocità così si possono tagliare anche i materiali antiossidanti e il tutto può essere computerizzato.

La fiamma è divergente per cui anche il taglio e le pareti tagliate sono sempre più divergenti all'aumentare dello spessore. C'è scarsa precisione ed alta rugosità superficiale.

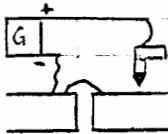
Il taglio può essere fatto per spessori max di 30 mm a una velocità di $0,1 \text{ m/h}$ oppure max 55 mm con velocità di $0,3 \text{ m/h}$ se computerizzato.

In alternativa con la polvere di ferro al posto di O si può usare anche aria compressa.

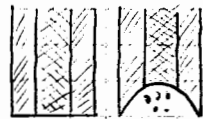
• Saldatura ad arco elettrico convenzionale

consente di avere generazione di calore tramite passaggio di corrente. E' un generatore dove il polo negativo è collegato agli elementi da saldare, mentre il positivo è collegato a una pinza in cui viene bloccato l'elettrodo, costituito da un'anima di metallo d'apporto rivestito da alcuni sali. E' una saldatura manuale.

L'operatore fa toccare l'elettrodo con il pezzo, passa la corrente di cortocircuito che per effetto Joule riscalda sia il materiale che l'estremità dell'elettrodo fino a 7000°C . Il gas circostante si ionizza per l'elevata temperatura e diventa plasma, un ottimo conduttore elettrico, per cui pur staccando l'elettrodo dal pezzo, rimane il plasma la corrente continua a circolare e si ha l'arco elettrico (visibile per il passaggio di elettroni). La temperatura rimane elevata per effetto Joule e per l'urto degli elettroni sul pezzo.



La saldatura è avvegnuta quando il materiale d'apporto (anima dell'elettrodo) è metallurgicamente simile a quello da saldare; per avere il punto, l'anima fusa si deve depositare tra i lembi da saldare (ormai a fusione). Le gocce di anima fusa vengono indirizzate dal rivestimento (che ha temperatura di fusione più alta del metallo d'apporto); il rivestimento, fondendo, diventa in parte liquido e in parte gas inerte, che allontana l'aria dall'arco evitando fenomeni di ossidazione e stabilizza l'arco stesso.



Un possibile problema è infatti il fenomeno del soffio magnetico, in quanto campi elettrici circostanti deviano l'arco elettrico (che si spegna), e, se aumenta la distanza tra due punti del punto, aumenta la resistenza e l'arco potrebbe spegnersi, tuttavia il gas riesce a stabilizzare il campo magnetico e l'operatore deve cercare di tenere l'elettrodo sempre alla stessa distanza (tenendo anche conto del fatto che l'elettrodo si consuma). La parte liquida del rivestimento si mescola invece con il metallo fuso, ma avendo un peso specifico più alto, tende a galleggiare sul metallo fuso. Questo strato di sali che si solidifica in superficie va eliminato (con l'umidità acidifica e rovina la saldatura), tuttavia durante la lavorazione è utile perché i sali solidificando vetrificano, sono ottimi isolanti termici, rallentano il raffreddamento del punto ed evitano fenomeni di tempra (shock termici). Ovviamente passato l'arco, l'aria circola sul punto e sali continuano a proteggerlo. La saldatura ha 3 modalità di esecuzione:

• Alimentazione in corrente continua in modalità diretta: si ha collegando il polo negativo all'elettrodo e quello positivo al pezzo. Lo sviluppo di calore è per il 70% sul pezzo e per il 30% sull'elettrodo. Ha elevato rendimento e all'ssima profondità di penetrazione, ma non si usa per piccoli spessori per il rischio di vagli o fori.

• Alimentazione in corrente continua in modalità inversa: si ha collegando il polo negativo al pezzo e quello positivo all'elettrodo, lo sviluppo di calore è per il 70% sull'elettrodo e per il 30% sul pezzo. Si usa per piccoli spessori (maggiore precisione), senza rischiare che i lembi fusi si allontanino via loro. Sul pezzo vanno gli ioni positivi (più pesanti) che vanno quasi a rompere l'ossido superficiale e ciò è utile per materiali con veloce formazione di ossido come l'alluminio.

• Alimentazione in corrente alternata: si usa quando si vuole risparmiare sull'attrezzatura, i pregi e i difetti sono una media tra le due precedenti. Si possono saldare tutti gli acciai (inossidabili), e i materiali con punto di fusione non altissimo, ma non va bene per spessori sottilissimi.

Mentre nella macchina a corrente continua c'è un trasformatore e un raddrizzatore (con diodi) per quella a corrente alternata si usa un trasformatore per abbassare la tensione ma mantenere corrente elevata (per questioni di sicurezza e per le stesse questioni non si utilizza l'autotrasformatore). Il rendimento è maggiore rispetto all'utilizzo della fiamma ossiacetilica e l'unico fastidio è solo quello di dover eliminare i sali solidi restanti in superficie.

Il grafico in figura è la caratteristica elettrica della macchina e mostra che per piccole variazioni di distanza tra elettrodo e pezzo la corrente non varia significativamente e l'arco non si spegne. Per grandi variazioni di distanza, la variazione di corrente è notevole e l'arco si spezza.

Gli elettrodi si distinguono in base al tipo di rivestimento.

- **OSSIDANTI** sono i più economici, non idroscopici (non assorbono umidità), ma hanno basso rendimento e bassa profondità di penetrazione; usati per saldatura di non altissimo pregio.
- **ACIDI** sono sali acidi ($\text{pH} < 7$), non idroscopici, miglior rendimento e profondità di penetrazione.
- **BASICI** sono sali basici ($\text{pH} > 7$), sono idroscopici, generano un cordone di saldatura più regolare. Rendimento e profondità migliore rispetto agli acidi.
- **CELLULOSICI** hanno il 30% di cellulosa, sono eosici e utili per saldatura verticale o sopra testa perché danno scorie molto viscose e a densità elevata. Rendimento e profondità molto elevati.

Il rendimento è generalmente dato dal rapporto tra volume di anima fusa e volume di anima che raggiunge il punto. Elevata profondità di penetrazione permette di ridurre la rifinitura e il numero di passate.

• Saldatura TIG [Tungsten inert gas]

È una saldatura ad arco ottenuta tramite elettrodo infusibile di tungsteno [W]. L'estremità dell'attrezzatura è costituita da una pistola su cui sono collocati polo positivo e polo negativo, tubo di andata e ritorno di un recipiente d'acqua, e uno che trasporta gas inerte. L'elettrodo di tungsteno è contenuto in un tubo in cui passa gas inerte che uscendo dall'ugello della pistola riempie il giunto, diventa plasma, mantiene l'arco acceso e protegge il giunto dall'ossigeno circostante.

C'è bisogno di un liquido di raffreddamento (l'acqua) per raffreddare la pistola (in quella convenzionale la temperatura era elevatissima con le gocce di metallo fuso). Oltre alla pistola l'operatore può utilizzare il metallo d'apporto (spessore $> 2 \text{ mm}$) che, se automatico, prende il nome di spago/uno filo avvolto attorno a una bobina. Si usa sempre corrente continua in modalità diretta. L'elettrodo può essere di 3 tipi:

- **Puro**: è il più economico ma ha una maggiore usura per effetto del bombardamento ione. Le perdite di tungsteno possono inquinare il cordone di saldatura formando elementi duri.
- **Lega di tungsteno [tungsteno + 5% torio]**: è una lega più resistente ed ha più lenta usura.
- **Lega di tungsteno e zirconio [0,1% - 0,4%]**: con caratteristiche migliori.

Se come l'elettrodo è infusibile per fare il plasma si manda corrente ad alta frequenza all'estremità dell'elettrodo per generare scintille che riscaldano il gas lo rendono plasma, immessando un arco elettrico senza contatto.

Rispetto all'arco convenzionale, la TIG non usa il soffio magnetico (non ci sono gocce di elettrodo sul pezzo e quindi non ci sono campi magnetici variabili), l'arco è più stabile e serve minore intensità di corrente. Il gas plasmagenerato permette di concentrare l'arco (potenza più elevata) su superfici piane e si possono saldare spessori inferiori al decimo di millimetro per sovrapposizione.

senza usare metallo d'apporto. Il cordone di saldatura è quasi invisibile e meno scabro. Rendimento e profondità di passata sono molto elevati e si può saldare anche l'alluminio (in modalità alternata). Si preferisce l'utilizzo delle modalità inverse per saldatura sopra testa. I gas inerti utilizzabili sono l'argon e l'elio. L'argon è più pesante dell'aria e si deposita sul cordone anche dopo il passaggio della pistola, l'elio invece è più leggero dell'aria ma ha conduttività 10 volte maggiore rispetto all'argon, per cui permette maggiore energia e migliore profondità di passata.

Con l'argon 5 passate con l'elio 2

• Saldatura al plasma

È una variazione della TIG, più economica, usata per spessori maggiori e per cordoni di saldatura quasi invisibili. Essa prevede l'uso di un elettrodo infusibile, con una pistola simile a quella usata nelle TIG, dove però l'elettrodo non esce dalla pistola stessa. Il filo concentrato all'elettrodo trasporta gas plasmagenico (o plasmagel).



Non è l'arco elettrico che fonde il metallo base ma è il plasma che applica il calore necessario, attraverso l'arco elettrico e raggiunge temperature di 20000 °C. Il gas uscendo dall'ugello e trasformandosi in plasma concentra la sua energia in uno spazio molto ristretto. L'è bisogno però di un generatore ad alta frequenza che generi scintille per ionizzare il plasmagel (di solito argon) e renderlo plasma. Si possono avere due tipi di arco:

- **Arco diretto** scocca tra elettrodo interno e giunto da saldare (rispetto alle TIG le correnti ora sono più basse). Si utilizza per materiali conduttori.

- **Arco trasferito** scocca tra elettrodo interno e estremità dell'ugello della pistola per cui il gas plasmagenico che lambisce l'elettrodo ed esce dalla pistola fonde il materiale da saldare. Ovviamente il gas plasmagenico ha sempre la funzione protettiva. Si usa per materiali plastici o isolanti e per il taglio.

ci sono 2 modalità di saldatura:

- **Per fusione**: il plasma fonde i lembi del giunto e viene usato per spessori minori di 8 mm.

- **Metodo Key-hole** consiste nel farare i due elementi da saldare regolando tensione, portata di gas plasmagenico, velocità di avanzamento e portata della forza, il foro viene gradualmente chiuso man mano che la forza avanza durante la passata di saldatura. All'interno di esso il gas genera dei moti vorticosi che non permettono la fuoriuscita del metallo fuso dal foro che nel frattempo solidifica. Grazie alla sua elevata profondità di penetrazione si può utilizzare con materiali difficilmente saldabili e/o con spessori elevati (magari la prima passata viene fatta con Key-hole e le successive con fusione), o anche con spessori inferiori al millimetro.

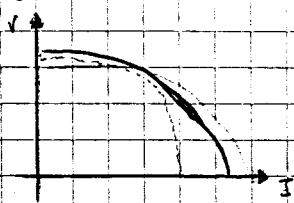
Rendimento e profondità di passata sono molto elevati, il cordone è sottilissimo, l'inquinamento del cordone è simile a quello delle TIG e i materiali saldabili sono gli stessi. In generale conviene usare la saldatura al plasma per le migliori prestazioni che offre.

Variazioni leggermente la forma della pistola si possono anche effettuare tagli al plasma. Il taglio è geometrico le superfici sono poco scabre e si ha un disaccoppiamento parallelo tra i piani di taglio (in ogni caso la colonna di plasma diverge). Il metallo perso per fusione è poco e si utilizza soprattutto con metalli nobili (simili agli inossidabili). Usando aria o ossigeno al posto del plasmagel si possono tagliare metalli meno nobili, preferibilmente di difficile ossidazione (causa ossidazione). In questo caso però si sviluppa meno calore e si riduce la profondità di passata. Il taglio al plasma si ha sempre con arco trasferito. Si può usare il taglio al plasma con getto d'acqua, dove l'acqua sostituisce il gas protettivo, raffredda la zona calda durante l'evaporazione evitando l'ossidazione e, avendo un peso specifico maggiore dell'argon e dell'elio, permette l'aumento della densità di energia del getto. L'acqua non si usa per saldare.

L'alluminio, a causa della patina di alluminio termicamente isolante non può essere fuso per grandi spessori maggiori di 50 mm (si preferisce il taglio ossacetileno).

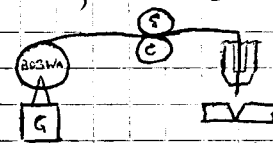
• Saldatura MIG/MAG

A parità di attrezzatura, l'unica cosa che differisce è che nelle MIG si usa come gas elio o argon, nella MAG una miscela di argon (30%) e CO_2 (70%). E' sempre presente una bobina su cui è avvolto del filo che funge da elettrodo e metallo d'apporto, che viene trascinato tramite dei rulli verso il giunto da saldare. Il filo conduce corrente elettrica per far scaldare l'area, esso fuoriesce dalla torcia e si consuma per fusione. Il sistema può essere semi-automatico o completamente automatico a seconda della presenza o meno dell'operatore. Il gas deve essere sempre trasformato in plasma per condurre corrente e il contatto elettrodo-pezzo è necessario per far scorrere corrente di cortocircuito, produrre calore e plasmiificare i gas. Generalmente si lavora in modalità inversa (ed maggior calore sull'elettrodo). Il filo va scelto in funzione del materiale da fondere e se si lavora con metalli a base alluminio si riveste l'anima del filo con una piccola quantità di rame.



La curva caratteristica della macchina per saldatura MIG/MAG è più piatta rispetto a quella ad arco, per cui allontanando di poco l'elettrodo dal pezzo, la variazione di corrente è comunque elevata. Per questo la regolazione della corrente è automatica mentre lo spostamento della torcia è affidato all'operatore.

La macchina fa, in modo da diminuire la velocità di fusione del filo all'aumentare della distanza elettrodo-pezzo; in poche parole se aumenta la distanza c'è meno corrente e la velocità di fusione dell'elettrodo è minore. La tensione adoperata è intorno ai 20-25V, mentre le correnti impiegate hanno alta intensità. Si definisce corrente di transizione la corrente alla cui intensità il metallo d'apporto fonde istantaneamente, per intensità più basse la velocità di fusione è lenta, per intensità più alte la velocità è alta. In ogni caso la velocità di fusione dipende dalla corrente e dalla modalità di saldatura (cioè dal calore che si genera). In questo caso si raggiungono temperature di $6000^{\circ} - 7000^{\circ}C$.



Le modalità di saldatura possono essere di 3 tipi:

• **Short-arc**: si lavora a 20V con una corrente più bassa di quella di transizione. L'elettrodo fonde come una sola grande goccia che prima di staccarsi lambisce il metallo da saldare, passa corrente di cortocircuito e la goccia si stacca. La visibilità del fluido è elevata, si può saldare sopra resta, ma anche spessori sottili.

• **Spray arc**: si lavora a 25V con corrente superiore a quella di transizione. L'elettrodo fonde come tante goccioline che vengono spagliate sul punto senza corrente di cortocircuito. La visibilità è più buona (ma sopra resta) e alta corrente implica alto calore e maggiore profondità di penetrazione non conviene per pezzi spessi.

• **Pulsed-arc**: si lavora a 20-25V (tensione alternata). L'unica goccia che si forma a 20V non riesce a lambire il metallo perché la tensione varia e si forma una sorta di spray di gocce. C'è una visibilità media, quindi abbastanza elevata e si possono saldare elementi di medio spessore.

Si possono saldare tutti i materiali tranne l'alluminio con qualità buona (ma non come quelle della TIG o Plasma). I tempi di saldatura si riducono perché l'elettrodo ha altri tempi di utilizzo e non ci sono scorie da rimuovere.

Mentre la MIG si usa per metalli pregiati, la MAG per metalli non nobili (un po' non inerti e più economici). Per evitare eventuale ossidazione si introducono nel metallo d'apporto materiali alliganti come silicio e manganese che hanno ad alte temperature buona affinità con l'ossigeno e fungono da scudo per la saldatura.

• Saldatura ad arco sommerso

È una saldatura autogena completamente automatica. Presenta una torcia con un ugello dal quale scorre il metallo d'apporto, che funge anche da elettrodo. I culli fanno sì che il metallo d'apporto, avvolto attorno a una bobina, scorra a velocità variabile (prima era costante). C'è sia un generatore di corrente continua in modalità inversa che un motorino per i culli, inoltre c'è un controller che regola la ΔV tra elettrodo e pezzo e varia la velocità di uscita del filo (se ΔV aumenta, I diminuisce, l'elettrodo esce meno velocemente). Non vengono usati gas protettivi e non si controlla la corrente, ma la velocità di scorrimento dell'elettrodo.

La zona in cui scorre l'arco viene protetta da una polvere di sali (gli stessi del rivestimento della saldatura ad arco convenzionale), proveniente da una tramoggia e che cade in prossimità della testa saldata. In questo l'arco viene sommerso dalla polvere di sali, che sprigiona gas plasmagenerici che permettono la conduzione. Siccome l'apporto di polvere è continuo e quindi c'è un eccesso di essa, una parte di essa diventa scoria o gas, mentre la restante parte viene riciclata tramite un opportuno sistema. Il flusso di polvere può essere di 2 tipi.

• **Fuso**: è più economico e si ottiene prima fondendo e poi macinando gli elementi che lo compongono. Non c'è azione chimica sul giunto, solo protezione fisica.

• **Agglomerato**: è più costoso e si ottiene prima macinando e poi mescolando a temperatura ambiente gli elementi che lo compongono. Protezione maggiore.

Questa saldatura ha qualità migliore delle MIG/MAG perché automatizzata e non c'è gas protettivo. C'è una migliore profondità di penetrazione grazie alla notevole intensità elettrica (800 A) ottenibile tramite due spazzole in rame collegate al generatore e molto vicine all'ugello (piccolo percorso della corrente). È usata per grandi spessori e pezzi di grandi dimensioni, tuttavia si può usare solo per saldature in piano e il calore tende a localizzarsi solo nei pezzi del giunto per via della polvere.

Per la lavorazione si utilizza la tecnica **Narrow-gap**, cioè si utilizza una ciambina piccola a superfici parallele anche per elementi di grosso spessore e in questo modo si riduce il numero di passate. Velocità maggiori si ottengono con un sistema multivista per cui le scorie rimangono sempre ferme e tendono a galleggiare (non hanno il tempo di raffreddarsi tra una testa e l'altra).

• Saldatura laser

Produce un'energia talmente elevata da far diventare plasma il metallo. $h \cdot f = E_2 - E_1$. Si lancia un'energia elettromagnetica sotto forma di luce di frequenza f interagendo con i livelli energetici degli atomi (E_2 ed E_1). h è la costante di Planck. La variazione del livello energetico di un atomo può avvenire tramite:

• **Assorbimento**: il fotone interagisce con l'atomo, che lo assorbe e salta a un livello energetico superiore.

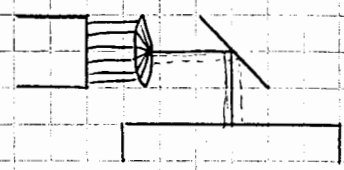
• **Emissione spontanea**: l'atomo emette un fotone per passare a un livello energetico inferiore.

• **Emissione stimolata**: il fotone interagisce con l'atomo, ed esso trasferisce l'energia a un altro fotone (amplificazione della luce), come due boeche che si sommano.

Il laser può essere ottenuto tramite emissione stimolata per cui gli atomi, eccitati dalla luce di frequenza f , eccitano e rilasciano fotoni con la stessa frequenza.

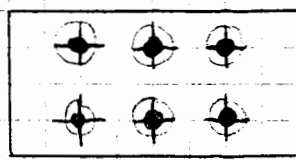
Si utilizza CO_2 miscelato con Azoto ed Elio (aumentano il rendimento della macchina) che viene pompato tramite scorie elettriche ripetute nel tempo. Il gas che attiva il laser si chiama **mezzo attivo**, mentre il pompaggio è l'energia da fornire inizialmente per ottenere il fenomeno. La scoria elettrica fornisce elettroni che eccitano alcuni atomi del CO_2 portandoli dal livello energetico E_1 al livello energetico E_2 . Tra due scorie consecutive c'è un tempo di salto in cui i fotoni che viaggiano

Casualmente nel contenitore eccitano altri atomi del contenitore, che assorbono energia per assorbimento. Questi ultimi atomi eccitati possono emettere fotoni per emissione spontanea o stimolata. I fotoni aumentano quindi sempre di più e tendono ad allinearsi fra loro. Se il recipiente ha una parete trasparente di vetro (impermeabile ai fotoni) e una bucherellata, un fascio monocromatico di fotoni alla stessa frequenza e fase laser. Il recipiente è prenduto la forma di un raggio laser. L'ho e altro aumentano il numero di fotoni in movimento.



Delle lenti all'uscita consentono di concentrare i raggi in un unico punto per aumentare la densità di energia e uno specchio a 45° devia i raggi su una superficie detta SPOT, che può essere di 1mm o di decime di mm di diametro. Esso serve a valutare la concentrazione del raggio laser tramite il parametro TEM_{xy} dove x sono i valori di energia guardando orizzontalmente, mentre y sono i valori di energia guardando verticalmente.

Es. TEM_{22}



Per lavorare con la luce laser consideriamo i fenomeni:

- **Assorbimento**: indica quanta energia del laser incidente assorbe il materiale
- **Riflessione**: indica quanta energia del laser incidente il materiale riflette

A parità di energia e lunghezza d'onda del laser, assorbimento e riflessione variano. La riflessione dipende dalla lunghezza d'onda del laser, per questo per buone lavorazioni ho bisogno di un mezzo attivo con alto assorbimento e basse riflessioni. L'assorbimento si ha se la lunghezza d'onda fra laser e materiale sono uguali e generalmente esso dipende dal colore specifico, dal parametro di conducibilità e dalla densità del materiale, per cui $D = \frac{\lambda}{\pi e}$ dove D = diffusività.

ci sono 3 tipi di laser:

- **laser a CO₂**: riesce a sviluppare potenze di centinaia di Watt a una $\lambda = 10,6 \mu m$
- **laser neodimio-YAG**: è un laser a stato solido eccitato elettronicamente. $\lambda = 1,06 \mu m$ ed è buono per i metalli perché li attraversa ma non viene riflettuto.
- **laser a semiconduttori**: formato da diodi che sfruttano la zona di giunzione fra due semiconduttori per emettere fotoni tramite corrente elettrica.

Il raggio laser può essere utilizzato in 3 modalità:

- **continuo**: potenza della macchina è mantenuta costante e i fotoni vengono emessi costantemente (buono per materiali ad alto assorbimento)
- **pulsato**: il raggio funziona per brevi istanti emettendo un'energia non costante, ma a impulsi (con densità maggiore). Si deve fare attenzione ad avere una distribuzione uniforme del calore sul materiale controllando tempo di emissione, velocità di spostamento e frequenza del raggio laser.

- **a impulsi giganti**: variando il fattore di merito Q della cavità si possono mantenere i fotoni all'interno della cavità stesse, aumentare quindi l'energia e poi rilasciarla in un unico impulso gigante. Il fattore di merito viene regolato regolando la trasparenza della parete semi-riflettente e accumulando energia nel tubo laser.

Anche il tiranio può essere lavorato con il laser e ogni lavorazione NON richiede cianfratura o preparazione dei lembi.

La macchina è costituita dalla sorgente (laser), lenti, specchi e un sistema con del gas inerte che protegge le lenti e gli specchi da spruzzi di metallo liquido e soprattutto allontana i vapori di metallo dalla zona su cui incide il laser (i vapori hanno assorbimento elevatissimo, per fortuna il gas li allontana e previene anche l'ossidazione).

La saldatura laser può avvenire in due modi:

- per fusione: si ottiene con un laser continuo che ha potenze tali da portare a fusione il materiale senza formazione di vapore o plasma; il raggio salda tramite fusione dei due lembi e non serve metallo d'apporto. C'è bisogno di gas inerte per evitare l'ossidazione e allontanare i vapori del metallo (che assorbirebbero tutto il calore del raggio laser).
- per key-hole: si genera un foro in cui si muove rottevolmente il metallo fuso e il plasma generato; il plasma assorbe il 60% del calore mantenendolo nel foro e appena il raggio si sposta avviene rapidamente il raffreddamento e si genera il cordone di saldatura. Usato per grandi spessori, si raggiungono anche velocità di 1 m/m.in. , c'è un alto rendimento e viene usato spesso per materiali difficilmente saldabili (alluminio).

I vantaggi della saldatura laser sono notevoli:

- Non c'è contatto tra zona da saldare e elettrodo (che a Kt. gli effetti non esiste)
- Non serve metallo d'apporto
- Il materiale non subisce shock termici
- Il cordone di saldatura ha dimensioni ridottissime
- La macchina ha notevole flessibilità e il raggio può essere facilmente pilotato
- Si possono saldare tutti i tipi di acciaio, alluminio e lega tra cui il titanio

- taglio laser

Mentre con la fiamma ossiacetilenea si ha buona finitura superficiale e pareti divergenti, il taglio a plasma regola la finitura ma non la divergenza, ora il taglio laser offre il parallelismo delle pareti tagliate (divergenza all'infinito), finitura superficiale ottimale e taglio piccolissimo, con velocità di 1 m/m.in. esso può avvenire per:

- Vaporizzazione: bassa velocità di avanzamento, alta potenza. Il materiale passa da solido a vapore. Si usa per legno o plastica termoisolante.
- Fusione: si riducono sia la velocità che la potenza. Si porta il metallo in fase liquida e viene espulso tramite un gas inerte (che protegge le lenti e allontana il plasma) fuori dal buco creato dal key-hole.
- Ossidazione: Al posto del gas si usa ossigeno che ossidando rapidamente il materiale contribuisce all'apporto di calore (l'ossidazione è esotermica); l'ossido viene poi espulso dall'ampio stesso.
- Frattura: Utilizzato per materiali ceramici (anche vetro) che non hanno struttura cristallina sono soffici e non c'è finitura. Si incide la zona scelta con rapidissimo apporto di calore (elevata energia), che causa dilatazioni interne e quindi tensioni interne così elevate che spaccano il materiale. Sono microfratture ad alta precisione.

- Taglio Water-Jet

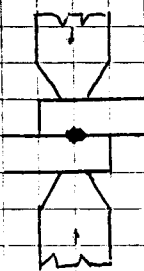
Si usa acqua molto compressa che passa in una camera con polvere abrasiva messa in sospensione da un getto d'aria. L'acqua passa attraverso un ugello in ceramica frangendo il materiale abrasivo che, colpendo il metallo da lavorare, produce microfratture che vengono poi allontanate dall'acqua stessa. Non c'è apporto di calore, alta precisione, bassa velocità (0.33 m/m.in.)

Saldatura per resistenza e pressione

Sfruttano l'effetto Joule per ottenere la fusione localizzata del pezzo. Sono saldabili materiali conduttori e il calore è in funzione di R (resistenza), i (corrente), t (tempo di permanenza della corrente), K (costante del materiale). Sono utilizzabili per prove serie e nell'industria navale, automobilistica, aerospaziale.

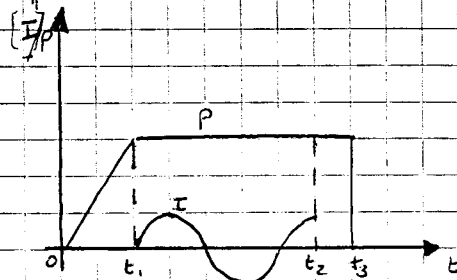
Saldatura per punti

L'attrezzatura si compone di un generatore di corrente alternata e una pinza con 2 elettrodi di rame tra i quali viene serrato il giunto da saldare. Il punto è sempre di piccolo spessore e si ha per sovrapposizione.

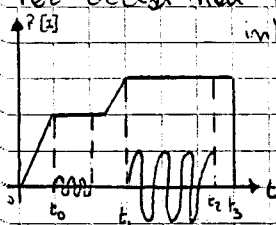


Gli elettrodi hanno una forza di chiusura P applicata durante la saldatura, il ciclo di saldatura consiste in:

- $t=0$ la pinza serra il materiale
- $t=t_1$ scorre corrente (tra i 1000 A e 10000 A) nel pezzo serrato
- $t=t_2$ non c'è più corrente, ma il punto è ancora in presa (solidificazione giunto)
- $t=t_3$ si staccano le pinze



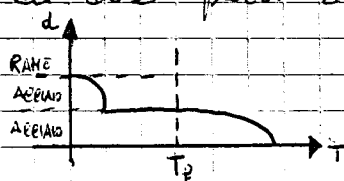
Per pezzi non comuni il ciclo termico è diverso, si ha un pre-saldamento tramite una intensità di corrente più bassa a $t=0$.



La saldatura avviene solo nella zona di giunzione degli elementi da saldare. Il rame non si squaglia (basse resistività) al passaggio di corrente. Il contatto rame-acciaio non è affetto da un altro effetto Joule, in quanto essendo il rame duttile esso tende ad assumere la geometria della superficie dell'acciaio con cui entra in contatto, la sezione è



quindi ampia e per Ohm l'effetto Joule prodotto è basso. Tra acciaio e acciaio invece la geometria dei due blocchi non cambia, per cui ci sono meno punti di contatto, la sezione è più piccola e per Ohm si sviluppa un calore maggiore e si ha fusione localizzata dei due pezzi di acciaio.



Disegnando il grafico distanza (d) - temperatura (T), si nota l'enorme salto tra rame-acciaio e acciaio-acciaio.

Di solito le pinze possono essere anche di tungsteno o molibdeno e i lembi del pezzo da saldare devono essere puliti.

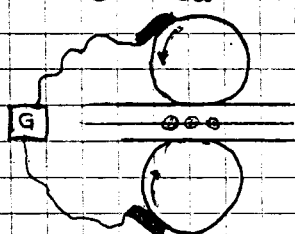
- VANTAGGI:**
- Saldatura rapida (2-3 secondi) e completamente automatizzabile
 - Grandi serie, temperature ottimali, bassi rendimenti di produzione

SVANTAGGI: Resistenza meccanica molto bassa (non è una saldatura continua) e utilizza per serbatoi.

Non c'è metallo d'appoggio ma non si può eliminare la riscaloratura.

Saldatura a Rulli

Più che essere una saldatura per punti, è una saldatura continua. Al posto delle pinze ci sono dei rulli che ruotano in senso opposto con velocità ω costante.



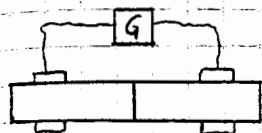
e sono collegati tramite spazzole al generatore di corrente regolando la frequenza degli impulsi mandati ai rulli si può regolare la velocità di rotazione dei rulli e mantenere l'area di contatto sempre attiva (sovrapposendo i punti di saldatura), per avere praticamente una saldatura continua. La frequenza degli impulsi (corrente) del generatore è regolata in base al tempo che impiega un'area di

contatto (punto di saldatura) a lasciare il rullo. I rulli generalmente sono di rame tungsteno o molibdeno. Anche qui si nota la riscaloratura, l'alta resistenza meccanica è più elevata rispetto all'utizzo della saldatura a punti. Con questa tecnica si possono saldare serbatoi molto grandi. Da ricordare che sia quella a punti che quella a rulli sono saldature semiautomatiche, si effettuano su pezzi di

spessore diverso proprio perché la fusione avviene al punto di contatto dei due pezzi.

• Saldatura per scintillio

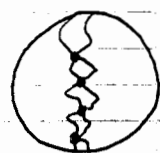
Viene utilizzata molto per saldare di testa i tubi. È solo per materiali conduttori.



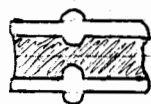
Le pinze sostengono in posizione i due tubi e consentono l'avvicinamento o l'allontanamento reciproco dei tubi stessi. Esse sono collegate al generatore di corrente, per cui al contatto dei tubi si chiude il circuito. La saldatura avviene in 3 fasi:

- **Pressaldamento**: Fase non sempre presente. Le pinze impiegano una piccola forza di chiusura P , tale da garantire solo il contatto dei tubi, il circuito si chiude, passa corrente e i tubi si riscaldano. Al contatto la superficie è minore (vedi saldatura a punti), per cui il profilo di temperatura è massimo al contatto e va via decrescendo verso gli estremi. Ordinariamente la temperatura raggiunta è minore di quella di fusione.

- **Scintillio**: Si fa passare più corrente; l'effetto Joule al contatto dà luogo a microfusioni localizzate nei punti di contatto dei due pezzi, che generano espulsioni di materiale fuso come piccole esplosioni (scintillio). Il fatto che la corrente passi in piccole sezioni genera forte calore e momento che il materiale fonde i pezzi vengono reuniti a contatto da una leggera forza impartita dalle pinze. Più dura il passaggio di corrente più si riscalda il pezzo.



- **Pressatura**: Si interrompe la corrente e si innalza repentinamente la forza di chiusura in questo modo si ha la compenetrazione tra le due superfici e la saldatura dei lembi. Si ha però riscaldamento che interviene sia il perimetro interno che quello esterno. Si attende il raffreddamento e si stacca tutto.



È una saldatura rapida, non serve preparare i lembi (lo scintillio elimina le impurità). Tuttavia non è sempre conveniente perché è difficile eliminare la riscaldamento interna per tubi molto lunghi.

• Saldatura per attrito

Non è una saldatura a resistenza e pressione, ma viene utilizzata spesso per i tubi. Non vi è il passaggio di corrente, ma si sfrutta il calore dovuto all'attrito per portare i materiali a una temperatura maggiore di quella di fusione.

Uno dei tubi viene bloccato sul banco su un supporto mobile e l'altro viene fissato sul mandrino. Imponendo una forza di chiusura (data dal supporto mobile) non troppo elevata, ma che garantisce il contatto, uno dei due tubi viene messo in rotazione elevata. C'è un repentino innalzamento di temperatura su entrambi i lembi a contatto. A questo punto si interrompe la rotazione e si innalza la forza di chiusura del supporto mobile. Si ha la compenetrazione dei tubi (non per fusione, ma per plasticizzazione), quindi saldatura e si generano i problemi di riscalda-
visiti in precedenza con lo scintillio.

Saldatura eterogenea

Per queste saldature si utilizza un metallo d'apporto bassofondente rispetto al metallo da saldare, in quanto la sorgente di calore deve fondere il metallo d'apporto ma non il metallo da saldare.

Le saldature eterogenee sono praticamente:

- Saldobrasatura
- Brasatura forte
- Brasatura dolce

• Saldobrasatura

Si ottiene fondendo una lega rame-zinco e si sfrutta per avere resistenze meccaniche elevate (anche se non ai livelli delle autogene). Il metallo d'apporto viene fuso e portato a una temperatura di circa 800°C . Di solito si scelgono leghe eutettiche (perché hanno più bassa temperatura di fusione) in funzione delle saldature da eseguire.

- Nella brasatura forte si usa una lega rame-stagno, si raggiunge una temperatura massima di 600° e viene utilizzata per piccoli elementi non soggetti da forze intense.
- Nella brasatura dolce si usa una lega stagno-piombo (37%-63%), si raggiunge una temperatura massima di 400° e viene utilizzata per componenti elettronici (basse temperature).
- Nelle saldobrasature si usa una lega rame-zinco (materiale distribuito), si raggiungono gli 800° , serve la rifinitura, pulizia e accostamento dei lembi; è la più resistente meccanicamente tra le tre e viene utilizzata per elementi strutturali, come i bulloni in ghisa.

Generalmente la resistenza meccanica della brasatura dolce è maggiore di quella della brasatura forte.

La sorgente di calore adoperata è una fiamma ossiacetilica (o l'induzione elettromagnetica con elevate intensità di corrente che aumenta la temperatura del metallo che poi fonde il metallo d'apporto) per la saldobrasatura e resistenze elettriche (o forni) per brasatura forte e dolce. Generalmente si accostano i lembi, il metallo d'apporto fuso entra per capillarità e riempie lo spazio tra essi. La resistenza meccanica elevata si raggiunge per due fenomeni:

- tipo meccanico: è dovuto alle asperità (rugosità) superficiali delle superfici da unire. Quando il metallo d'apporto solidifica, essendo entrato in tutti i vuoti per capillarità, esso unisce meccanicamente i due lembi.
- tipo chimico: è dovuto alla diffusione atomica. Ad alta temperatura, con spazio interatomico elevato, gli atomi di materiali solidi possono muoversi e diffondere in atomi dello stesso materiale o di materiali diversi (per notevole affinità chimica). Questa diffusione dà luogo a legami chimici forti e quindi a una nuova lega all'interfaccia pezzo da saldare - metallo d'apporto; e ciò impone una notevole resistenza, in quanto il legame chimico è il legame più forte in natura.

Ci sono dei trattamenti termici che agiscono esclusivamente su legami chimici:

- Carboemmentazione è un processo che aumenta in superficie la percentuale di carbonio (sia essere liquido solido o gassoso con un aumento di temperatura in un ambiente saturo di carbonio. Grazie ad esso si ha una superficie esterna molto resistente e un cuore del materiale molto elastico, in quanto il carbonio diffonde all'interno del materiale.
Per via solida si immette una cassetta contenente il metallo e il carbonio in un forno dopo averla chiusa ermeticamente.
Per via liquida si utilizzano sali liquidi che rilasciano carbonio.
Per via gassosa si crea (con pompe) un idrocarburo ad alta temperatura, il quale rilascia carbonio. In seguito serve sempre la tempera.

- Nitrazione è un processo che aumenta la concentrazione di nitruri in superficie (aumenta la resistenza all'usura ma non la resistenza meccanica). Per fare ciò si mette l'ammoneaca in un forno a 500° , si estrae l'acido nitroso e lo si mette in un altro forno a 500° con l'acciaio da lavorare. Esso forma i nitruri (fenomeno delle sfogliature), ma non si raggiunge il mezzo millimetro di spessore che invece è maggiore rispetto alla carboemmentazione e in seguito alla lavorazione non vi è bisogno della tempera.

In ogni caso questi elementi lavorati non possono essere utilizzati ad alte temperature (700° per la carboemmentazione, 500° per la nitrazione).

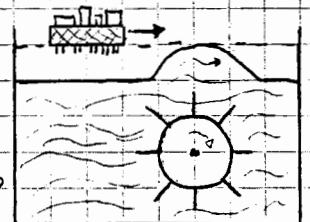
- **Saldatura deep-brazing**
È anche chiamata saldatura di sali fusi ed è adoperata per saldare piccoli elementi di alluminio. È una brasatura forte a 600° . Le fasi di lavorazione sono:
 - **Pulitura**ambi da saldare. Si fa tramite lavaggio in acqua calda o ad ultrasuoni per asportare residui di lavorazioni precedenti. Se c'è ossido di alluminio, esso si asporta tramite spazzolatura meccanica. Si sfregano quindi i lembi.
 - **Fissaggio** degli elementi uno vicino all'altro con pinzette di acciaio inossidabile (la brasatura forte non attacca l'acciaio inossidabile). Si mette il metallo d'apporto, generalmente polvere di bronzo e stucco (che nelle lavorazioni se ne va), tra i due lembi come inerte. Il metallo d'apporto si chiama **FILLER**.
 - **Preparazione forno**. Si mette una polvere di sali (gli stessi dei rivestimenti elettrodi nella saldatura ad arco convenzionale), che fondono a 600° (per cui il filler fonderà ma l'alluminio no). Si porta il forno a 600° .
 - **Imbustatura** dei pezzi nel forno a 600° (i sali sono già liquidi), tramite un cestello in acciaio inossidabile chiamato **rastrelliera**. Il forno è formato da una serie di mattoni refrattari (isolanti - bassa conducibilità), nei quali sono annegate delle kameresistenze che riscaldano la parete interna del forno, formate da acciaio inossidabile. I sali fusi trasmettono calore al pezzo, proteggono il pezzo dall'ossigeno circostante, sciolgono la patina superficiale di ossido di alluminio non rimossa dalle spazzolature e sciolgono lo "stucco" che si unisce ai sali.
 - **Sformatura** dei pezzi. Il metallo d'apporto è ancora liquido ed entra nei lembi per capillarità, saldandoli. Il pezzo, pieno di sali, viene ziplato in acqua calda con un getto abbastanza forte.
- VANTAGGI**: più pezzi saldabili contemporaneamente, alta velocità di produzione, possibilità di saldare l'alluminio.
- Svantaggi**: si spreca tempo per la preparazione del forno e la pulizia dei pezzi saldati. Si può rovinare del lavoro nei sali fusi, per cui servono costose protezioni. Inoltre avendo una brasatura forte non c'è ottima resistenza meccanica.

• Saldatura a onda

Viene utilizzata nelle industrie elettroniche per fissare i componenti elettronici in maniera permanente sulle piste (chiamate circuiti stampati) e garantire il collegamento elettrico con i componenti elettronici. È una brasatura dolce e permette il fissaggio di tutti i componenti in un'unica passata.

Per effettuare la lavorazione si devono posizionare tutti i componenti tramite bracci robotici sulla piastrina madre e tenerli fermi tramite collanti (che vaporizzano alla temperatura di saldatura). Si spalma una pasta di resine organiche che elimina gli eventuali ossidi alla temperatura di saldatura e garantisce perfetta bagnabilità del rame da parte del metallo d'apporto.

Il metallo d'apporto è contenuto in una vasca a 400° , già in fase liquida, nella quale c'è una girante multipala che ruota a velocità regolabile per formare un'onda sul pelo libero la cui altezza dipende dalla velocità di rotazione della girante stessa. Si deve fare in modo che la tangente dell'onda sia parallela al bordo superiore della vasca e che il pezzo da saldare, passando sopra alla vasca ad una certa altezza, lambisca l'onda. In questo modo il metallo d'apporto entra a contatto con i capi, cioè i piedi dei componenti che sporgono dalla parte inferiore della piastrina e, dopo il passaggio dell'onda, esso solidifica fissando i componenti alla piastrina.



La saldatura avviene quindi dopo che la piastra ha evulso l'onda. Una parte della resina rimane inevitabilmente sulla piastra e va eliminata perché produce residui carboniosi (che sono conduttori). Per eliminarli prima si usava il freon (ma inquinava), oggi si sfrutta l'acqua calda. Per proteggere eventualmente parti di piastra che non devono essere saldate si utilizza una pastiglia di vernice che protegge dalla saldatura. Nel processo i componenti elettronici sono emericamente sigillati e dopo l'asciugatura il pezzo è pronto per l'uso.

Oggi si usa una lega stagno-piombo-argento che ne migliora la conducibilità, mentre i resistori sono rivestiti in oro.

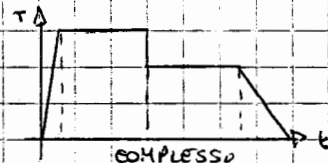
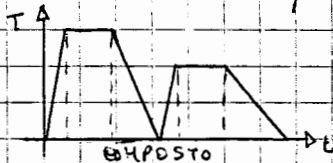
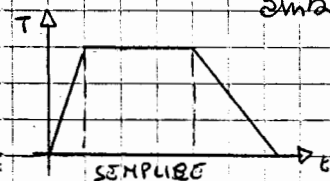
ZONA TERMICAMENTE ALTERATA

Durante la lavorazione di saldatura di qualunque tipo, il pezzo da saldare è sottoposto a un ciclo termico semplice.

Il ciclo semplice prevede un riscaldamento, una permanenza e un raffreddamento.

Il ciclo composto è l'unione di più cicli semplici consecutivi.

Il ciclo complesso è simile a quello composto ma non prevede il ritorno alla temperatura ambiente tra un ciclo semplice e l'altro.

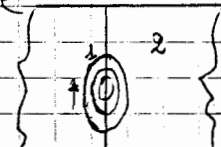
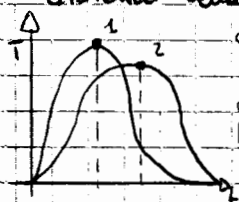


Il ciclo termico che subisce un pezzo saldato può essere:

- ciclo dolce: raffreddamento e riscaldamento lenti (es. 10 minuti)
- ciclo severo: raffreddamento e riscaldamento rapidi (es. 1,2 minuti)

Generalmente il ciclo termico che subisce il materiale da saldare dipende da:

- distanza della sorgente dalla parte da saldare. Se consideriamo la conduzione del calore nel punto e individuiamo due punti notiamo che la massima temperatura si raggiunge in tempi diversi e differiscono le velocità di riscaldamento e raffreddamento. Inoltre nella zona della sorgente si ha liquefazione, ma nelle zone circostanti si ha cambiamento della struttura.



- tipo di saldatura. Il coefficiente di apporto termico Q misura la quantità di calore ceduta al materiale da saldare per unità di lunghezza [J/cm]. Questo coefficiente influisce molto sulle velocità di raffreddamento (e riscaldamento), anche se la fase critica in termini di ciclo è sempre quella di raffreddamento.

Per l'arco convenzionale $Q = \frac{VI}{60v}$ dove v = velocità della sorgente [cm/min]. Per esempio

una saldatura ad arco sommerso ha un ciclo dolce perché apporta più calore rispetto a quella ad arco convenzionale, per cui il raffreddamento è più lento. Generalmente

Q grande \Rightarrow ciclo dolce

Q piccolo \Rightarrow ciclo severo

- tipo di giunto e spessore del materiale da saldare. A parità il raffreddamento avviene per il 90% per conduzione e per il 10% per convezione, per cui più spesso è il materiale più serve calore e più il ciclo è dolce. Inoltre più il calore è disperso (a seconda del tipo di giunto), più la saldatura è severa.

- **temperatura iniziale** pezzo da saldare. All'aumentare della temperatura iniziale del pezzo aumenta anche il tempo di raffreddamento. La velocità di raffreddamento diminuisce all'aumentare della temperatura iniziale e il ciclo diventa più dolce. Temperatura iniziale alta \Rightarrow ciclo dolce
- **tipo di materiale**. Elevata conducibilità $\lambda \Rightarrow$ ciclo severo (rapido scambio di calore). Elevato calore specifico $c \Rightarrow$ ciclo dolce



Individuiamo 3 zone nell'intorno della saldatura:
 la zona 1 è il cordone di saldatura, cioè la zona in cui si ha fusione del metallo base e del metallo d'apporto, la zona 2 è una parte del materiale che non arriva a fusione, ma può essere soggetta a cambiamento strutturale, è la zona termicamente alterata, la zona 3 non risente di alcun tipo di variazione dovuta alla saldatura.

Nella zona 1 (di fusione) la velocità di raffreddamento condiziona la grandezza dei grani di solidificazione (di forma dendritica o sferica). Generalmente più è alta la velocità di raffreddamento più il grano è piccolo. Di conseguenza più il grano è piccolo più le caratteristiche meccaniche aumentano, ma con essa aumenta anche la fragilità per cui si sceglie un compromesso per la velocità di raffreddamento. Inoltre nel cordone possiamo trovare la presenza di erieche a caldo, micrordini che possono essere innescati alla rottura per fatica, dovute alla presenza indesiderata di zolfo e fosforo nelle leghe. Questi elementi ad alta temperatura si legano al cristallo di ferro e durante il raffreddamento precipitano, concentrandosi in zone della massa solida che viene privata di alcun tipo di resistenza meccanica. Inoltre la sezione resistente può essere ridotta anche dalla presenza di elementi estranei come ossidi o altri provenienti dai sali.

Si definisce **Rapporto di diluizione** la percentuale di metallo base disciolto nel cordone. Può essere 100% se non c'è metallo d'apporto o può variare tra il 10% e il 60% per saldature eterogenee.

La zona 2 non arriva a fusione, ma una temperatura superiore alla A3 (equilibrio ferrite-austenite), per cui si nota un cambiamento della struttura e un ingrossamento del grano, per cui la zona 2 può avere caratteristiche meccaniche inferiori a quella del metallo base e per evitare si ricorre ad una velocità di raffreddamento alta, ma non vale da generare cambiamento strutturale. Nella zona 2 si possono generare erieche a freddo, dovute o alla diversa dilatazione termica tra zona 1 e zona 2, o alla presenza di idrogeno nella zona di saldatura (che può dare elementi molto duri e fragilissimi che non collaborano alla resistenza meccanica), emesso dall'elettrodo gasapico.

Nel processo di saldatura può anche avvenire una deformazione del componente a causa delle alte temperature che possono causare distorsioni. Per evitare ciò si può fare in modo da bloccare pezzi ma ciò contribuisce alla nascita di tensioni interne al materiale. Per eliminare le tensioni interne si ricorre al trattamento termico di **distensione**, portando il materiale a 200° (diventa più duttile e spariscono le tensioni) e rimanendo a quella temperatura 1 minuto ogni millimetro di spessore, la velocità di raffreddamento è mediamente lenta (30°/h). Nel caso si voglia ottimizzare anche la dimensione dei grani il riscaldamento non arriva a 200° ma a 600°. Infatti aumentando la temperatura si aumenta la dimensione del grano e si arrotonda per diffusione atomica, tende a sparire la martensite in luogo delle perlite (migliori caratteristiche meccaniche, ma più elastiche).

Il trattamento termico è consigliato quando si lavora con acciaio a medio tenore di carbonio (1,05% di C) o quando i cordoni di saldatura sono molto ricchi in C o se i due elementi da saldare hanno spessori diversi. Altre volte è necessario per evitare difetti macroscopici o con cordoni di saldatura incrociati.

Le saldature possono essere classificate in:

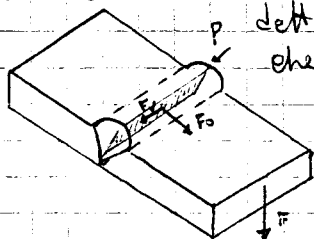
- Saldature di I classe: sono perfette con cordone di saldatura regolare
- Saldature di II classe: hanno alcune inclusioni o cordone irregolare (ma solo alcune buche)

Per la verifica delle saldature facciamo un calcolo delle tensioni:

CRITERIO VON MISES $\sigma_{10} = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{12} + \sigma_{12}^2 + 3\tau_{11}^2}$ $\sigma_{10} < \sigma_{AMM}$

dove σ_{AMM} è generalmente la tensione di snervamento

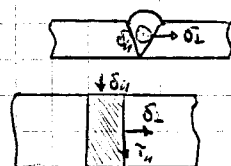
Consideriamo la saldatura di testa, individuiamo nel cordone un piano di simmetria detto piano longitudinale. Scomponiamo la forza F sul piano e notiamo che $\frac{F_0}{A} = \sigma_{11}$ $\frac{F_v}{A} = \tau_{11}$ $\sigma_{12} = \frac{P}{A_1}$ dove P è la forza parallela al piano longitudinale e A_1 è l'area del piano longitudinale.



L'altezza t della sezione resistente è sempre l'altezza della sporcina più piccola tra quelli dei due pezzi da saldare, mentre L è la lunghezza del cordone.



$A = L \cdot t$ La forza che agisce sul cordone si scompone in una tangente al piano di riferimento (genera τ) e una normale ad esso (genera σ). Può esserci anche una σ_{12} .



Per giunto di I classe si deve verificare che $\sigma_{10} < \sigma_{AMM}$

Per giunto di II classe si deve verificare che $\sigma_{10} < 0,85 \sigma_{AMM}$

I giunti si distinguono anche:

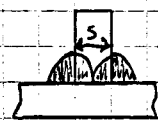
- A completa penetrazione: se la saldatura interseca l'intero spessore
- A parziale penetrazione: se la saldatura non interseca l'intero spessore

Quando la saldatura è a T o di Testa a completa penetrazione è utile usare il criterio von Mises, se il giunto è a T a parziale penetrazione o ha altre geometrie è utile ricorrere al criterio della sfera mozza, un criterio empirico che varia leggermente al variare del materiale.

Fe 360 $\begin{cases} \sigma_{10} = \sqrt{\tau_{11}^2 + \tau_{12}^2 + \sigma_{11}^2} < 0,85 \sigma_{AMM} \\ \tau_{11}^2 + \sigma_{11}^2 < \sigma_{AMM}^2 \end{cases}$

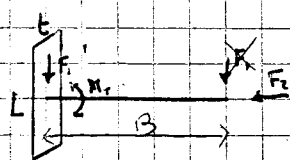
Fe 420 $\begin{cases} \sigma_{10} = \sqrt{\tau_{11}^2 + \tau_{12}^2 + \sigma_{11}^2} < 0,7 \sigma_{AMM} \\ \tau_{11}^2 + \sigma_{11}^2 < 0,85 \sigma_{AMM}^2 \end{cases}$

Nel caso giunto a T a completa penetrazione $A = L \cdot s$ dove s è spessore di piastre bande.



Se il giunto è di II classe $A = (L + 2t)t$ e ovviamente $\sigma_{10} < 0,85 \sigma_{AMM}$

Posso schematizzare il giunto a T come una mensola, per cui:



Nota che F_1 dà luogo a una flessione nell'incastro, lo spostamento nell'incastro (genera una forza e un momento) quindi

$\sigma_{11} = \frac{F_1}{L \cdot t}$

$\sigma_{12} = \frac{M_T \cdot y_{max}}{I} = \frac{M_T \cdot L}{2I}$

dove $I = \frac{1}{12} L^3 t$

$\tau_{11} = \frac{F_1}{L \cdot t}$

CRITERIO VON MISES $\sqrt{(\sigma_{11} + \sigma_{12})^2 + 3\tau_{11}^2} = \sigma_{10}$

$M_T = F_1 \cdot B$

Nel caso di cordone d'angolo la sezione resistente è il triangolo isoscele inscritto all'interno del cordone di saldatura dove l'altezza vale proprio t .



DEFORMAZIONE PLASTICA

Le lavorazioni di deformazione plastica consistono in una variazione della forma del pezzo mediante applicazione di una sollecitazione esterna (consistita in un'attrezzatura, una pressione di un fluido o da effetti termici). I processi convenzionali si classificano in:

- **Processi primari** prevedono operazioni di stozzatura eseguiti generalmente a caldo su manelli di fonderia per ottenere semilavorati da sottoporre ad altre lavorazioni.
- **Processi secondari** si applicano a pezzi già stozzati per conferirgli la forma finale del prodotto (a meno di ulteriori lavorazioni come per asportazione di trucioli).

Il comportamento elastoplastico dei materiali metallici viene studiato tramite prova di trazione eseguita da una macchina su provini di forma e dimensioni normali, che può lavorare in controllo di spostamento, di carico o di velocità e registrare il valore della forza ottenuta dalla cella di carico in funzione dell'allungamento del provino. Definendo $\sigma = F/A_0$ $\epsilon = \Delta l/l_0$ si ottiene il grafico σ ϵ .

Tensione - allungamento (qualitativamente simile a quello precedente). Esso evidenzia un primo tratto, detto elastico e un secondo tratto, detto plastico, inoltre la sollecitazione risulta monoassiale fino al picco di sforzo in cui avviene la strizione, al seguito della quale i trucioli si riducono (bordo restringimento della sezione) e lo stato di sollecitazione da monoassiale diventa pluriassiale. In ambito plastico si realizza l'ottenzione sui parametri di sollecitazione vera $\bar{\sigma} = F/A$ e deformazione logaritmica $\bar{\epsilon} = \int \frac{dl}{l} = \ln[l/l_0]$. Il nuovo diagramma $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ avrà quindi andamento sempre crescente, ben approssimato dalla legge di Hollomon $\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$ con K = fattore di resistenza n = coefficiente di incrudimento. Esso descrive la tensione di flusso plastico, cioè il valore necessario di tensione per continuare la deformazione plastica in quello stato. La legge di Hollomon è precisa fino allo stato di strizione, oltre al quale andrebbe corretta per lo stato di tensione pluriassiale. Generalmente l'area sottesa alla curva proposta rappresenta il valore del lavoro ideale W_i , dato analiticamente da $W_i = \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = \int_0^{\bar{\epsilon}} K \bar{\epsilon}^n d\bar{\epsilon}$ con $\bar{\sigma}_m = \text{cost}$. Esso è l'energia necessaria alla deformazione, ma è una stima molto inferiore del lavoro reale, il quale include anche la quota W_d da spendere per vincere gli attriti e W_r associata dal materiale durante la distorsione delle fibre. $W = W_i + W_d + W_r$. I meccanismi di deformazione plastica si basano sullo scorrimento tra piani cristallini, infatti, considerando un materiale mono cristallino, si ha deformazione plastica quando la deformazione tangenziale in corrispondenza dei piani cristallini raggiunge un valore limite, per cui si ha rottura dei legami atomici, poi ripristinati a valle del processo. La tensione di scorrimento si riduce all'aumentare della distanza tra i piani e al ridursi della distanza interatomica tra atomi dello stesso piano.

La deformazione plastica a freddo avviene per scorrimento di piani cristallini (si raggiunge una tensione tangenziale limite), poiché si ha rottura localizzata dei legami reticolari e quindi scorrimento. Essa è facilitata dalla presenza di difetti reticolari, le dislocazioni, che riducono il numero di legami da rompere, ma aumentando anche la densità di dislocazioni (che accumulano energia elastica) aumenta notevolmente e ci sono distorsioni del reticolo e conseguentemente aumenta la tensione di scorrimento. Questo fenomeno è l'incrudimento. Lo scorrimento è impedito dal bordo dei grani adiacenti che anch'essi richiedono quindi una sollecitazione maggiore. Per questo a freddo, la dissipazione dell'energia in calore può provocare aumenti di temperatura. La deformazione plastica a caldo avviene a una temperatura maggiore di quella di cristallizzazione, in questo modo la notevole mobilità delle dislocazioni (consente l'intervento con la velocità di deformazione) una restaurazione dinamica del reticolo, eliminando l'incrudimento e riducendo di molto la tensione di flusso plastico.

I processi a caldo richiedono forze minori a parità di deformazione, sono quindi vantaggiosi ma hanno peggiori tolleranze e finitura superficiale a cause dei fenomeni di ossidazione.

lo stato di sollecitazione che si ha nelle deformazione plastica è più complesso di quello che emerge dalla prova di trazione, per via della presenza di diverse sollecitazioni con orientamento differente, generalmente 9, di cui 3 normali e 3 tangenziali. Il tensore degli sforzi impone però l'uguaglianza a 2 e 2 delle sollecitazioni tangenziali per l'equilibrio alla rotazione. Più in generale esso può essere scomposto in una **parte rotoirica** (con elementi solo sulla diagonale principale, che sono il valor medio delle sollecitazioni normali $\bar{\sigma}_m$), che rappresenta uno stato di sollecitazione idrostatico che non induce deformazione plastica ma solo variazione di volume, e una **parte deviatoria**, che ha in sé le sollecitazioni che inducono deformazione plastica nel materiale.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau & \tau \\ \tau & \sigma_y & \tau \\ \tau & \tau & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_m & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\sigma}_m & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\sigma}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_x - \bar{\sigma}_m & \tau & \tau \\ \tau & \sigma_y - \bar{\sigma}_m & \tau \\ \tau & \tau & \sigma_z - \bar{\sigma}_m \end{bmatrix} \quad \text{con } \bar{\sigma}_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$$

parte rotoirica parte deviatoria

Al variare del sistema di riferimento il tensore degli sforzi varia. Esistono 3 direzioni principali per cui si annullano gli sforzi di taglio e le componenti normali, dette sollecitazioni principali, sono disposte in ordine decrescente. $\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$ Ci sono dei criteri (Tresca e Von Mises) che stabiliscono per quale combinazione delle tensioni in pieno il materiale va incontro a flusso plastico.

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

• **Criterio di Tresca** si basa sul fatto che la deformazione plastica richiede il raggiungimento di una tensione tangenziale massima.

$$\tau_{MAX} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = K \quad \text{con } K \equiv \text{resistenza a scorrimento del materiale}$$

Graficamente si ottiene lo stesso risultato con il cerchio di Mohr

• **Criterio Von Mises** considera una combinazione di tutte le sollecitazioni principali individuando l'inizio della plasticizzazione quando:

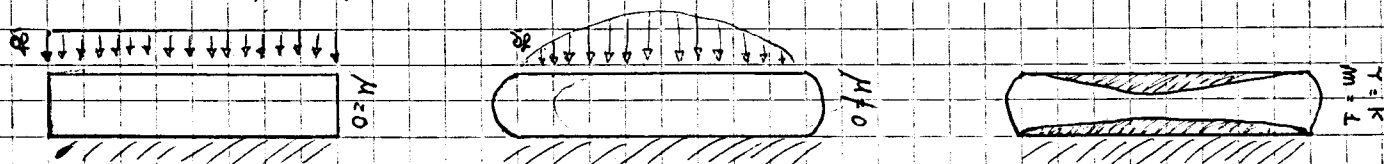
$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2 Y^2 \quad \text{con } Y \equiv \text{tensione di snervamento}$$

Restano risultati più aderenti alla realtà in stati di sollecitazione più complessi.

Influenza dell'attrito

Nelle lavorazioni per deformazione plastica un ruolo importante è dovuto ai fenomeni di attrito al contatto tra materiale e attrezzatura. A causa dell'attrito si ha usura degli utensili, maggior dispendio energetico e l'insorgere di una componente di sollecitazione tangenziale data dal prodotto tra pressione di contatto P e coefficiente di attrito Coulombiano μ . Quest'ultimo varia in funzione della temperatura di lavorazione e della presenza o meno di lubrificante. Nel caso in cui la sollecitazione tangenziale eguali la resistenza a scorrimento del materiale ($\tau = \tau_{MAX} = K$), si hanno condizioni di **attrito adesivo**, con assenza di slittamento tra materiale ed attrezzatura. K è quindi il limite superiore della sollecitazione τ , per cui $\tau = m \cdot K$ dove m varia tra 0 e 1 e dipende dalla temperatura e dall'eventuale lubrificazione.

Considero una compressione di un cilindro da un'altezza h_i a una h_f

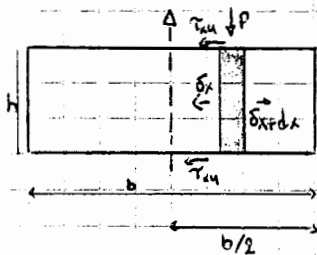


Nel caso di coefficiente di attrito nullo, la prima linea conserverà la sua cilindricità (sollecitazione monoassiale) e la pressione P da applicare è costante e pari alla tensione di flusso plastico $\sigma_F = P$.

Nel caso invece di coefficiente non nullo, si ha una sollecitazione tangenziale all'interfaccia che si oppone al flusso trasversale e genera una forma a botte e la pressione P risulta crescente dal bordo libero (dove è pari a σ_F) verso il centro (e' maggiore ostacolo al flusso). Nel caso in cui $\gamma = k$ $m=1$ si hanno fenomeni di attrito adesivo e si genera la distorsione delle fibre. Un ulteriore aumento della pressione genera le zone morte. Per esse l'entità della deformazione indotta nella lavorazione è molto più piccola che nel resto del materiale, per cui le proprietà meccaniche possono differire notevolmente rispetto al resto del materiale. Essendo come dei punti deboli, si cerca di localizzarli in zone che saranno poi asportate via o che almeno non siano punti critici.

Una pianificazione dei processi di deformazione plastica può essere fatta tramite metodi analitici come l'analisi elementare o la **SLAB-ANALYSIS**, che permette di individuare nel corpo elementari infinitesimi ortogonali al flusso imporre la condizione di equilibrio e stimare istantaneamente le sollecitazioni in gioco assumendo il materiale omogeneo e isotropo.

Considero un processo di **RIALCATURA** e suppongo di avere un pezzo $h \times b \times L$ dove L non è interessata alle deformazioni, mi metto in condizione di stato piano di deformazione con riduzione di altezza h e aumento di larghezza b . La costanza del volume implica che $b \cdot h = \text{cost}$.



Per le ipotesi fatte $\epsilon_z = 0$ lungo gli assi sul piano simmetrico della figura e considero un elementino $h \times dx$. Utilizzo il criterio di τ_{max} , per cui $\sigma_x - \sigma_y = 2\tau$. Impongo l'equilibrio alla sollecitazione.

$$\sigma_y = -P \quad d\sigma_x = d\sigma_y = -dP \quad \text{per cui ho che:}$$

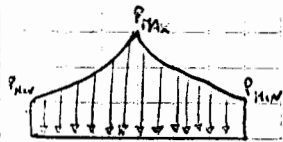
$$-\sigma_x h + (\sigma_x + d\sigma_x)h - 2\mu P dx = 0 \Rightarrow d\sigma_x h = 2\mu P dx \quad \text{ma } d\sigma_x = -dP$$

$$-dP \cdot h = 2\mu P dx \Rightarrow -\frac{dP}{P} = \frac{2\mu}{h} dx \Rightarrow \int_P^{\sigma_F} \frac{dP}{P} = \int_x^{b/2} -\frac{2\mu}{h} dx \Rightarrow \left[-\ln P \right]_P^{\sigma_F} = \frac{2\mu}{h} \left(\frac{b}{2} - x \right)$$

Ricordando ovviamente le condizioni al contorno che implicano che la pressione sia massima al centro del pezzo ed eguali la tensione di flusso plastico sul bordo libero ($x = b/2$)

$$P = 2K e^{\left[\frac{2\mu}{h} \left(\frac{b}{2} - x \right) \right]}$$

La pressione va da un minimo a $x = b/2$ $\begin{cases} P_{min} = 2K \\ P_{max} = 2K e^{\left[\frac{2\mu}{h} \left(\frac{b}{2} - x \right) \right]} \end{cases}$ fino ad arrivare a un massimo a $x = 0$



Integrando la legge puntuale di P , si può risalire a un valor medio di pressione P_{med} e quindi alla forza necessaria per ottenere il flusso plastico

$$P_{med} = \frac{1}{b/2} \int_0^{b/2} P(x) dx = \frac{2Kh}{b\mu} \left[e^{\frac{b\mu}{h}} - 1 \right] \quad F = P_{med} (L \cdot b \cdot \mu) \quad \text{dove } 2K = \sigma_F$$

dove il parametro σ_F può essere ricavato $\sigma_F = K \epsilon^n$ σ_F e ϵ^n con $K \neq K$

Si può verificare l'eventuale presenza di attrito adesivo ricordando che $\gamma = mK$, per cui

$$-\sigma_x h + (\sigma_x + d\sigma_x)h - 2mK dx = 0 \Rightarrow d\sigma_x h = 2mK dx \Rightarrow -dP = \frac{2mK}{h} dx \Rightarrow \int_P^{\sigma_F} -dP = \int_x^{b/2} \frac{2mK}{h} dx$$

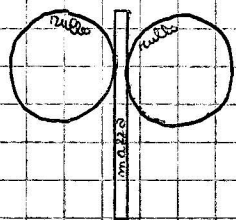
$$P = 2K + \frac{2mK}{h} \left(\frac{b}{2} - x \right) = \sigma_F + \frac{2mK}{h} \left(\frac{b}{2} - x \right)$$

Questa equazione esiste in un fascio di rette di parametro m , per cui, imponendo $m=1$ si può verificare la presenza di attrito adesivo nel caso in cui la retta corrispondente intersechi la curva precedentemente ottenuta. In questo modo si può anche verificare la presenza di zone morte (solamente nelle vicinanze di P_{max}).

• Fucina e stampaggio

La deformazione plastica è ottenuta tramite una compressione dovuta al movimento relativo degli utensili usati. La differenza tra fucina e stampaggio sta nella diversa complessità degli utensili che influenzano le tipologie di prodotto ottenibili in termini di forma e caratteristiche del semilavorato di partenza. La fucina usa utensili di forma geometrica molto semplice con superfici piane o a singolo curvatura pos. in stampi aperti, per rendere la forma del materiale di partenza prossima a quella finale. Ideale per la stozzatura, anche conosciuta come forgatura, la lavorazione avviene a caldo (a temperatura superiore a quella di ricristallizzazione), con eventuali riscaldamenti intermedi nel caso di operazioni lente. Lo stampaggio consiste nel forzare il materiale di partenza ad occupare una cavità ricavata su stampo e controstampo, che riproduce in negativo il pezzo finale da ottenere a meno di alcuni accorgimenti. Si può effettuare sia a freddo che a caldo; nel primo caso si ha un aumento della resistenza meccanica, con una maggiore precisione ottenibile. Si usa generalmente lo stampaggio per pezzi di piccole dimensioni, sottoposti a deformazioni semplici o caratterizzati da basse resistenze alla deformazione. Le macchine usate per entrambe le lavorazioni sono magli e presse, che si distinguono per il tipo di compressione esercitata, impulsiva nel primo caso, continua nel secondo. Costituttivamente sono realizzate con rigida incastellatura su cui sono fissati gli organi fissi o mobili, gli utensili e gli elementi per il movimento relativo (che possono essere meccanici, pneumatici o idrodinamici). Entrambe possono avere una struttura aperta e montante o chiusa e portale, che si scelgono in funzione della zona di lavoro e in termini di salvaguardia delle possibili deformazioni plastiche possono rompere la struttura stessa. Le prestazioni sono definite in funzione delle corse della slitta, della forza disponibile per ogni corsa (superiore a quella opposta del materiale in deformazione), e dell'energia disponibile della macchina che deve coprire le aliquote di lavoro ideale, di attrito e ridondante (quella assorbita dal materiale nella distorsione delle facce piane). Siccome il processo presenta due fasi con notevole differenza di energia richiesta, si fa uso di volani, grazie ai quali si dimensiona il motore in funzione della potenza media e il volante supplisce "all'extra" positivo o negativo che sia, in quanto funge da accumulatore di energia. Il tempo di contatto interessa il riscaldamento dello stampo e i fenomeni di usura e il raffreddamento del pezzo con aumento di resistenza al flusso plastico. La velocità di chiusura invece influenza sia il tempo di contatto sia la velocità di deformazione.

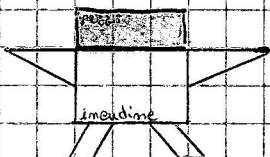
Nella fucina c'è una parte fissa detta **incudine** e una parte mobile detta **mazza**. Durante la lavorazione la mazza impatta sul pezzo posto sull'incudine in maniera da esercitare un'azione impulsiva convertendo l'energia potenziale in lavoro di deformazione. I magli possono essere:



• **magli a semplice effetto**: la mazza cade solo per effetto della gravità.

• **magli a doppio effetto**: la mazza cade per effetto della gravità e di una ulteriore forza che ne aumenta l'accelerazione, velocità ed energia.

Magli a semplice effetto possono essere a leva, all'alena o sollevamento e generalmente la risalita della mazza è assicurata da appositi rulli.



$$L_p = P_e \cdot h = \frac{1}{2} m v^2$$

dove P_e = forza peso agibile sulla mazza di massa m

L_p = lavoro fornito dalla mazza

L_d = lavoro disponibile alla deformazione

L_i = lavoro assorbito dall'incudine

P_i = forza peso incudine

s_i = spostamento elastico incudine

$$L_p = L_d + L_i$$

$$L_i = P_i \cdot s_i$$

$$\frac{L_i}{L_p} = \frac{P_i}{P_e}$$

Da questa relazione si comprende l'importanza di utilizzare incudine con masse almeno 20 volte superiori a quella della mazza per ridurre l'aliquote di lavoro perso, perché assorbito dall'incudine.

$$L_d = P_e \cdot h \left(1 - \frac{P_e}{P_i}\right)$$

$$L_m = L_d = P_m \cdot A \cdot s$$

Il lavoro disponibile alla deformazione deve uguagliare quello necessario (L_m) richiesto, dato dal prodotto della resistenza offerta dal materiale a temperatura di lavorazione (P_m), superficie di contatto pezzo-mazza (A) e schiacciamento desiderato (s).

F_d = forza di deformazione

$$F_d = \frac{L_m}{s} = \frac{L_m}{s}$$

$$F_{max} = \frac{L_d}{s_i}$$

la forza massima è il rapporto tra lavoro disponibile e spostamento dell'incudine

I magli a doppio effetto prevedono un'ulteriore forza agente sulla mazza. Si può essa essere ottenuta tramite reazione elastica (magli a balestra), compressione dell'aria (magli pneumatiche), espansione di un fluido nel cilindro (magli a vapore). Per le magli a doppio effetto quindi:

$$L_p = (P_e + F) h \eta$$

$$L_d = (P_e + F) \left(1 - \frac{P_e}{P_i}\right) h \eta$$

F = forza agente

η = rendimento

Nella lavorazione ci sono notevoli sollecitazioni e vibrazioni trasmesse al basamento, per evitare ciò ricorrendo a magli a controcoppia, basati sul movimento simultaneo e opposto di mazza e incudine collegati tra loro. In questo caso non è necessario l'eccessivo sovradimensionamento dell'incudine, basta solo che sia più grande della mazza.

In seconda del moto utilizzato per ottenere la chiusura di stampa e contostampa, le presse si suddividono in:

- **pressa meccanica a eccentrico**: un motore elettrico mette in rotazione un cingolo albero su cui è collegato un volano, che trasferisce la rotazione a un albero tramite ruota dentate e dischi di frizione. Su questo albero vi è il sistema a eccentrico che trasforma il moto rotatorio in rettilineo alternato per ottenere la salita e la discesa dello stampo. Ci sono freni e limitatori di forza.
- **pressa meccanica a vite**: si basa sul sistema vite-madrevite per la trasformazione del moto rotatorio in rettilineo e dischi di frizione posti sullo stesso albero che garantiscono discesa e risalita.
- **pressa oleodinamica**: consente di avere valori costanti di forza e velocità con valori limiti molto superiori. Sono usate per sbazzare i lingotti di fonderia (inadatti a deformarsi ad alte velocità). Lo spostamento della slitta è ottenuto tramite iniezione di olio e pressione in sistemi pistone-cilindro.

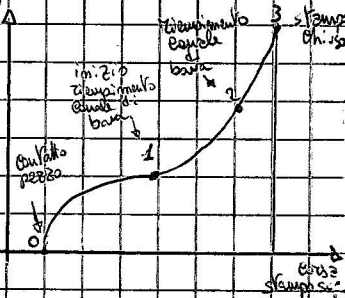
Lo **stampaggio** consiste nel forzare il massello metallico ad elevata temperatura ad occupare una cavità ottenuta tra stampo e contostampo. Si sviluppa in 3 fasi:

- **Posizionamento del pezzo sulla stampa inferiore**, impostando opportuni riferimenti (punti di battuta) per definire univocamente la posizione del pezzo stesso.
- **Discesa della slitta superiore con contatto pezzo-contostampo**. La fase di compressione continua fino all'inizio del riempimento del canale di "bava".
- **Aumento della forza di compressione fino all'intero riempimento del canale di bava**.

Il canale di bava assolve una triplice funzione: attutisce la sollecitazione tra stampo e contostampo, alla chiusura consente di avere un deposito per il materiale in eccesso e inoltre facilita la fase di riempimento dello stampo stesso, in quanto il materiale, nel passare dalla cavità al canale, si raffredda di più, aumenti la sua resistenza che si oppone al flusso in questa direzione, per cui il materiale tenderà a fluire preferibilmente nella zona ancora vuota del canale.

Il processo non consente di ottenere una deformazione uniforme, per cui è possibile avere delle zone morte che, tramite una plasticizzazione preliminare, possono essere localizzate in punti da rimovere tramite asportazione di truciolo.

La forza di chiusura necessaria ha valori sempre crescenti e ha un aumento più marcato dal momento di inizio formazione della barra (1). Per evitare bruciamenti, raffreddamenti si è soliti riscaldare lo stampo prima dello stampaggio. La forza massima può essere calcolata come $F_{max} = K \Delta p A_c$.



Δp : tensione di flusso plastica A_c : Area di contatto K : coefficiente geometrico

Generalmente la temperatura di lavorazione deve essere la più alta possibile, ma senza bruciare il materiale in lavorazione.

Alla fine dello stampaggio si procede alla rimozione di barre e diaframmi tramite l'incisione, gli eventuali ossidi si eliminano con processi meccanici o utilizzo di acidi e, qualora necessario, si procede alla finitura con uno stampo sabbia (perno o meglio).

Il volume di materiale usato per lo stampaggio è sempre quello della cavità maggiore del 60% del volume di riempimento del canale di barra.

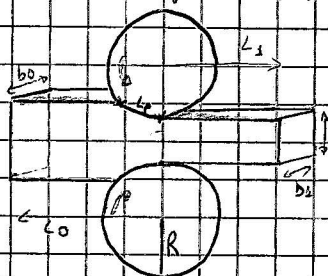
Laminazione

Consiste nel forzare un maseello metallico a passare attraverso 2 rulli orizzontali detti cilindri. Durante il processo il materiale subisce schiacciamento e riduzione di spessore ($h_f < h_i$) un allungamento ($L_f > L_i$) ed un laterale allargamento ($b_f > b_i$). Tra questi

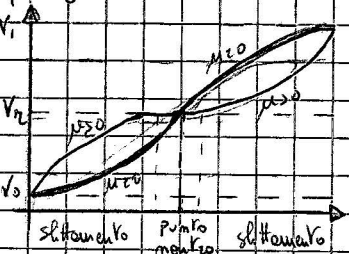
l'allargamento è di minore entità e indipendente dalla lunghezza iniziale. Il suo valore è influenzato da fenomeni di attrito, in quanto il materiale tende a fluire verso le zone libere per cui l'allungamento è più pronunciato per valori maggiori del coefficiente di attrito, per estensioni maggiori della superficie di contatto (raggio dei rulli), e in particolare per lavorazioni a caldo. L'allargamento è stimabile empiricamente per sezione quadrata $\Delta b = 0,35 \Delta h$, per

sezione rettangolare $\Delta b = e L_p \frac{\Delta h}{h_0}$ con e costante ed L_p lunghezza dell'arco di contatto dove $L_p = \sqrt{R \Delta h}$.

Tra i prodotti ottenibili tramite laminazione ricordiamo i blumi di sezione quadrata con lato $l > 130$ mm, le bramme di sezione quadrata con lato $l < 130$ mm, le billette di sezione rettangolare con lato minore di almeno 100 mm e lato superiore 4 volte tanto, i sabei per altre sezioni rettangolari, i mastri di spessore estremamente ridotti e molto lunghi e la vergella, il filo metallico continuo avvolto in rotoli.



Durante la lavorazione il volume rimane costante per cui, per la costanza della portata $V S_0 = V S_1 = V S$ in ipotesi di allungamento trascurabile, considerando la velocità periferica dei rulli come $v_r = \omega R = \text{costante}$, si nota che la velocità del materiale eguaglia quella periferica dei rulli trovandosi in un unico punto, detto punto neutro, a cui corrisponde

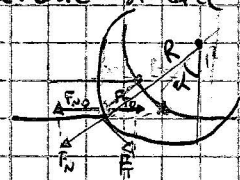


una sezione detta sezione di inversione in quanto, prima di essa l'attrito tra materiali e rulli genera una forza concorde al verso di laminazione (rulli più veloci del materiale), mentre dopo di essa la forza di attrito è opposta al verso di laminazione. Si evidenzia una zona di adesione con velocità del materiale pari circa alla velocità periferica dei rulli (più che un punto è una zona neutra) preceduta e seguita da 2 zone di slittamento. In ogni caso, in una sezione il profilo di velocità in funzione dello spessore può subire spostamenti dal valor medio che causa una notevole distorsione dei grani del metallo con conseguente anisotropia e fibrosità (con delle prove si valuta il coefficiente di anisotropia).

Durante il processo un ruolo importante è svolto dall'attrito che influenza l'andamento e il trascinamento del materiale, nonché forza opposta e potenza di laminazione. Generalmente il materiale, al primo contatto con i rulli, deve essere allungato.

Finalmente senza l'aiuto di forze esterne (concordi al verso di laminazione) in quanto tali forzamenti possono causare flessione dei rulli stessi. La laminazione si dice spontanea quando la componente della forza di attrito F_{ro} parallela alla direzione di laminazione è maggiore della componente della forza data dalla pressione dei rulli F_{no} , per cui:

$$F_{ro} > F_{no}$$



$$F_r = \mu F_n$$

$$F_{ro} = \mu F_n \cos \alpha$$

$$F_{no} = F_n \sin \alpha$$

$$\mu F_n \cos \alpha > F_n \sin \alpha$$

$$\mu > \tan \alpha$$

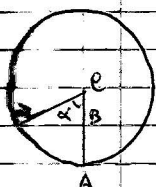
detto ρ = angolo di attrito, per cui:

$$\mu = \tan \rho$$

$$\tan \rho > \tan \alpha$$

$$\rho > \alpha$$

La laminazione è quindi spontanea se $\rho > \alpha$. Possiamo inoltre stimare la massima riduzione teorica di spessore, cercando lo schiacciamento in funzione dell'angolo d'imbocco.



$$AE = ED = R$$

$$AB = \Delta h/2$$

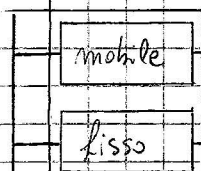
$$AB = AE - BE$$

$$\Delta h/2 = R(1 - \cos \alpha)$$

$$\Delta h = 2R(1 - \cos \alpha)$$

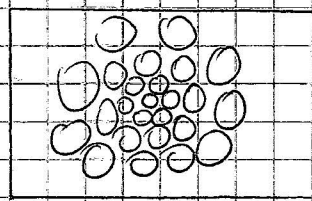
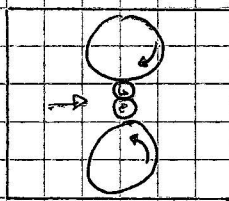
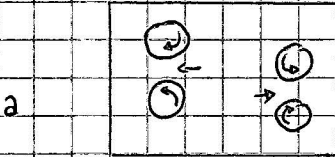
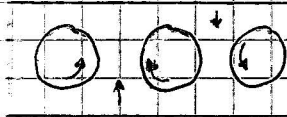
Per ottenere produzioni considerabili ed eliminare passaggi in sbazzatura, si lavora a alti valori del coefficiente d'attrito, a caldo e con rulli scarnati. Generalmente la condizione di trascinamento è meno restrittiva di quella di imbocco (una volta afferrato il materiale, esso sarà comunque trascinato fino all'uscita).

La laminazione viene effettuata nelle Gabbie di laminazione, con rullo mobile e rullo fisso.

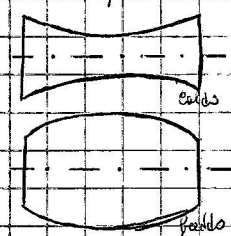


Lo schema più semplice, chiamato DDO presenta un rullo inferiore in posizione fissa e quello superiore ad altezza regolabile tramite viti di regolazione. Ogni rullo è collegato a un motore tramite allunghe (barre con punti a smacco sulle estremità). Il duo può essere reversibile o irreversibile a seconda se consente o meno l'inversione del moto (consigliata nelle fasi iniziali, per pezzi corti), che non permette però l'irrobustimento di alcuni coltelli (alti tempi morti). Ci sono anche altri schemi disponibili, come il TRIO (a) che ha 3 cilindri sulla stessa gabbia, dove il centrale lavora alternativamente col superiore e l'inferiore, il DOPIO DDO (b) con 2 coppie rotanti per avere verso di laminazione opposti, il QUARTO (c) con 4 rulli e il PLANETARIO (d) in cui la flessione è limitata tramite il contatto con ogni supporto di diametro progressivamente maggiore.

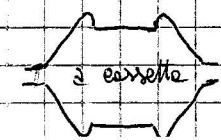
Sono anche altri schemi disponibili, come il TRIO (a) che ha 3 cilindri sulla stessa gabbia, dove il centrale lavora alternativamente col superiore e l'inferiore, il DOPIO DDO (b) con 2 coppie rotanti per avere verso di laminazione opposti, il QUARTO (c) con 4 rulli e il PLANETARIO (d) in cui la flessione è limitata tramite il contatto con ogni supporto di diametro progressivamente maggiore.



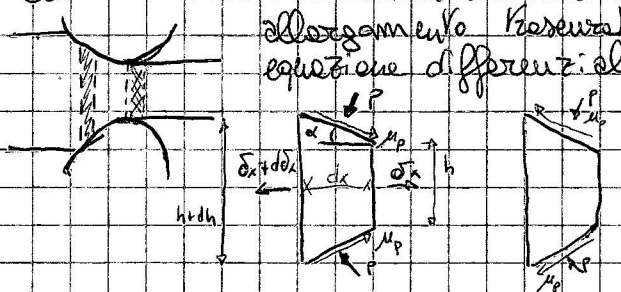
La forma dei rulli può deviare dalla forma cilindrica per compensare variazioni di forma dovute a dilatazione termica o deformazione elastica. Per lavorazioni a caldo, siccome c'è un forte effetto di dilatazione termica i cilindri presentano nella parte centrale, lì dove è più difficile smaltire calore, un diametro ridotto, cosicché esso assume forma cilindrica durante la lavorazione. Per lavorazioni a freddo invece, l'effetto di deformazione elastica è molto evidente e i rulli presentano un diametro maggiore nel centro in modo da evitare sconvolgenti flessioni dei rulli stessi.



La sbazzatura viene effettuata attraverso colibri, che possono essere ovali, quadrati o a consetta, che permettono l'ottenimento di sezioni diverse da quelle rettangolari. Nel caso di laminazioni di forme particolari si progettano colibri ad hoc, facendo in modo che il baricentro del pezzo sia al centro tra due rulli, evitando di avere solcature profonde nei rulli, che non ridurrebbero la resistenza, cercando inoltre di limitare le differenze di velocità tra diverse zone per evitare forti tensioni residue e distorsione del laminato.



Ritornando alla slab-analysis e riportando lo stato di sollecitazione su elementi ortogonali alla direzione di laminazione a monte e a valle dell'inversione si ha che, supponendo allungamento trasversale e stato pieno di deformazione, posso ricorrere alla equazione differenziale della sollecitazione, per cui ho che



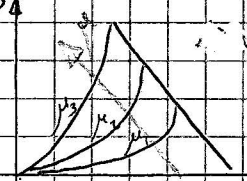
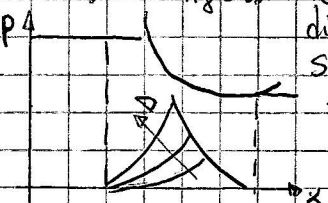
$$\sigma_x h - (\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) - 2P \sin \alpha \pm 2\mu P \cos \alpha = 0$$

con \$s \equiv\$ superficie inclinata \$s = dx / \cos \alpha\$

$$\sigma_x h - (\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) - 2P dx \tan \alpha \pm 2\mu P dx = 0$$

Per cui \$-\sigma_x dh - h d\sigma_x - 2P dx \tan \alpha \pm 2\mu P dx = 0\$ dove ho trascurato gli infinitesimi di ordine superiore (\$d\sigma_x dh\$).

Si può integrare esplicitando \$h = h(x)\$, ricordando che in ingresso e uscita, in assenza di forze di tiro o controllo lo \$\sigma_x = 0\$ e la pressione eguaglia la tensione di flusso plastico, in quanto \$\sigma_x - \sigma_y = 2K\$ \$\sigma_y = -P\$. I profili di pressione ottenuti evidenziano valori crescenti fino alla zona di inversione (dove c'è il massimo) e poi valori decrescenti. Inoltre all'aumentare del coefficiente di attrito si ha un incremento della sollecitazione massima e uno spostamento verso l'ingresso della zona di inversione. Inoltre al variare del diametro dei rulli si ha un'eguale variazione dello stato di sollecitazione: più piccoli i rulli minore è la sollecitazione.



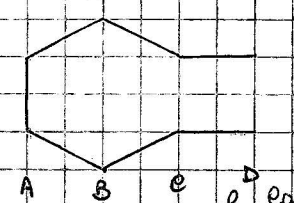
L'eventuale applicazione di forze di tiro (a valle) o controllo (a monte) disorde al verso di laminazione induce un valore minore della sollecitazione \$\sigma_x\$ a causa del pre-tensionamento della macchina in ingresso e uscita. L'applicazione di tiro e controllo può essere effettuata attraverso schemi di impianto chiamati laminatoio continuo, costituito da diverse gabbie (con schemi a quarto o planetario) in sequenza ed operanti sullo stesso materiale (riduzione progressiva di spessore). Un calcolo estremamente semplice di forza, potenza e coppia in gioco per ogni rullo può essere fatto considerando la laminazione come un processo di trafilatura per cui:

$$P_m = \frac{1}{b/2} \int_0^{b/2} \frac{2\mu}{h_m} \left(\frac{b}{2} - x \right) dx = \frac{2Kh_m}{b\mu} \left[e^{\left(\frac{b\mu}{h_m} \right)} - 1 \right] \quad \text{dove } h_m = \frac{h_0 + h_1}{2}$$

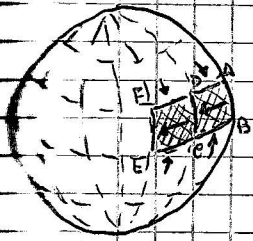
$$F = P_m \cdot L \cdot b \quad E = F \cdot \frac{L}{r} \quad P = M \cdot \omega \quad \text{dove } E = \text{coppia}$$

Laminazione obliqua

Il processo di laminazione è largamente usato anche per produrre tubi con o senza saldatura. Si parte da una lamiera sottoposta ad una progressiva curvatura mediante piegature di rulli di concavità o convettività crescente. A valle di questi passaggi può esserci la saldatura del tubo e pulizia del cordone, la produzione di tubi senza saldatura è effettuata con il processo Hammesmann, che prevede l'utilizzo di rulli opposti che ruotano nello stesso senso attorno ad assi sferici ed inclinati rispetto all'asse del laminato.

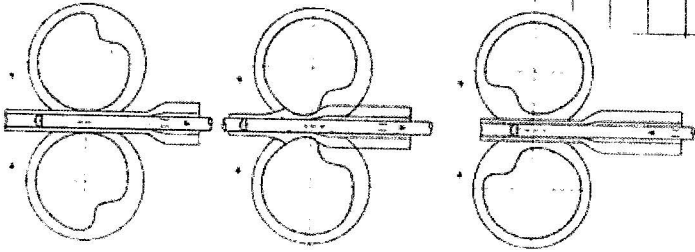


in questo modo si conferisce al materiale un moto complessivamente elicoidale. La forma dei rulli consente di applicare una pressione crescente e conferisce il moto longitudinale nel tratto A-B, a valle del quale il diametro crescente consente il ribasso del pezzo formato nel tratto B-C. può eventualmente esserci un tratto a diametro costante C-D per liscivare superficialmente lo stato di sollecitazione imposto al pezzo genera una lacerazione al centro della sezione il foro viene poi allargato e calibrato tramite una spina ogivale sulla linea di laminazione a valle dei rulli. Questa lacerazione centrale è dovuta all'irradiazione della sollecitazione di trazione dalle periferie verso il centro della barra.



Considerando infatti un elemento interno ABED definito dalle linee isobare esso sarà in equilibrio sotto l'azione di due sforzi di compressione e una componente diametricale di trazione. Questa componente diametricale agirà sull'elemento più interno EDER, causando anch'esso allo stesso modo lo sforzo di trazione aumenta sempre più andando verso il centro e proprio al centro la trazione è massima. Qui si sommano gli effetti di questa trazione, della compressione dovuta ai rulli e a un'ulteriore compressione tangenziale e il tutto porta alla formazione dello spunto interno.

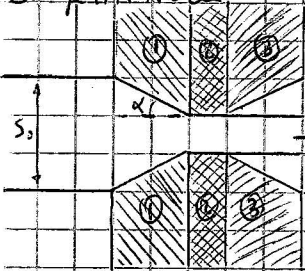
Il prodotto così ottenuto si chiama forato ed ha notevole spessore, ridotta lunghezza e scarsa precisione (tipica di una sbazzatura), per cui era necessario di altre lavorazioni. Si segue con il laminatoio a passo di Pellegrino, che prevede rulli controrotanti formati da due semicirconferenze di diametri diversi unite fra loro da una spallatura ridotta a le dimensioni corrispondenti al diametro finale del tubo, mentre la spallatura superiore ha dimensioni superiori a quelle del forato di partenza per evitare interferenze alla esito di ritorno. Durante il processo, il forato passa sul mandrino segue un movimento alternato in un verso e nell'altro in laminazione accompagnando da una rotazione di 30° del forato attorno al pezzo ad ogni corsa (completa). Il rumore sentito dalla lavorazione richiama l'andata dei pellegrini.



Trafilatura

È un processo che consiste nel espungere una barra, un filo o un tubo e passare attraverso il foro di una filiera sotto l'azione di una forza di trazione applicata a valle della filiera stessa per ottenere una riduzione della superficie con caratteristiche di finitura.

La filiera è realizzata in HSS, o in carburo o in diamante industriale (per difficili lavorazioni). Su di essa si può individuare:



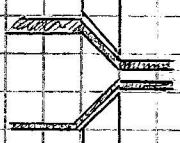
- Un primo tratto convergente (1) che facilita l'imbocco del pezzo di partenza e permette di ottenere la deformazione voluta.

- Un secondo tratto a sezione costante (2), che permette la calibratura e che consente, tramite affilatura, di ripristinare le caratteristiche geometriche iniziali compensando fenomeni di usura dovuti a stress termici o meccanici.

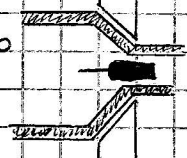
- Il terzo tratto divergente (3) che permette il progressivo rilasciamento del trafilato evitando eventuali sollecitazioni sulla trafilatura stessa.

Il processo è spesso eseguito a freddo avendo un'opportuna resistenza a trazione, evitando rotture e concentrando tutta la deformazione di riduzione della sezione e di allungamento all'interno della trafilatura stessa. La trafilatura a caldo viene usata per lavorare tubi provenienti dal processo Mannesmann e dal laminatoio a passo di Pellegrino. La trafilatura può avvenire in 3 modi:

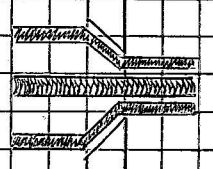
- **Trafilatura libera** Non si usano attrezzature nelle zone interne del tubo e il pezzo ottenuto ha molto spessore, poca precisione del diametro interno e c'è poca sollecitazione interna (relativamente agli altri tipi).



- **Trafilatura con spina ogivale** di dimensioni grossolane posta al centro del pezzo in corrispondenza della filiera e sostiene l'innalzamento. Funziona come un core e aumenta però le sollecitazioni a corso dell'attacco tra interno tubo e salma stessa.



• **Trafilatura con mandrino**, di diametro pari a quello interno del pezzo finale, che traslo in maniera solida al trafilato. La separazione dei due elementi avviene poi grazie al rivestimento elastico del trafilato o tramite rullatura.

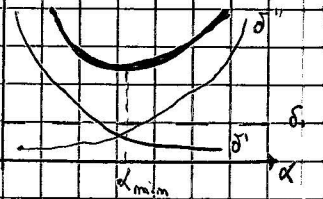


Il calcolo della forza di trafilatura e il dimensionamento della pilaia devono considerare la necessità di fornire un lavoro che deve coprire il lavoro ideale, quello dovuto agli attriti e quello ridondante (che causa anisotropia).

$$W_{TOT} = W_{ID} + W_{ATT} + W_{DIST.}$$

$$T = S_1 (\sigma_{ID} + \sigma_{ATT} + \sigma_{DIST.})$$

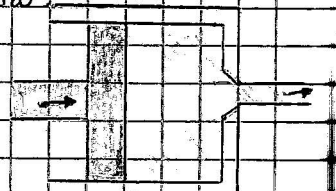
La forza di trafilatura si compone quindi di 3 componenti e può essere espressa in funzione delle sollecitazioni, dove la prima è costante, la seconda dipende dall'angolo di trafilatura α e la terza dipende sempre da α e dal materiale in lavorazione. Diagrammando le 3 sollecitazioni in funzione di α si può notare la presenza di un ottimo angolo di trafilatura che minimizza la forza di filo e il lavoro da spendere.



• Estrusione

Consiste nell'ottenere una deformazione plastica tramite applicazione di una sollecitazione di compressione di un massello metallico posto all'interno di un cilindro che, attraverso un pistone collegato a una pressa comprime il materiale da deformare. Si possono ottenere così prodotti con sezione completamente indipendente dal manello e il processo può avvenire sia a caldo che a freddo. Generalmente i materiali duttili (stagno, piombo) si estrudono a freddo, le leghe di alluminio a freddo o a caldo (a $350^\circ - 500^\circ$), il rame a caldo (1000°), l'acciaio a caldo ($1200^\circ - 1300^\circ$ con vetro fuso come lubrificante e un isolante termico tra manello e cilindro).

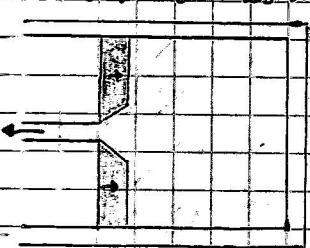
Nel caso di **estrazione diretta**, il materiale è compreso dal manello e costretto a passare in una matrice forata sul fondo del cilindro, per cui il manello avanza in maniera concorde alla fuoriuscita dell'estruso. L'attrito per la superficie interna del cilindro rallenta il flusso periferico del materiale che scorre più facilmente nella zona centrale, formando una cavità interna che avanza verso la matrice.



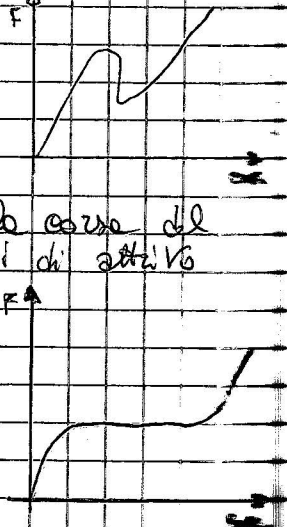
Essa può provocare difetti interni anche per un quinto della lunghezza dell'estruso se non ci sono ossidi, le parti premiate e le alte temperature salgono automaticamente nella cavità, in presenza di ossidi invece si ricorre a una brina un po' concava del pistone.

Il **coefficiente** che preme maggiormente si ha l'aspetto al centro, oppure si riduce il diametro del pistone (sottodimensionandolo) in modo che la parte di materiale sulle pareti fuoriesca inversamente all'avanzamento per estrusione inversa, formando la cosiddetta pelle. L'andamento della forza in funzione F della corsa presenta un picco che poi decresce (minore superficie di contatto) e poi riammenta sul fondo del cilindro per la resistenza ai flussi radiali.

Nel caso di **estrazione inversa**, il materiale è compreso dal manello che però è fisso, su cui è fissata la matrice. In questo modo l'estruso avanza in verso opposto alla corsa del pistone. In questo caso la riduzione degli effetti di attrito permette di avere un andamento della forza praticamente piatto e costante dal picco fino quasi alla fine del processo, dove aumenta per la resistenza ai flussi radiali.



In entrambi i casi la parte finale rimanente del materiale viene scartata dal processo di lavorazione.



TECNOLOGIA MECCANICA

Riassunto corso prof. Gaetano Palazzo

INIZIO II RIASSUNTO

Fonte: r0x.it

Riorganizzato da: Di Palma Felice

Data :07/09/2013

I MATERIALI

La diffusione di un materiale in un campo tecnico o l'altro, dipende da discorsi puramente economici. Dall'estrazione della materia prima al prodotto finito, i passaggi sono tanti ed i costi complessivi devono essere minimi. Alcuni materiali hanno elevati costi di estrazione e "purificazione", altri hanno elevati costi di lavorazione o distribuzione, altri ancora elevati costi di utilizzo o smaltimento. Tutte queste fasi sono legate alle caratteristiche chimiche - meccaniche - tecnologiche (ecc.) dei materiali. La lavorazione dell'acciaio è più costosa di quella dell'alluminio ma acquistare il greggio è più economico; però il volume necessario di alluminio è inferiore (a parità di resistenza strutturale). I materiali (acciai, leghe leggere...) che si trovano in commercio sono classificabili per caratteristiche meccaniche o chimiche, per impiego, per trattamenti termici subiti. (UNI 5322-70). Si dice inoltre acciaio legato, la lega in cui nessun materiale (che non sia il ferro) compare in percentuale inferiore al 5%. Viceversa (basta un solo elemento) si chiama l'acciaio legato. Legare gli acciai a piccole percentuali di altri materiali, comporta la modifica delle principali caratteristiche meccaniche e tecnologiche.

Il carbonio aumenta la durezza dell'acciaio, il carico di rottura, la resistenza all'usura e la temprabilità. Di contro diminuisce la plasticità a freddo, la tenacità, la saldabilità, la lavorabilità alle macchine utensili. Questo tipo di acciai presentano un'elevata velocità critica di tempra, rendendo difficile la tempra in profondità per pezzi di dimensioni notevoli.

Per il Manganese: aumento della durezza anche dopo dei trattamenti termici, aumento del carico di rottura, abbassamento della velocità critica di raffreddamento, però aumenta la sensibilità al surriscaldamento.

Per il Silicio: aumento della durezza, del carico medio di rottura, del limite elastico, e resistenza elettrica. Diminuisce la velocità critica di tempra ed anche la plasticità.

Per il Nichel: vedi Manganese

Per il Cromo: migliorie viste fin ora, specialmente riguardo durezza e resistenza all'usura, alla corrosione ed all'ossidazione al caldo.

Per il Tungsteno: aumento della resistenza a caldo, sensibilità al surriscaldamento, durezza e resistenza all'usura.

Per il Molibdeno: vedi Tungsteno

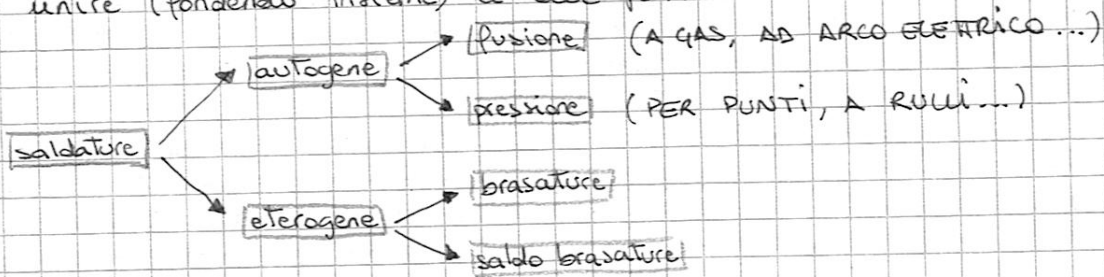
Zolfo, fosforo e Piombo: si cerca di ridurre la quantità perché peggiorano le caratteristiche dell'acciaio.

Per trattamento termico si intende uno o più cicli termici subiti da provini, al fine di modificare la struttura cristallina, la dimensione dei grani di solidificazione e quindi le caratteristiche del pezzo.

Si dice tempra diretta quel processo che vede il provino riscaldato in maniera quasi statica (soprattutto al cambio di struttura o forma allotropica), tenuto a temperatura di austenizzazione (2-10 ore) per poi subire un brusco raffreddamento. Le differenze di temperatura tra i vari stati del materiale, ed il cambio della struttura reticolare, genera non modeste tensioni interne al materiale. La struttura che si ottiene da una tempra, è la martensite (soluzione solida soprassatura di carbonio nel ferro α). Il rinvenimento serve proprio per evitare le tensioni interne dovute alla tempra; il ciclo termico è simile ma con picchi termici inferiori e raffreddamenti molto lenti, in forno.

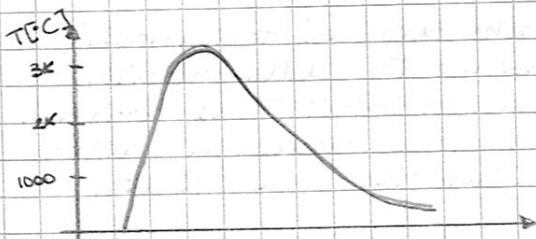
LAVORAZIONI PER SALDATURA

È detta saldatura l'operazione che porta all'unione permanente di due componenti meccanici. L'obiettivo comune dei vari processi, è di innalzare la temperatura nei punti di giunzione, creando la possibilità di unire (fondendo insieme) le due parti.



Nelle saldature autogene il metallo base (quello da saldare) prende parte alla saldatura stessa (fondendolo quindi), mentre nelle eterogene il giunto è interamente formato da materiale d'apporto. Quest'ultimo può essere presente o meno invece nelle prime.

SALDATURA A GAS



La sorgente di calore per questo tipo di saldatura è la combustione tra un gas e l'ossigeno. Il gas utilizzato deve avere queste caratteristiche:

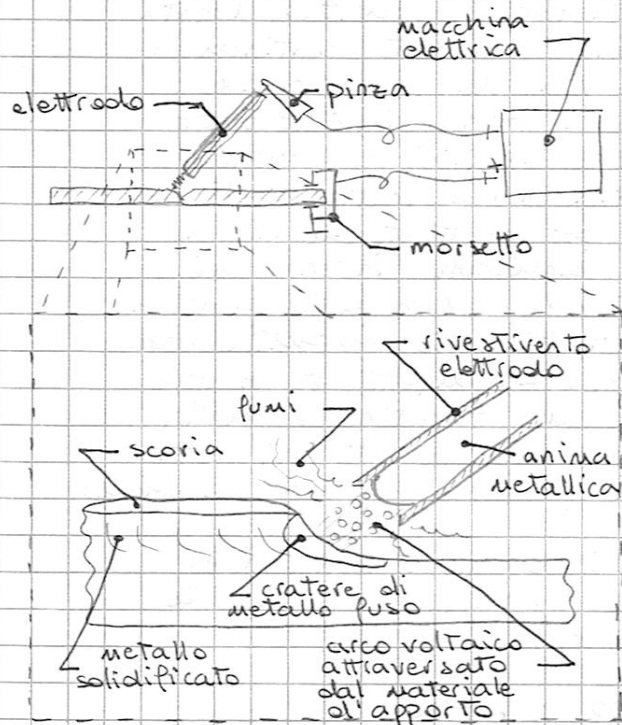
- alta temp. di fiamma
- alto contenuto energetico chimico
- poca reattività con metallo base e quello d'apporto.

Un gas che rispecchia queste caratteristiche è l'acetilene (C_2H_2). I prodotti della sua combustione sono riducenti, e ciò permette l'assorbimento dell'ossigeno dall'aria che circonda la zona di saldatura, e questo evita l'ossidazione

del metallo base. La fiamma dell'acetilene è descrivibile suddividendola in tre zone (come in figura). Il dardo è bianco ed è la zona di combustione dell'acetilene con l'ossigeno. La zona di saldatura è la parte della fiamma con la giusta temperatura (rilascia il 65% di tutto il calore della fiamma) e quindi quella usata per saldare. Nel fiocco si concentrano i prodotti della reazione tra ossigeno e reagenti della prima reazione (nel dardo) ed è una zona ossidante. Da precisare che questa è la descrizione di una fiamma neutra, o meglio, di rapporti stechiometrici tra i reagenti. Un eccesso di ossigeno rende la fiamma blu ed ossidante; un dardo più lungo ed un fiocco giallo è la caratteristica di una fiamma carburante, cioè in eccesso di acetilene.

È da evidenziare la pericolosità dell'acetilene che già a 1,5 bar è esplosivo se compresso. Per conservarlo in bombole, è necessario riempire la bombola di materiale poroso (carbone di legno, calcio) che rilascia l'acetilene poco alla volta nella bombola. Altra nota di sicurezza è legata al cannello che deve avere una velocità di fornitura del gas, superiore a quella di propagazione della fiamma. Nel caso di spessori ridotti, la saldatura a gas non richiede materiale d'apporto. Diventa lenta e costosa, come operazione, per saldature profonde, non essendo un metodo con buona penetrazione. Per queste saldature, infatti, si rende necessario cianfrinare e del materiale di apporto. È usata spesso per acciai a basso tenore.

LA SALDATURA AD ARCO ELETTRICO

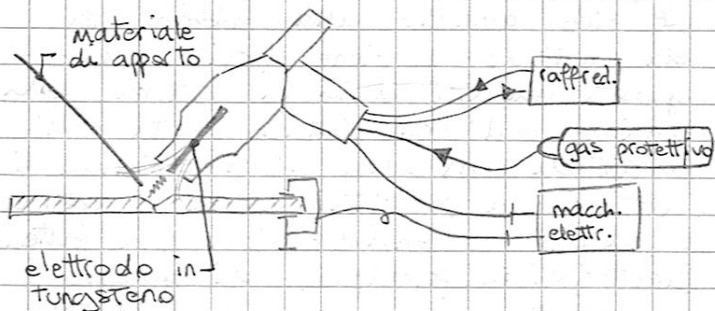


Questo metodo manuale di saldatura è il più usato. Il calore necessario a fondere (e saldare) il materiale, è ricavato da un arco elettrico che scocca tra l'elettrodo ed il metallo base. L'elettrodo è fatto per essere usato come materiale di apporto ed è il lato ~~negativo~~ ^{positivo} del circuito. Un bilancio energetico mostra che i $\frac{2}{3}$ del calore, si concentra sul polo positivo dell'arco elettrico, dato il bombardamento di cariche elettriche che riceve. (Si raggiungono anche i 6000 gradi per correnti di centinaia di Ampere). L'elettrodo è formato da un'anima di metallo, tecnologica, simile a quello base, ed un rivestimento che produce fumi, per isolare la zona di saldatura, e composto di materiale che reagisce con le componenti impure del metallo

base, creando la zona di scoria che protegge la saldatura da raffreddamenti improvvisi ed ossidazione. L'anima, inoltre, fonde a temperatura superiore, assumendo la forma in figura e permettendo di non disperdere calore e flusso di elettroni.

La macchina elettrica può essere a corrente continua o alternata. La prima è più costosa, permette giunti regolari, una deposizione dolce e arco elettrico regolare; presenta però il difetto del soffio magnetico che rende non controllabile l'elettrodo. L'alternata permette di mostrare alcune caratteristiche o altre a seconda della polarità (deposizione oraria, contro penetrazione); inoltre il soffio magnetico è limitato e si possono usare intensità di correnti superiori (e quindi anche elettrodi di sezione maggiore). Questa tecnologia è usata per saldare molti materiali, anche di spessori diversi; è economica e veloce. I contro sono la necessità di sostituire l'elettrodo e pulire la scoria ad ogni ciclo; e la scarsa protezione contro l'ossidazione. Inoltre la corrente minima per la stabilità dell'arco è comunque troppo alta per saldare su piccoli spessori (tubi, lamiere).

SALDATURA A PROCEDIMENTO T.I.G.



(Tungsten, inert, gas) è comunque una saldatura ad arco elettrico ma questo scocca tra materiale base ed un'anima di tungsteno. L'elevato punto di fusione di questo materiale non lo rende partecipe alla saldatura e infatti per parti di spessore superiore al millimetro è necessario il

materiale d'apporto. Dalla pistola fuoriesce del gas (argo o elio) che protegge dall'ossidazione la zona di saldatura. Dato che l'arco elettrico si propaga attraverso il gas protettivo, oltre al flusso di elettroni dal polo negativo al positivo, ci sarà un flusso ionico positivo verso il polo negativo.

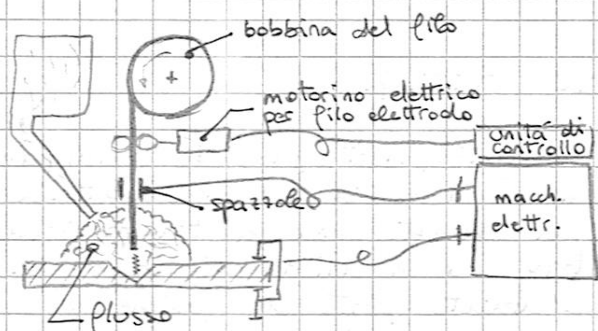
Per le saldature Tig è possibile scegliere un'alimentazione a corrente continua o alternata in entrambe le polarità. Questa scelta dipende dal materiale da saldare. In corrente continua e polarità diretta (elettrodo polo negativo) il 70% del calore ricade sulla zona da saldare e la penetrazione è buona. Dato il basso suriscaldamento del tungsteno si raggiungono densità di corrente dell'ordine di 60 A/mm². La polarità inversa non è praticamente utilizzata se non per l'azione distruttiva per lo strato di ossido superficiale. In corrente alternata nella semionda inversa si sfrutta il vantaggio della pulizia dell'ossido ed in quella positiva i vantaggi della config. diretta. Infatti un bilancio energetico vede il 80% di calore concentrato sull'elettrodo. Il difetto è un arco elettrico poco stabile perché l'emissione del tungsteno è quella del metallo base e diversa. Sovrapponendo una corrente di alta tensione e bassa corrente (la stessa usata per scoccare l'arco iniziale) si risolve il problema.

Questo tipo di saldatura è costosa e quindi giustificata solo per applicazioni pregiate o là dove l'arco elettrico tradizionale non eccelle (esempio saldatura leghe leggere).

SALDATE A PROCEDIMENTO MIG e MAG

Il processo è simile al Tig (ed anche la pistola) solo che in questo caso l'elettrodo è fatto di materiale da apporto. L'elettrodo è legato ad una bobina e quindi non va cambiato e ne si accorcia perché continuamente sostituito. Il MIG usa dei gas inerti (costosi, elio argon) mentre il MAG a protezione della zona di saldatura (metal active gas) usa un gas reagente con il metallo (di solito l'economica CO₂) e quindi l'elettrodo deve avere caratteristiche differenti. L'alimentazione è in continua polarità inversa perché l'alternata rende troppo instabile l'arco elettrico e poi il calore deve essere concentrato sull'elettrodo perché è fatto di materiale di apporto. Le macchine sono costose e fisse (non portatili) però il processo è più veloce, e penetrante dell'arco voltaico normale. La velocità di raffreddamento del cordone è alta e per alcune applicazioni la cosa può creare non pochi problemi di tipo tecnologico.

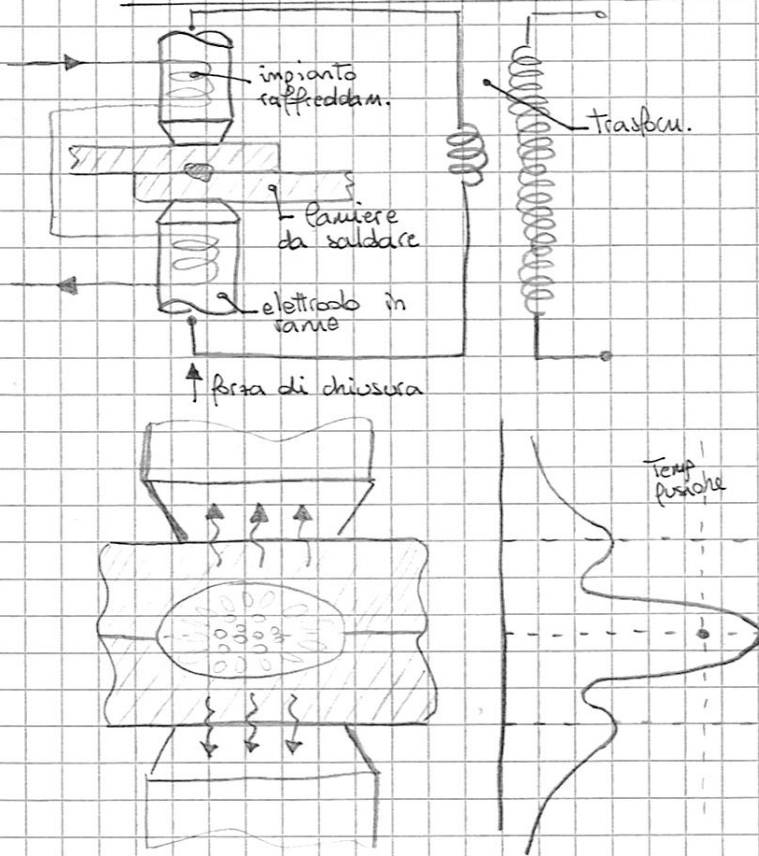
SALDATA IN ARCO SOMMERSO



È un processo del tutto automatico e punta alle produzioni in serie. Il filo avvolto alla bobina fa da elettrodo e viene fornito alla giusta velocità data la lettura della tensione dell'arco elettrico fatta dall'unità di controllo. L'alimentazione è continua a polarità inversa o alternata e valgono le considerazioni già fatte. Caratteristica principale di questo

tipo di saldatura è l'immersione completa della zona di saldatura in un composto granuloso detto flusso. Detto flusso serve per proteggere da ossidazione e anche per creare la scoria che permette un lento raffreddamento del giunto. Il risultato è proprio un giunto dalle buone caratteristiche meccaniche. Questo metodo di saldatura è usato per giuntare gli acciai (anche inox) e nichel e le sue leghe. Poco usato per le ghise e le leghe leggere.

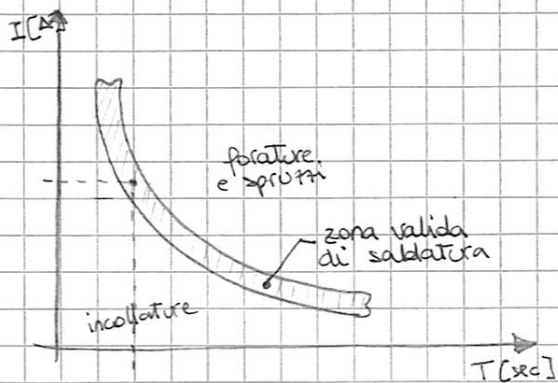
SALDATURE PER RESISTENZA ELETTRICA



Imponendo una grossa corrente attraverso le lamiere da saldare, per effetto Joule la temperatura si innalza, fino a superare quella di fusione, in una ristretta zona tra le lamiere. La resistenza opposta dal materiale presente tra i due elettrodi dipende dalla pressione alla quale è sottoposto. La resistenza è quindi maggiore lontano dagli elettrodi, inoltre in quella zona la dissipazione del calore è limitata e la curva di temp. assume la forma che ha in figura 2. Solo dove si supera la temp. di fusione, avviene la saldatura. Oltre a pressione e intensità di corrente, il parametro libero nelle mani del progettista è il tempo di esposizione a corrente. Ovviamente a tempi lunghi corrispondono basse intensità di correnti e viceversa e tra le due

alternative è preferibile la seconda: il motivo è legato alla conduzione termica che portando calore nella zona di contatto con gli elettrodi, fa plastificare il lato sottoposto alla forte pressione, con conseguenze antiestetiche. Per basse correnti e tempi, si ottengono finte saldature; viceversa si rovinano le parti da saldare. Nel quarto disegno c'è un esempio di saldatura a punto per un acciaio legato; il preriscaldamento serve ad evitare bruschi ~~canali~~ gradienti termici nel materiale e la persistenza della pressione serve per migliorare le caratteristiche del punto di saldatura.

Questa tecnologia è utilizzata per i grandi volumi di produzione e fa dove non servono caratteristiche di giunzione elevate. Si possono saldare gli acciai (anche inox), leghe leggere e quelle di rame. Il costo delle mach. è elevato ed anche l'assorbimento. Inoltre la saldatura non garantisce la tenuta ai fluidi.



LE SALDATURE ETEROGENEE (BRASATURE E SALDOBRAZATURE)

Le saldobrazature prevedono la cianprintratura dei due pezzi da giungere ed il preriscaldamento della zona. Dopo aver raggiunto la temperatura di fusione del materiale d'apporto (più bassa di quello base) si aggiunge appunto il materiale saldante. Questo fonde e, avendo buona scorrevolezza, riempie le zone cianprintrate per poi solidificare. Il giunto ha caratteristiche elastiche e si possono saldare anche materiali molto diversi tra loro. La brasatura, invece, non presenta cianprintratura ed i giunti sono meno elastici e meno resistenti.

CARATTERISTICHE E MATERIALI DEGLI UTENSILI

Qualsiasi oggetto per funzionare deve avere delle determinate dimensioni; lavorare i grezzi per ottenere questi pezzi comporta dei costi e l'analisi dei materiali per costruire gli utensili, è necessaria al fine di ridurre questi costi. La produttività di una macchina è direttamente legata alla velocità di taglio, e questa può essere elevata solo se i materiali lo permettono. Le caratteristiche che deve avere un utensile da taglio sono le seguenti:

- **durezza a freddo**: è la resistenza che oppone un provino di quel materiale, nell'essere penetrato da un altro materiale. A freddo vuol dire a temp. ambiente. Questa caratteristica è migliorabile con i trattamenti termici e con opportuni elementi di lega.
- **durezza a caldo**: è la resistenza come definita sopra, ma alla temperatura di lavoro o di regime. Alte velocità di taglio sono ottenibili solo se i materiali degli utensili conservano le loro caratteristiche alle elevate temperature.
- **tenacità**: è la capacità di resistere agli urti; è fondamentale per gli utensili delle lavorazioni a taglio interrotto o per le flessature. È una caratteristica complementare alla durezza.
- **autolubrificante**: è una caratteristica che ingloba la resistenza all'usura, il coefficiente di attrito e la conducibilità termica. Sono tutte caratteristiche legate ai costi di lavorazione, intesi come costi dei materiali, riaffilature, potenze istantanee...

Ecco una sintesi dei materiali usati per gli utensili:

materiale	componenti	caratteristiche e note	(produzione)	(applicazioni)
acciaio speciale al carbonio	Ferro e carbonio	Tenaci, lavorabili. Non duro a caldo e non resistente all'usura. Usato per applicazioni di finitura e bassa velocità. Conserva le sue caratteristiche fino a circa 250°C.		
acciaio debolmente legato. (< 5%)	Ferro, carbonio Tungsteno, Molibdeno (per la durezza) Cromo e Vanadio (usura e tenacità)	Come sopra ma conserva caratterist. fino a 300°C ed era caratt. tecnologiche leggermente superiori.		
acciaio per tem. legato (> 5%)	Ferro, carbonio, tung., molibdeno, cromo, vanadio, cobalto.	Sono detti rapidi o super rapidi (se c'è cobalto). Ha tutte le caratt. degli acciai sopra ma li conserva fino a 500°C. Resistente all'usura. È alla base della rivoluzione industriale. Attualmente usati per piccole produzioni dove non sono giustificati i costi degli altri materiali.		
leghe pure o stellite	Cobalto (50%), cromo, Tungsteno	Resistenza all'usura, fragile e duro a caldo. Meno duro degli acciai ma necessita di stelliteaggio. Conserva caratteristiche fino a 850°C. Non più in uso ma è stato necessario per ottenere e lavorare i materiali più pregiati.		
Carburi metallici sintetizzati	carburo di tungst. (90%), carburi di Tantalio (usura) Tantalio (durezza) niobio (ossidaz.)	Molto duri e conservano le caratt. fino a 1000°C. Elevata resist. all'usura, durezza a caldo ma molto fragili. Non tenaci. Vengono chiamati <u>stellite</u> , come il <u>diamante</u> dal tedesco, e vengono prodotti per sinterizzazione. Per tenacità e costi vengono usati come inserti su steli acciaiati.		
Materiali ceramici	Ossido di alluminio (99%) e di cromo e silicio	Resistenti all'usura e duri a caldo (1000°C) ma molto fragili. Refrattori. Ottenuti per sinterizzazione. Necessitano di macchine stabili, elevate velocità e poche sollecitazioni a taglio.		
Cermets (ceramic, metals)	Ossido di alluminio (60%) e carburi di molibdeno, cromo e vanadio	Compromesso tra materiali ceramici e metallici. Anche questi sono fragili in ogni caso. Ottenuti per sinterizzazione.		
Diamante	ottenuti per sintesi dalla grafite o per sintesi dalle polveri di diamante	È costoso, il più duro in natura. Molto fragile. Resistente all'usura e minimi attriti e quindi elevatissime velocità di taglio. Lavori di finitura con tolleranze piccolissime.		

STELLITAGGIO, INSERTI, SINTERIZZAZIONE.

Sono tutti i processi attuati per ovviare alla fragilità di alcuni materiali. La sinterizzazione invece è il processo di produzione diffuso per gli inserti di materiali ceramici, carburi e cernets.

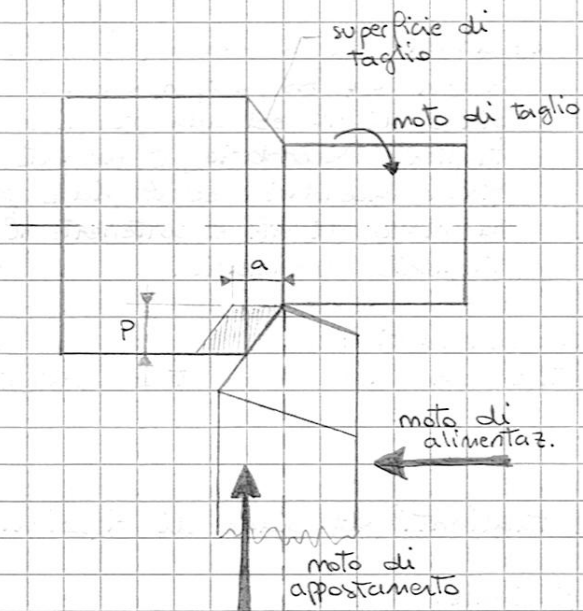
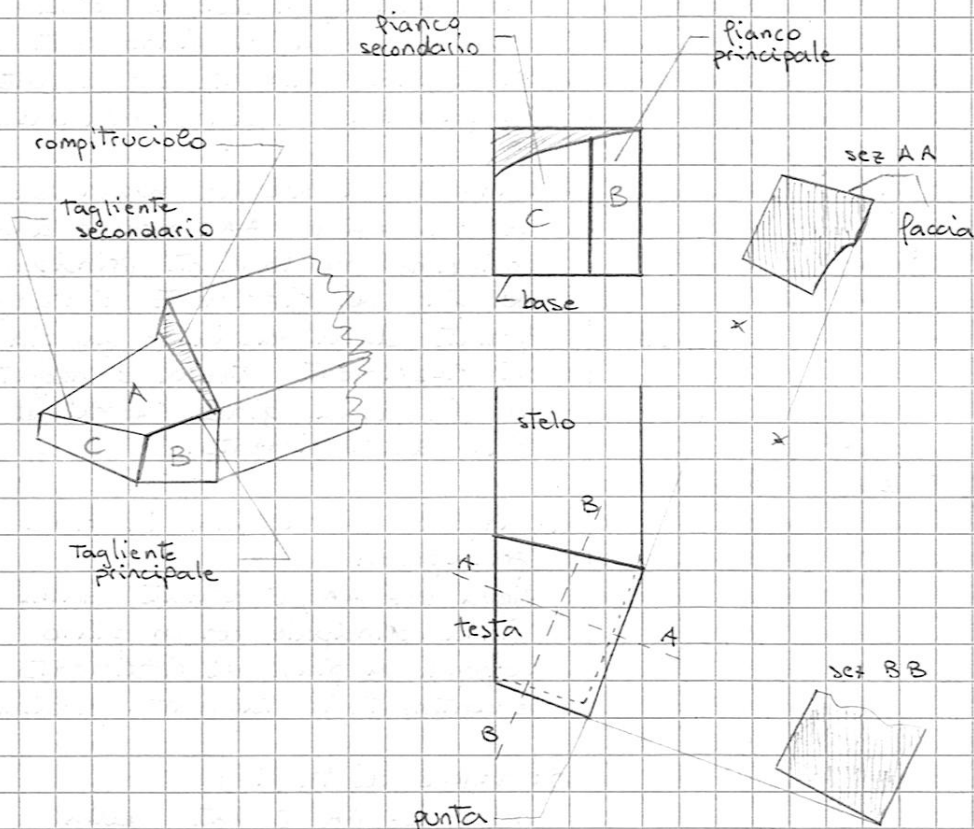
Lo stellite è usato per le leghe pure. Risulterebbero fragili nell'utilizzo negli steli e quindi solo la zona degli utensili è ottenuta in lega e poi fusa insieme allo stelo.

Per quanto riguarda carburi, mat ceramici, diamanti [C...] questi vengono usati per costruire gli inserti e poi legati meccanicamente allo stelo acciaio (anche per problemi di costi). Possono essere usate delle viti o delle lre, ma ciò richiede il foraggio degli inserti con la conseguente perdita delle caratteristiche meccaniche; oppure una staffa, con creazione però di un ostacolo al percorso del Truciolo.

La sinterizzazione è una successione di processi per polverizzare, mescolare e fissare i materiali che altrimenti non si potrebbero unire per fusione. Per la creazione di carburi metallici, ad esempio, i processi sono i seguenti:

1. Riduzione del triossido di tungsteno, in forno a 950°C , per ottenere la polvere di Tungsteno.
2. Unito a nero fumo (puri di carbonio) a 1500°C in forno vien fuori il carburo di Tungsteno.
3. Mescolato con cobalto in polvere ed anche con eventuali altri carburi.
4. Una prima compressione a freddo per dare la forma.
5. Pre-sinterizzazione a 1000°C per dare omogeneità.
6. Sinterizzazione finale a 1500°C .

NOMENCLATURA UNIFICATA DEL TAGLIENTE (UNI-3401-3405)



stelo: parte dell' utensile non finemente lavorato, all'estremità del quale viene ricavata la testa.

testa: parte dell' utensile lavorato per eseguire il taglio

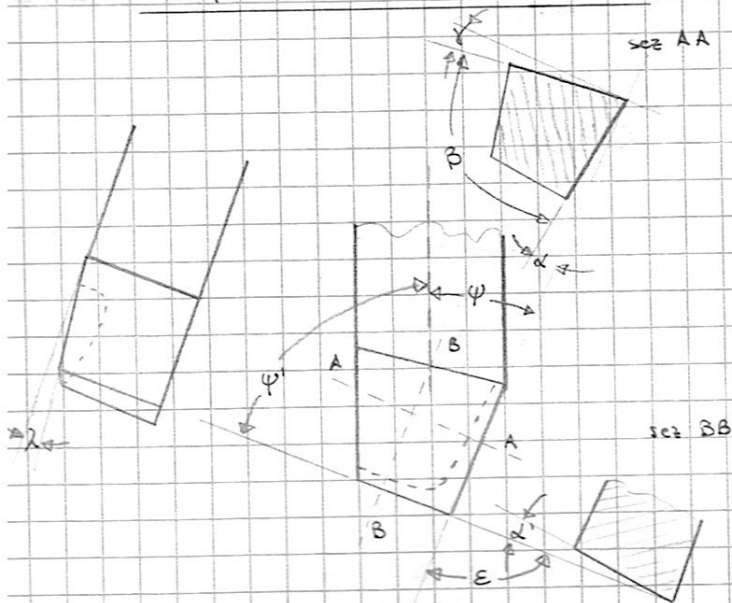
faccia o petto: zona dove si forma il truciolo, e dove vi scorre (A)

Pianchi: superfici attive della testa; il principale è quello che agisce sulla superficie di taglio, il secondario sulla superficie lavorata

moto di lavoro: è il moto elicoidale risultante del moto di alimentazione e quello di taglio.

profilo: è la linea costituita dai due taglienti.

ANGOLI CARATTERISTICI



Come riferimenti per la definiz. degli angoli, si scelgono l'asse dello stelo ed un piano (detto di riferimento) passante per la punta e parallelo al piano della base.

γ : angolo di spoglia superiore: in una sezione AA normale alla proiezione del Tagliente principale sul piano di riferimento, è l'angolo formato dalla faccia e dal piano di riferimento stesso. È negativo se la faccia giace "sopra" al piano di riferimento.

χ : angolo di spoglia inferiore principale: Nella sez AA, è formato dal piano principale con un piano perpend. al piano di riferimento e contenente il tagliente principale

β : angolo di taglio: nella sez AA è dato dalla seguente relazione:

$$\alpha + \gamma + \beta = 90^\circ$$

α' : angolo di spoglia inferiore secondario: in una sez BB, perpendicolare al piano di rif ed alla proiezione del tagliente secondario, è formato dal piano secondario ed il piano perpend. al piano di rif. e contenente il tagliente secondario.

ψ e ψ' : angoli dei Taglienti principale e secondario: è formato dal tagliente corrispondente con l'asse dello stelo, proiettati sull'asse di riferimento.

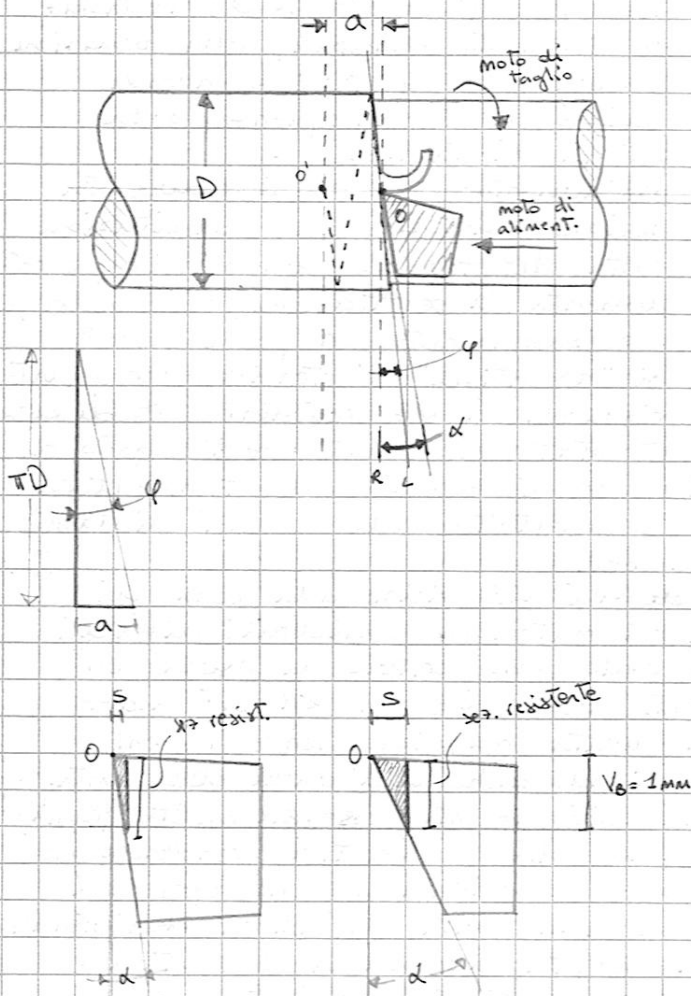
ϵ : angolo dei taglienti: formato dalle proiezioni dei due taglienti sul piano di riferim.

λ : angolo di inclinazione del tagliente principale: formato dal Tagliente princ. con il piano di riferimento. Anch'esso è negativo se il tagliente si trova al di sopra del piano di riferim.

χ e χ' : angoli di registrazione dei taglienti: angolo formato dal tagliente primario con la superficie da lavorare, proiettati sul piano di riferimento, e corrispettivan. del secondario sulla sup. lavorata.

GEOMETRIA DELL' UTENSILE

Angolo α di spoglia inferiore principale:



È detto angolo φ del moto elicoidale quello formato dal piano perpendic. all'asse del pezzo e la traccia α percorso obliquo dell'utensile. Questo angolo è dovuto alla combin. del moto di taglio e di alimentaz. ed è dato da

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a}{\pi D}$$

ed assume valori intorno al 1° per la maggior parte delle lavorazioni di Tornitura.

Data la presenza di questo angolo, si comprende che α deve essere maggiore di φ perché se fosse più piccolo, il tagliente (o meglio la punta) non toccherebbe il materiale che invece incrudirebbe e schiaccerebbe con la spoglia principale. Non ci sarebbe taglio. Con $\varphi = \alpha$ il tagliente "aderirebbe" alla superficie da lavorare con forti strusciamenti ed innalzamenti di Temperatura.

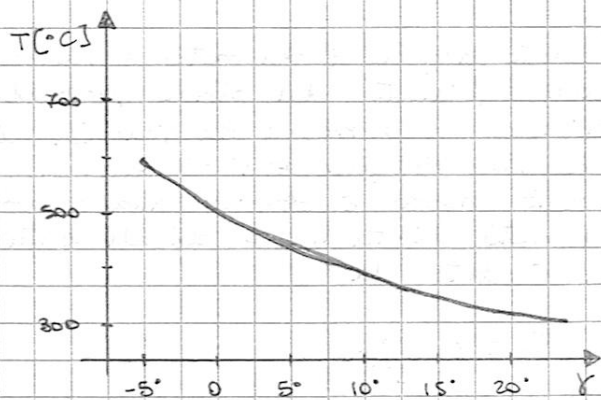
Si comprende quindi che $\alpha > \varphi$ e se φ è circa 1° , α partirà da circa 2° dato il ritorno elastico posseduto da alcuni materiali.

Per quanto riguarda il valore di α , esso dipende dal materiale sia dell'utensile che del pezzo da lavorare; più nel dettaglio, la cosa è legata alla sezione resistente che oppone l'utensile allo sforzo di taglio compiuto dal truciolo. Un aumento di α riduce questa sezione (fino ad un limite di rottura) ma aumenta la durata. Viceversa per un α piccolo. Secondo Opitz e la letteratura, l'usura ammissibile per un qualsiasi utensile è di circa 1mm. Si vede come in figura un α grande offre maggiore durata e minor resistenza agli sforzi di taglio. Per un utensile duro e tenace, che lavora del materiale morbido, si raggiungono angoli di spoglia inferiore principale anche di 14° .

Angolo α' di spoglia inferiore secondario:

Valgono le stesse considerazioni (relative al compromesso) fatte per l'angolo α data la presenza del ritorno elastico anche nella zona vista dalla spoglia secondaria, e dato lo strusciamento di truciolo sulla faccia derivante anche dalla lavorazione (secondaria) del tagliente secondario.

Angolo γ di spoglia superiore



Quest'angolo è determinante, insieme all'angolo α di inclinazione del tagliente principale, nella formazione e scorrimento del truciolo, avendo quindi dirette conseguenze sulla potenza di taglio.

All'aumentare di γ si riduce la sezione resistente alla sollecitazione fatta dal truciolo sull'utensile, però aumenta la penetrazione, o volendo, lo scorrimento. In poche parole si "appuntisce" l'utensile. Per quanto riguarda la sez. resistente il discorso è stato affrontato per l'angolo α .

Per lo scorrimento invece, c'è da dire che è legato alla temperatura che raggiungerà la zona di taglio e soprattutto alla velocità di taglio che potrà essere superiore per γ piccoli.

Aumentando γ , il cratere di usura sarà più vicino alla zona di taglio (cosa ancora più accentuata per i materiali considerati difficili da tagliare) e dato il rapporto K_T/K_H usato come criterio di usura, un



angolo γ elevato vuol dire un K_H più piccolo e quindi una durata maggiore. Tenere in mente però che K_H dipende anche dall'usura della punta. Per i materiali più recenti, essendo molto fragili, si utilizzano spesso dei γ negativi, rendendo lo sforzo del truciolo esclusivamente uno sforzo di compressione. La cosa evita la rottura dell'utensile

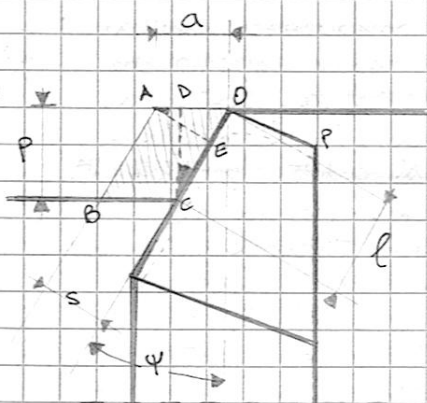
ma, come abbiamo visto, riduce la durata, aumenta la temperatura e la potenza necessaria. Spesso si ricorre a questo inconveniente, creando uno smusso di circa $0,2 \div 0,4$ a con angolo negativo, per poi ridiventare γ positivo e sfruttare entrambi i vantaggi. Questo smusso ha una funzione antivibrante (rendendo elevato lo sforzo F_y) e soprattutto una funzione rinforzante per lo spigolo dell'utensile.

γ va da un minimo di -6° per utensili fragili e duri che lavorano materiale "difficile da tagliare" a $+30^\circ$ per materiali meno duri che devono "penetrare" facilmente in quelli "difficili da tagliare". Per combinazioni meno estreme si ottengono angoli meno estremi.

Angolo β di Taglio:

È direttamente legato a γ ed α ed è indice di robustezza. Valgono tutte le considerazioni fatte finora, per gli angoli della sezione normale.

Angolo ψ del tagliente principale



Questo angolo è legato alla F_y , forza di repulsione che il pezzo esercita sull'utensile e tutto il complesso della macchina che lo regge. Questa forza, diretta lungo l'asse di rif. dell'utensile, è importante per eliminare i giochi tra vite e madrevite di avanzamento e tutti i restanti del blocco utensile-braccio-macchina. Per una $\psi=0$, l'utensile si dice a coltello ed è fondamentale per creare gli spallamenti sui cilindri. L'inconveniente è una F_y tendente a ∞ . Solo la presenza del raccordo nel punto O e la parte di truciolo asportata dall'utensile secondario (ritorno elastico) rendono questa F_y

non uguale a ∞ permettendo l'utilizzo degli utensili a coltello. Dalla figura si nota che:

$$s = a \cdot \cos \psi$$

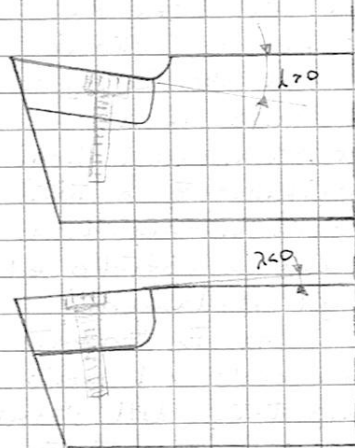
$$l = \frac{P}{\cos \psi}$$

si deduce che lo spessore del truciolo diminuisce all'aumentare di ψ e dato che la durata di un utensile è legata anche allo spessore del truciolo (molto di più che alla lunghezza) un ψ grande vorrà dire maggior durata, e quindi più alte velocità di taglio raggiungibili. Tutto porta a pensare che si devono adottare ψ più grandi possibile, però oltre un certo limite l'utensile rifiuta di penetrare e tagliare il pezzo, strisciando su di esso. Inoltre un ψ grande vuol dire F_z (forza principale di taglio) grande ed anche F_y , e se raggiungono valori eccessivi possono deformare plasticamente l'utensile o il pezzo. Ergo, nel caso di spallamenti di pezzi non troppo rigidi ($lunghezza/diametro \leq 6$) si può usare un utensile a coltello, mentre per lavorazioni normali si può usare un $20^\circ < \psi < 70^\circ$, crescente al crescere della rigidità del gruppo macchina-pezzo-utensile.

Angolo ψ' del Tagliente secondario:

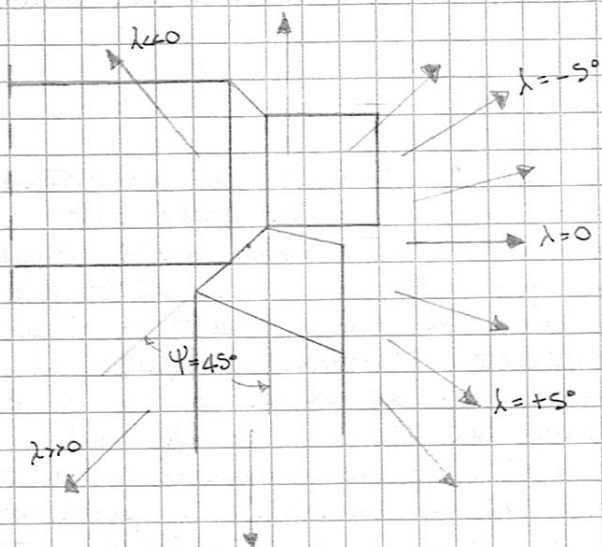
Insieme a ψ definisce l'angolo ϵ che è legato alla robustezza dell'utens. e quindi deve essere il più grande possibile. Il limite è la compatibilità con χ' che deve essere tarato per l'operazione di finitura del tagliente secondario.

Angolo λ di inclinazione del tagliente principale.

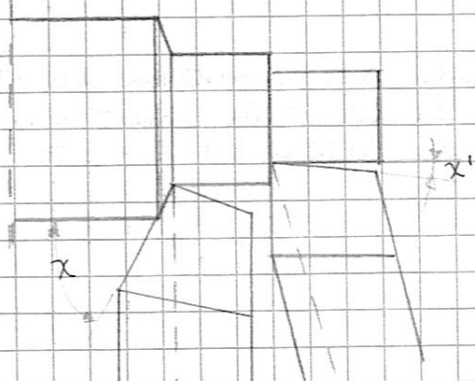


Quest'angolo ha diretta conseguenza sulla direzione del truciolo e sullo sforzo che il pezzo esercita sull'utensile. Così come per il discorso dell'angolo γ di spoglia superiore, un λ negativo si adotta per sollevati. E' utensile solo a compressione. Per quanto riguarda la direzione del truciolo, quando questo è continuo, è fondamentale sapere in che direzione si crea e viene spinto. Il truciolo continuo è tagliente e rovente e può provocare danni all'utensile, al pezzo e anche all'operatore della macchina.

Un λ negativo (per un utensile a coltello) spinge il truciolo verso il pezzo, viceversa per un λ positivo. Per $\psi = 45^\circ$ ad esempio, in figura si può vedere la direzione di evacuazione del truciolo continuo. In conclusione, dobbiamo assumere un λ negativo, per inserti fragili e trucioli non continui o che in ogni caso non rechino problemi se rivolto verso il pezzo; un λ positivo se è prioritario allontanare il truciolo; un $\lambda = 0$ quando non abbiamo nessuna particolare esigenza perché l'affilatura di un utensile si rende più semplice con questa geometria. ($-15^\circ < \lambda < 15^\circ$)



Angoli λ e λ' di registrazione:

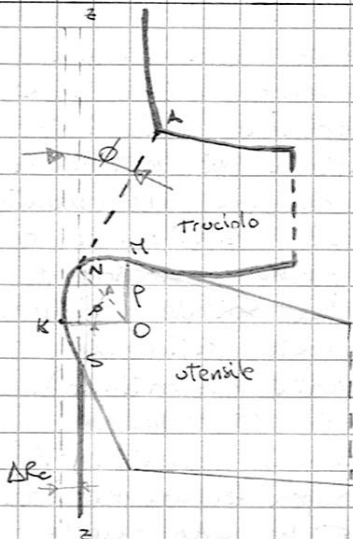


Fissati ψ e ψ' questi due angoli (λ e λ') sono legati all'orientazione dell'utensile e del suo asse di riferimento. Sono, insieme all'avanzamento ed al raggio di raccordo dell'utensile, stabiliscono la geometria del pezzo lavorato e cioè la rugosità superficiale (teorica). R_a ed R_t , rugosità media aritmetica teorica e la rugosità totale teorica sono i due valori spesso usati per valutarla.

$$R_a^* = \frac{R_t^*}{4}$$

A seconda se l'utensile taglia esclusivamente con il raggio di raccordo o con gli utensili spigoli primario o secondario, R_t^* in relazione ai λ varia diversamente; ma in generale diminuisce al diminuire di λ' . Essendo comunque due angoli complementari supplementari alla somma di ψ e ψ' , valgono tutte le relazioni prima esposte.

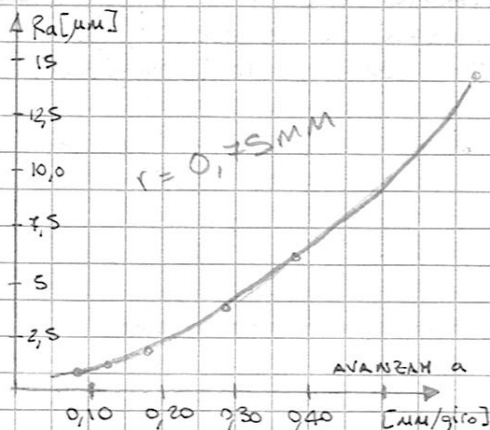
IL DIMENSIONAMENTO DELLA PUNTA IN BASE ALLA FINITURA



La rugosità reale (e quindi quella misurata) è molto distante dal valore aritmetico medio o totale teorico, che vien fuori dalle analisi geometriche della zona dell'utensile che affonda nel materiale. Le cause sono molteplici e principalmente attribuibili a:

- ritorno elastico del materiale lavorato
- rugosità propria dell'utensile
- non rigidità della macchina
- strisciamento con la faccia
- deformaz plastiche nella zona di taglio.

Per le lavorazioni di finitura la componente della def plastica è trascurabile, ma rimane apprezzabile il ritorno elastico. Questo fenomeno causa anche un aumento del 10% del valore della rugosità media misurata. La presenza del ritorno elastico è dovuto al raggio di raccordo spesso presente al posto delle punte, e dovuto alle affilature. Guardando la figura, ci si rende conto che ad avere un ritorno elastico è la porzione di materiale a sinistra dell'asse z (passante per N, centro di ~~base~~ tensione massima a lavorazione iniziata) spinta lateralmente dall'utensile, ad una deformaz elastica che poi in S (punto di disimpegno del fianco) vede completamente annullarsi. Il materiale a destra di z



invece, scorre lungo NA (piano di scorrimento) per poi separarsi dal resto. L'angolo ϕ formato da NA e l'asse del pezzo (direzione di avanzam) è detto angolo di scorrimento. Tenendo conto che il ritorno elastico di una valle è diverso da quello di una punta, ed effettuando le dovute considerazioni geometriche, si riscrivono le dipendenze tra la rugosità ed il raggio di raccordo, gli angoli $[\phi, \alpha]$.

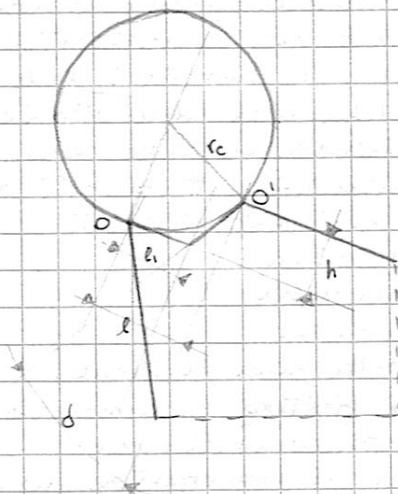
Per un utensile senza raccordo, le relazioni geometriche confermano che il diminuire degli angoli di registrazione, e dell'avanzamento, diminuisce la rugosità media teorica. Però per un avanzamento decisamente piccolo, e angoli α accettabili, il solo valore di rugosità teorica supera i $12 \mu m$, valore limite di operazioni definite di sgrossatura! È stato necessario, quindi, introdurre i raccordi ed una relazione empirica dell'andamento di Ra in relazione ad a (in figura) ne mostra i vantaggi. Per gli utensili dove non è più possibile definire la punta, si usa il finishing point che sarebbe il punto più sporgente (anche se parte dell'arco di raccordo) dell'utensile.

Considerando che l'aumento del raggio di raccordo, causa una riduzione di rugosità ed anche un irrobustimento dell'utensile, si può pensare di renderlo più grande possibile; però se diventa troppo ampio, la porzione di utensile a strisciare sul pezzo aumenta e rende lo spessore nel finishing point troppo sottile fino a vedere l'utensile, rifiutare l'affondo nel materiale in quella zona, con conseguente incrudimento e peggioramento delle finitura superficiali. Inoltre aumenta troppo la potenza di taglio necessaria.

In generale si segue la regola di piccoli avanzamenti e raggi di raccordo intermedi per lavori di finitura. ($r = \text{circa } 1,5 \div 4$ avanzamento).

Per ovviare ad alcuni dei difetti di questi utensili, si sono sempre più diffusi gli smussi. (+10 ÷ 30% durata; -5 ÷ 20% potenza di taglio)

IL ROMPI TRUCIOLO



Dare una forma particolare alla faccia dell'utensile, permette di rendere discontinuo un truciolo continuo. Abbiamo già visto gli effetti negativi potenziali di un truciolo continuo, e questi si accentuano all'aumentare della velocità di taglio. Il rompi-truciolo è detto anche convatruciolo perché costringe il diametro di creazione della spirale a ridursi, fino ad essere inferiore al raggio critico di rottura (e il truciolo diventa discontinuo). Il rompi-truciolo non è altro che un gradino ricavato direttamente dall'inserto o apposto con una vite sopra la sua faccia. Le dimensioni caratteristiche sono quelle in figura e la relazione tra h ed ϕ , insieme all'imposizione di tangenza in O ed O' , fa sì che il raggio critico abbia valori prefissati

e catalogati da esperienze di laboratorio. Il raggio critico è strettamente legato ai parametri di lavorazione, quali profondità di passata, avanzamento, velocità di taglio, angoli dell'utensile...

LA RELAZIONE DEL TAYLOR

Quella generalizzata è una formula a determinazione empirica delle incognite, che lega la velocità di taglio e la durata dell'utensile.

$$v T^n a^m p^r = V^* = \text{cost}$$

v è la velocità di taglio legata a quel tempo di usura

T è la durata dell'utensile in minuti netti di servizio

a e p li conosciamo

V^* è una costante detta velocità specifica di taglio e dipende dagli altri parametri di taglio.

La relazione ha lo scopo di farci avere un'idea della durata dell'utensile avendo imposto gli altri parametri di taglio. Per valutare m , r , n e V^* si procede per prove:

- si fissano tutti i valori di tagli che non compaiono nella relazione
- si scelgono delle coppie di valori a e p e per ogni combinazione si effettuano delle prove a velocità diverse fino ad usura dell'utensile.
- si costruisce il grafico $\log T - \log v$
- si costruiscono i grafici $\log T - \log v$ e $\log p - \log v$
- alla coppia (più di una) che soddisfa $a^m p^r = 1$ corrisponde il V^*
- il coeff. angolare della retta media che unisce i valori sperimentali nei tre grafici doppio logaritmici, è legato ai valori m , r , n .

Così abbiamo costruito un grafico legato ai materiali di utensile e pezzo ed alla forma del pezzo, su cui possiamo leggere la durata aspettata a seconda di varie combinazioni di v , p , a . Il problema di questo metodo è il numero enorme di prove necessarie per creare dati generali e l'alambicco di valori come T . In effetti in letteratura compaiono coefficienti molto dissimili tra loro e neanche ben descritte situazioni di analisi. Vari studi, inoltre, hanno dimostrato che n , m ed r sono variabili con la velocità ed, ai confini delle velocità industriali, anche di molto. Questo un po' invalida l'utilizzo della relazione di Taylor.

IL MECCANISMO DI TAGLIO E LA FORMAZIONE DI TRUCIOLO

Dipendentemente da tantissimi fattori, nei vari processi di taglio possiamo distinguere queste categorie di truciolo:

- frammentato discontinuo (elemental chip): è formato da elementi di truciolo separati in scaglie di dimensioni comunque ridotte.
- truciolo segmentato: (segmental chip): le scaglie di truciolo rimangono unite a gruppi formando elementi più lunghi ma comunque discontinui
- fluente (flow chip): il truciolo è continuo ma è comunque non regolare in sezione e molto intagliato
- continuo (continuous chip): deriva da una deformazione plastica pseudo-stazionaria nella zona di scorrimento ed ha sezione più costante ed una forma più regolare.

Il primo tipo è caratteristico di materiali fragili che nel campo delle deformazioni plastiche sono vicini al punto di rottura. L'ultimo tipo invece è decisamente inconveniente ed anche pericoloso.

La dove la "meccanica del taglio" tenta di spiegare i processi che portano alla formazione di superfici lavorate di forma e finitura prestabilite, la "meccanica del truciolo", invece, tenta di comprendere i processi di formazione dello scarto del lavoro della macchina.

Analizzeremo più processi di formazione di truciolo, successivi cronologicamente uno all'altro e tutti basati su considerazioni geometriche. Per ognuno di questi, sarà analizzata la formazione di truciolo di un taglio ortogonale (o considerato tale). È un taglio ortogonale quello in cui il tagliente è perfettamente perpendicolare al moto relativo utensile-peso e dove non ci sono sollecitazioni F_y (forza di repulsione). Inoltre le sollecitazioni sui piani paralleli a quello anteriore F_x e F_y , sono tutte uguali e l'analisi della formazione può essere studiata in maniera bidimensionale e su qualsiasi sezione perpendicolare al tagliente.

Per un taglio ortogonale lo spessore del truciolo prima del distacco è uguale all'avanzamento (vedi $\psi = 0$) e la sezione del truciolo distaccato sarà sempre superiore. Definendo il fattore di riscaldamento del truciolo (o rapporto di taglio) come:

$$c = s/s_1$$

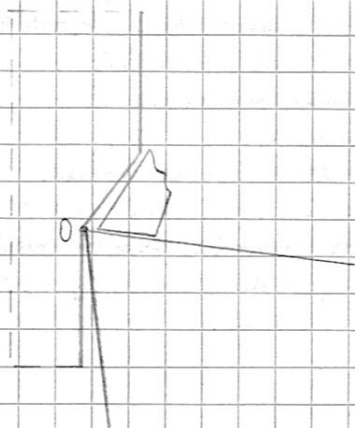
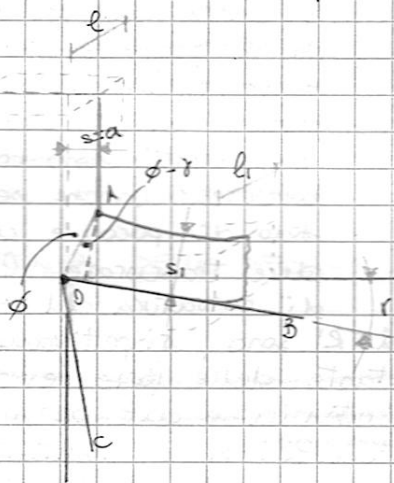
sarà sempre $c < 1$. La sezione del truciolo è di imprecisa determinazione e la sua misurazione è indiretta, sfruttando la costante

del volume, la non deformazione lungo l'asse y ($l = l_1$) e l'introduzione di peso specifico costante per il materiale. Altra regola per la formazione di truciolo è la seguente:

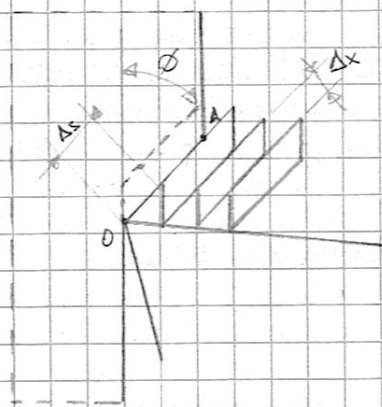
$$s_1 > s_1'$$

$$\phi_1 < \phi_1'$$

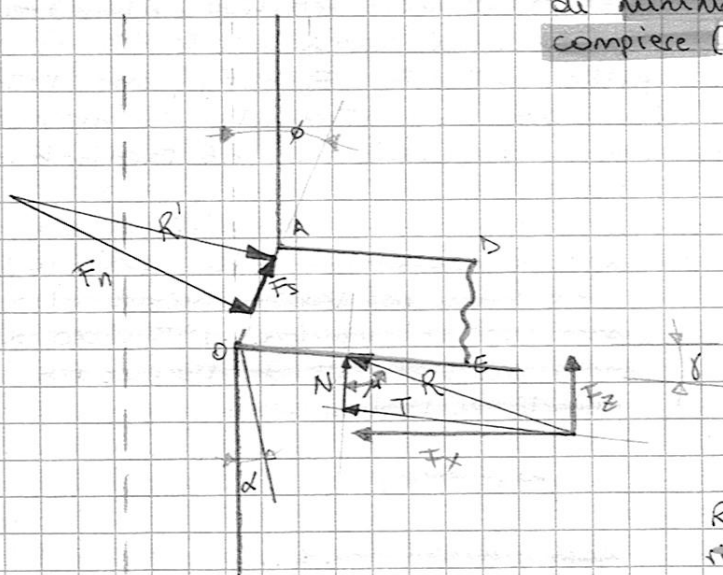
e cioè il materiale con maggior aumento di sezione dopo il distacco del truciolo, presenta un angolo di taglio inferiore. In genere il taglio avviene la formazione di truciolo avviene lungo la linea OA (piano di taglio) e dove la sollecitazione dovuta al moto relativo tra peso



col utensile raggiunge valori sufficienti da deformare plasticamente il materiale da lavorare (formazione di una gobba) fino a farlo strappare separando materiale dal pezzo, nella zona di taglio. Nella seconda figura nella pagina precedente, è rappresentato il concetto di formazione di truciolo per un materiale fragile, là dove gli altri materiali subirebbero una deformazione plastica, strappandosi e cominciando a scorrere sulla faccia dell'utensile, il materiale fragile si frantuma in scaglie (sempre lungo il piano di scorrimento) staccandosi a frammenti. Ritornando alla formazione di truciolo per materiali plastici, Piispänen formulò nel 1937 un primo criterio di formazione. Lui ipotizzò degli strati elementari di materiale, gli uni sugli altri come delle carte da gioco. Lo scorrimento, risulta legato all'angolo γ di spoglia superiore e dell'angolo ϕ . Il valore che rende minima la deformazione, ~~che~~ è $\phi = 45^\circ$. Questo scorrimento è visto come rapporto tra scorrimento lungo OA (Δs) e larghezza dell'elemento medio di truciolo che si separa per scivolare lungo OA.



Teoria successiva a quella (limitata) di Piispänen, è stata quella di Ernst e Merchant (1941) che si basava sul principio di minima energia che la F_z doveva compiere (e dove) per eseguire il taglio.



È sempre una teoria di formazione di truciolo continuo lungo il piano di scorrimento, e parte dal presupposto che il pezzo di truciolo AOED è in equilibrio tra le forze R ed R'. Queste due risultanti sono considerate collineari (anche se non lo sono di poco) e ciò vuol dire trascurare il momento di curvatura del truciolo.

R ed R' sono, rispettivamente, la risultante delle forze esercitate dall'utensile e dal pezzo, sul tratto di truciolo. R è risultante della

reazione normale e di quella tangenziale dell'utensile, inclinate di μ , coefficiente di attrito di Newton tra truciolo ed utensile. R è anche somma dello sforzo di taglio principale (F_x) e di quello di resistenza all'avanzamento. Quest'ultime due sono le grandezze misurabili e tutte le grandezze in gioco vengono definite in relazione a queste due. La R' è data dalla ~~la~~ forza di scorrimento e dalla F_n , forza normale che il pezzo esercita sul truciolo.

Secondo Ernst e Merchant, è la F_z la causa dell'inizio della formazione di truciolo. Ne esistono tanti valori tali da generare delle tensioni tangenziali sufficienti, ma una combinazione particolare di ϕ , μ e γ rende questa F_z minima. A questo valore, appunto, corrisponde l'angolo di scorrimento di minimo sforzo.

$$Z_s = \frac{F_s}{S_s} \quad \text{con } F_s = f(F_x; F_z)$$

Per dati μ e γ , esiste un solo ϕ di minimo sforzo F_z , raggiunto il quale comincia lo scorrimento e la formazione di truciolo.
 ϕ diminuisce con l'aumentare di μ (attrito) e aumenta con l'aumentare di γ . (e questo l'avremmo visto nell'analisi degli angoli.). Secondo questa teoria è

$$\phi = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \mu + \gamma \right)$$

Questa formula risulta molto imprecisa dai rilievi sperimentali ed in effetti non tiene conto di molte cose come:

- dipendenza di τ_s dalla temperatura
- dipendenza di τ_s dalla deformazione
- dipendenza di τ_s dalla velocità di scorrimento.

Merchant stesso riformulò le relazioni tra le grandezze, tenendo conto di una dipendenza tra τ_s e σ_s e più precisamente considerandola lineare. È infatti ben noto che la sollecitazione normale ad una superficie di materiale policristallino aumenta la resistenza allo scorrimento tangenziale. ($\sigma_s = F_n / s_s$). L'angolo di relazione lineare tra σ_s e τ_s ha reso la formula per trovare la ϕ di minor energia più prossima alla realtà, rendendo le tabelle da lei ricavate utilizzabili industrialmente.

$$\phi = \frac{1}{2} \left(\phi - \mu + \gamma \right)$$

Per gli acciai, ϕ va da 70° a 90° . È circa 50° per le leghe leggere. (Valori di prima approssimazione). Merchant affermò che le sue formule fossero applicabili non solo per tagli ortogonali ma anche per altri tagli vincolati in genere, con la clausola che non fosse troppo grande il raggio di curvatura del pezzo e che la posizione di taglio fosse secondario in lavorazione fosse piccola rispetto al primario.

Anche questa teoria presenta forti limiti concettuali che saranno in parte superati dalla formazione del truciolo secondo la teoria della plasticità adiabatica.

DIPENDENZA DELLO SFORZO DI TAGLIO PRINCIPALE DALLA SEZ. DEL TRUCIOLO

$$F_z = P_t \cdot S \quad [N]$$

La pressione di taglio secondo Kronenberg è data da:

$$P_t = P_s \cdot S^{-1/n} \quad [N/mm^2]$$

con P_s : pressione specifica di taglio e cioè la pressione corrispondente ad una sezione unitaria del truciolo ($S = 1 mm^2$)

Kronenberg propone questi valori:

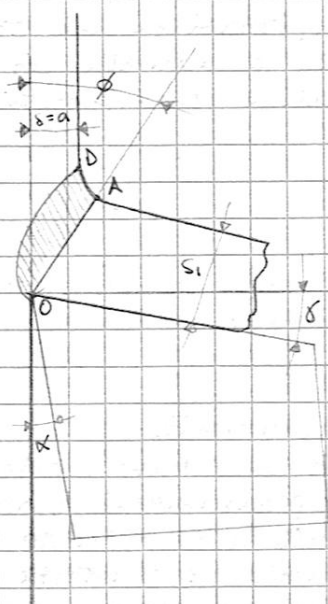
$$P_s (\text{acciai}) : 3,4 R_m^{0,454} \cdot \beta^{0,666} \quad (\text{da } N/mm^2)$$

$$P_s (\text{ghise}) : 0,9 HB^{0,4} \cdot \beta^{0,666} \quad (\text{da } N/mm^2)$$

con R_m carico di rottura, β angolo di taglio dell'utensile, HB durezza brinell. Ecco alcuni valori di $1/n$:

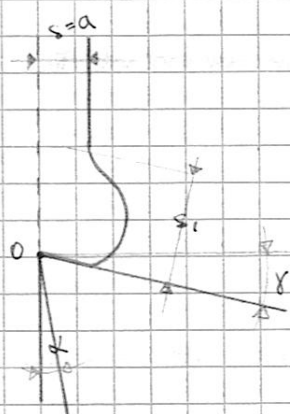
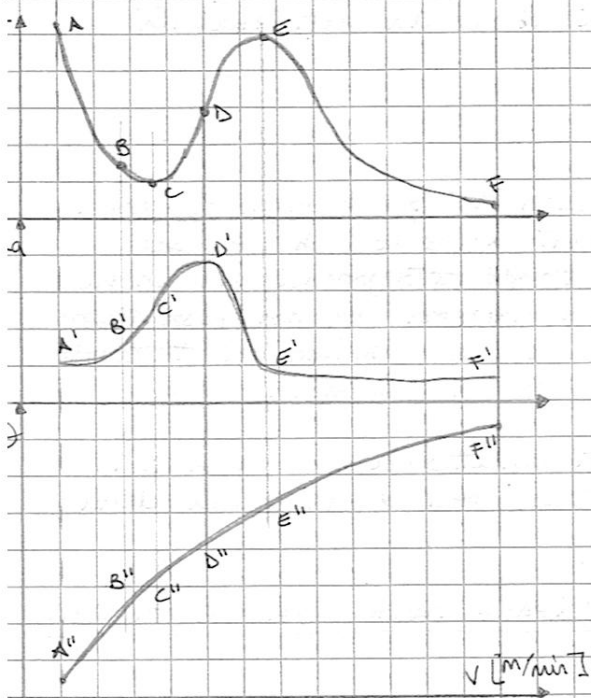
Acciai: 0,197 Ghise: 0,137 otturi: 0,255 leghe leggere: 0,060

LA FORMAZIONE DEL TRUCIOLO. TEORIA DELLA PLASTICITA' ADIABATICA



La teoria di scorrimento del truciolo sul piano OA è limitata da ipotesi non accettabili. In quel piano la velocità di scorrimento passa dal valore posseduto dal petto a quello del truciolo in maniera istantanea, e ciò comporta un'accelerazione infinita. Anche la $\dot{\epsilon}_{max}$, secondo questa teoria, viene aggiunta istantaneamente e anche questo non è plausibile. Risulta più logico assumere una zona di scorrimento (OAD), invece che un piano, dipendente dalle principali caratteristiche di taglio. Aumentando la velocità di taglio ad esempio, diminuisce l'ampiezza di questa zona e si sposta verso il petto dell'utensile.

Partendo da questo concetto, si sviluppa la teoria di formazione del truciolo di Pomey-Carro (ao (1966). Lo spessore di questa zona di scorrimento è dell'ordine di $0,01 \text{ mm}$. Questa teoria considera, inoltre, adiabatica ogni volume di materiale che, quindi, non solo non scambia calore con l'esterno ma non scambia neanche col materiale immediatamente successivo. La formazione di truciolo inizia con il rigonfiamento del materiale che ancora non ha raggiunto il valore di sollecitazione tangenziale sufficiente. Superato il campo dell'elastico in una zona casuale della zona rigonfia, il materiale comincia a scorrere sul fianco dell'utensile. La zona è casuale ma è appartenente al rigonfiamento perché in ogni caso è l'incrudimento che fa aumentare le tensioni e la temperatura in maniera tale che anche la resistenza interna al materiale diminuisca per favorire la formazione del truciolo. L'adiabaticità del fenomeno accentua l'aumento repentino di temperatura e le conseguenze appena analizzate. Per un metallo plastico il ciclo appena visto (aumento tensioni e temp, diminuzione di resistenza, truciolo) è molto veloce ed il truciolo si forma in maniera pseudo-stazionaria, formando il truciolo continuo caratteristico di questo materiale. È come se ogni porzione di truciolo subisca la stessa evoluzione di deformazione e temperatura. Se le vibrazioni utensile-petto-macchina aumentano, l'angolo ϕ varia periodicamente e la cosa si ripercuote sul truciolo che risulta sempre più ondulato fino ad essere anche segmentato. I materiali fragili invece, abbiamo già visto come si comportano, raggiunte le sollecitazioni plastiche.



La formazione del truciolo. L'adiabaticità del fenomeno accentua l'aumento repentino di temperatura e le conseguenze appena analizzate. Per un metallo plastico il ciclo appena visto (aumento tensioni e temp, diminuzione di resistenza, truciolo) è molto veloce ed il truciolo si forma in maniera pseudo-stazionaria, formando il truciolo continuo caratteristico di questo materiale. È come se ogni porzione di truciolo subisca la stessa evoluzione di deformazione e temperatura. Se le vibrazioni utensile-petto-macchina aumentano, l'angolo ϕ varia periodicamente e la cosa si ripercuote sul truciolo che risulta sempre più ondulato fino ad essere anche segmentato. I materiali fragili invece, abbiamo già visto come si comportano, raggiunte le sollecitazioni plastiche.



Nel grafico del secondo disegno si vede l'andamento della temperatura, della rugosità della superficie lavorata e della durata dell'utensile secondo questa nuova teoria. L'aumento della temperatura è legato alla fusione a freddo che avviene nelle varie zone di taglio, tra le creste degli elementi a velocità relativa diversa da zero. Questi legami vengono rotti immediatamente dopo la loro formazione, generando calore e causando l'usura dei materiali. Nella figura a sinistra è rappresentata la situazione a velocità sostenute di taglio. Si individuano tre zone di taglio e la generazione dell'energia in forma calore è così distribuita:

$$Q_I \gg Q_{II} \gg Q_{III}$$

(con Q_{II} circa $1/3$ della totale.)

In ogni caso l'energia termica generata dallo strappo in zona I è trasmessa per conduzione alla II con aumento di temperatura localizzato in quella zona (truciolo continuo accentua la cosa).

Con bassa velocità di taglio (tratto AB) il truciolo e la zona di strappo seguono la geometria dell'utensile e l'aumento di temperatura e di velocità riducono la durata dell'utensile causa la semplice usura meccanica. La rugosità dipende esclusivamente dalla finitura superficiale dell'utensile.

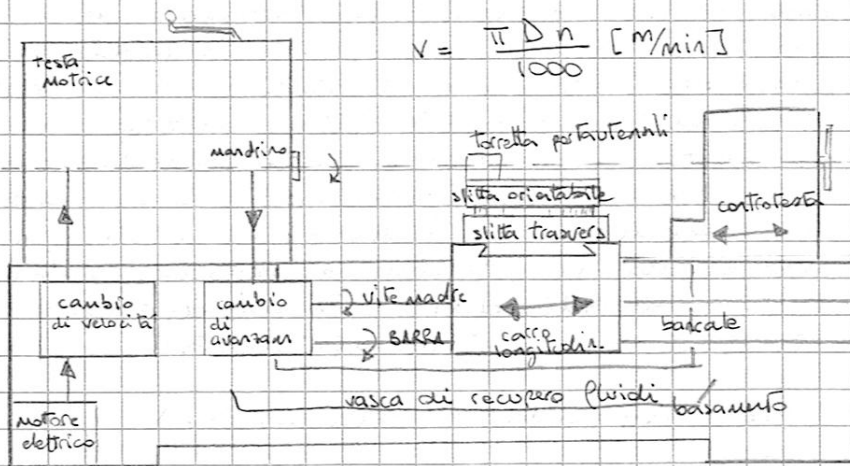
Nel tratto BC c'è un repentino innalzamento della curva Ra e diminuzione di T. A questa velocità l'incrudimento e l'attrito nella zona del tagliente sono sufficienti a rendere il materiale (incrudito ed a scaglie) tagliente per l'utensile che si ritrova (causa queste minuscole scaglie incrudite) ad essere meno rifinito superficialmente, con conseguente nulla rugosità.

Nel tratto CD, succede che l'elevata velocità relativa rende il truciolo incapace di seguire il profilo dell'utensile, ed il taglio comincia a divenire causato dallo strappo in zona I. La zona morta che si forma, si riempie di materiale deformato e molto incrudito, formando il Tagliente di riporto (B.U.E. Built up edge). Questa sorta di cuscinetto che si forma a protezione del tagliente ha evidenti conseguenze negative sulla rugosità ma allunga la vita dell'utensile (o meglio del tagliente). Giunto a dimensioni troppo elevate, sotto l'azione delle forze di taglio ingenti, questo accumulo si spacca e parte viene espulso con il truciolo (la maggior parte) e parte viene spazzato via lungo il ^{Pi} piano principale. In questa fase il materiale del tagliente di riporto spaccato, intaglia molto il petto dell'utensile, peggiorando il consumo in quella zona.

Nel tratto DE, l'aumento di temperatura aumenta la plasticità del materiale che ritorna ad essere capace di seguire il profilo dell'utensile ed infatti in E, il tagliente di riporto è del tutto sparito. La rugosità è migliorata e la durata è massima essendo questa fase molto stabile.

Aumentando ancora di più velocità e temperatura, si crea un sottile strato di materiale da uno strato di scricimolo secondario e da uno terziario. Questo velo a velocità elevata si posiziona tra faccia dell'utensile e truciolo, e tra fianco principale e superficie lavorata. La rugosità ~~aumenta~~ migliora ed il consumo dell'utensile per attrito sparisce, però si presenta quello per diffusione. Causa l'elevata temperatura, ad esempio, gli inserti di carburo sinterizzato, perdono cobalto che si diffonde nel truciolo austenitico.

LA TORNITURA



$$V = \frac{\pi D n}{1000} \text{ [m/min]}$$

La tornitura è una lavorazione meccanica con lo scopo di ottenere superfici di rivoluzione esterne ed interne comunque conformate. Il movimento relativo tra utensile e pezzo, e la forma dell'utensile, permettono la lavorazione di moltissime forme. Il moto di avanzamento dell'utensile ed il moto di taglio (rotatorio continuo) è sempre posseduto dal pezzo. Da che l'utensile è a contatto con il pezzo,

la combinazione dei due moti ha come risultato un moto elicoidale. Ecco i principali pezzi di un tornio convenzionale:

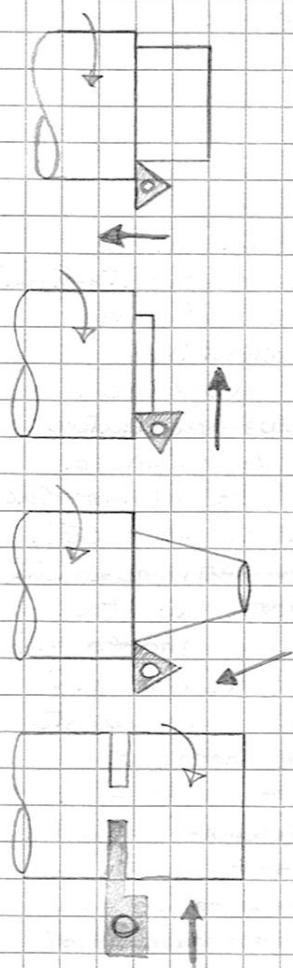
- bancale: è un singolo blocco in ghisa massiccio
- basamento: vi poggia sopra tutta la macchina ed insieme al bancale deve avere idonea rigidità.
- testa motrice o toppo fisso: vi è alloggiato il mandrino il quale asse di rotazione forma l'asse di rotazione anche del taglio. Al mandrino la potenza viene trasferita da un sistema di cinghie attraverso un cambio di velocità che serve a regolare la velocità di taglio.
- cambio di avanzamento: è il cambio secondario che fornisce potenza ai due componenti rotanti barra e vite madre.
- controtesta o toppo mobile: può traslare in direzione parallela all'asse di tornitura e sostiene la contropunta o magari un utensile pluritagliente per i fori. Sia l'intero toppo che la contropunta possono essere fissati opportunamente.
- carro longitudinale: può traslare come il toppo mobile ed è legato alla barra e ad una vite madre. La prima è gestita manualmente da un volantino per i moti manuali, e dalla vite madre se si vuol farlo muovere in maniera meccanicamente legato alla rotazione del mandrino.
- slitta trasversale: può muoversi in maniera perpendicolare all'asse di rotazione del mandrino. È ~~sempre~~ alloggiata, con un collegamento a coda di rondine, ^{al carro} la slitta trasversale, è la slitta orientabile lungo 360° e sostiene il portautensili.

NB: la barra può trasferire moto anche alla slitta trasversale, ma non contemporaneamente anche al carro.

Il fissaggio del pezzo da lavorare dipende dalle sue dimensioni; se è molto lungo è necessario ~~se~~ mantenere in asse anche l'altra estremità grazie alla doppia punta e se il suo diametro non è sufficiente a garantire rigidità, ~~se~~ nella mazzetta il materiale può essere sostenuto da una lunetta. Al mandrino può essere mantenuto in più maniere ad esempio con delle griffe indipendenti, o autocentranti.

Compatibilmente con i valori di velocità massima al mandrino, potenza massima e sforzi elastici massimi, i valori indipendenti di taglio sono tabellati a seconda del materiale. Una profondità di passata che va da 0,1 a 1 mm è caratteristica di una lavorazione di finitura e

arriva fino ad 1cm per lavori di sgrossatura. Per operazioni come filettature, gole e tagli, si diminuiscono le velocità di taglio. Ecco di seguito elencate le principali operazioni fattibili con un tornio:



- **Tornitura cilindrica esterna:** la superficie lavorata è di rivoluzione ed è concentrica al pezzo di origine.
- **Tornitura piana esterna:** o anche sfacciatura; il moto dell'utensile è perpendicolare all'asse di rotazione e la superficie lavorata a cui siamo interessati, è contenuta nel piano perpendicolare all'asse di rotazione. Per questa lavorazione, mano a mano che ci si avvicina all'asse di rotazione, la velocità diminuisce e la rugosità aumenta a causa del tagliente di riporto. A questo problema si ovvia con il controllo elettronico della velocità di rotazione (che non molte macchine hanno).
- **Tornitura conica:** si ottiene ruotando il carrello orientabile oppure fissando la contropunta non in linea con l'asse del pezzo.
- **Tornitura interna:** compatibilmente con gli ingombri e le flessibilità in gioco, in un pezzo tubo si può tornare inserendo l'utensile con un braccio.
- **Filettatura:** settando l'avanzamento uguale al passo del filetto e collegando cinematicamente moto di alimentazione e rotazione, con opportuni utensili si possono ottenere filetti interni ed esterni. Spesso si effettuano più passate (anche di sola lucidatura cioè senza aumento di prof di passata) essendo il filetto legato ad una funzionalità particolare.
- **Gole:** per questa lavorazione è richiesto un inserto per ogni geometria della gola. Possono essere comunque dirette e se portate al termine (fino all'asse) si parla di...
- **Troncatura:** l'alimentazione radiale arriva a troncare il pezzo. L'utensile è considerato "di fino" ed oltre al taglio esegue anche la sfaccettatura.

- **Fori:** verrà analizzata meglio più avanti. In ogni caso per i torni, il montaggio dell'utensile viene fatto sulla contropunta ed è il pezzo il moto di questa a portare l'utensile ad appostarsi al pezzo. L'utensile è pluritagli. Spesso è necessaria un'operazione di centratura prima.

- **Trigonatura:** è un'operazione di deformazione plastica a freddo per rendere una superficie cilindrica adatta all'afferraggio manuale grazie a dei solchi a maglia ricavati per stampaggio. Il pezzo in rotazione si avvicina a questi due cilindri sui quali ci sono le impronte negative dei solchi.

LE OPERAZIONI DI FORATURA; TRAPANI ED ALESATORI.

La lavorazione dei fori è la più import e frequente operaz di asportaz di truciolo eseguita dalle macchine (70%). La successione delle operazioni è sempre la stessa:

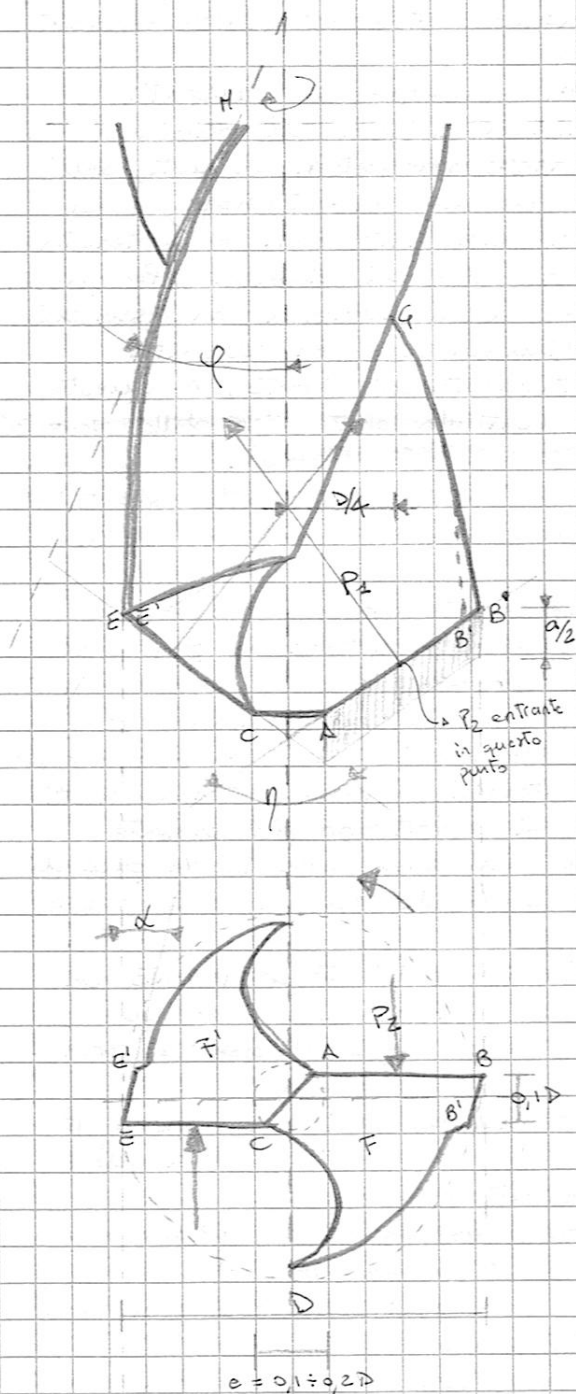
- centratura
- foratura
- allargatura
- alesatura
- maschiatura.

L'operazione di foratura vien fatta con le punte elicoidali che possono essere pluritaglienti o a due taglienti. La punta dell'utensile è costituita da un codolo (cilindrico o conico) per il montaggio nel mandrino. L'altra parte è formata da due scanalature elicoidali ricavate dal resto del cilindro. L'intersezione delle scanalature con la superficie esterna, forma i due taglienti (AB e CE). Gli spigoli BB' ed EE' sono detti quadretti e formano i taglienti secondari. Questa parte è caratterizzata da un angolo di spoglia inferiore di circa 2° (discorso già fatto per questo minimo valore per questo angolo). Le due scanalature hanno il compito di evacuare il truciolo dalla zona di taglio e nel caso far giungere in quella zona del fluido lubro-refrigerante. In effetti sono considerate il petto dell'utensile. Il fianco invece è la superficie delle faccette di affilatura, che insieme al quadretto serve per rifinire leggermente la superficie lavorata. L'anima centrale dell'utensile ha lo scopo di sopportare le sollecitazioni torsionali e flessionali ma non può essere troppo ampio per non togliere spazio alle scanalature. L'angolo η dei taglienti e l'angolo φ sono il risultato di varie esigenze:

- assicurare una spinta contraria alla direz di avanzamento
- permettere l'evacuazione del truciolo senza che opponga troppa resistenza.

L'angolo η va da valori di 80° per la perforazione di materiali morbidi, a circa 140° per quelli duri. L'angolo φ assume valori dell'ordine $15 \div 45^\circ$ crescente per la perforazione di materiali poco duri. η è anche detto angolo di apertura della punta.

Da non complessissime analisi geometriche, vien fuori che gli angoli di spoglia dei taglienti, dipendono dall'inclinazione delle scanalature e soprattutto dall'avanzamento e dal punto preso in analisi sul tagliente. Se la combinazione di questi parametri rendono il valore di α (spoglia inf.) in lavorazione (diverso da α a fermo) nullo, ~~ossia~~ si verifica il fenomeno del tallonamento. Il processo di foratura è molto impreciso sia nella forma che nella finitura superficiale. Si ritrova ad essere necessaria la centratura (fatta con un apposito utensile) soprattutto quando per un motivo o per l'altro il centraggio ed il posizionamento della punta elicoidale



è resa difficile da fattori tipo rugosità eccessiva sulla superf. da forare. Esistono tante altre punte da foratura:

- punta doppia: ha un doppio diametro e serve per le svasature cilindriche
- punta a gradini: usata per la sgrossatura di materiali molto duri (dove sarebbe necessario un cambio punta) oppure per la preparazione ad una svasatura conica.
- perforatore con inserti in carburi: serve per le elevate produttività ed il taglio principale è eseguito, appunto, dagli inserti.
- punta ad elica con canali per il fluido da taglio: devono ovviamente essere di dimensioni elevate.

Lo sforzo di taglio "sentito" da ogni tagliente, può essere visto come applicato nella mereria del tagliente e può essere scomposto in due componenti: una P_t che comporta la reazione alla penetrazione ed una sollecitazione flessionale causa ~~anche~~ della scarsa finitura dei fori; la P_f invece (in coppia con l'altra del secondo tagliente) genera la coppia di foratura (quella vera di taglio). Come abbiamo già visto (Kroenberg) lo sforzo di taglio è data da:

$$F_t = P_t \cdot S$$

abbiamo già visto come calcolare (approssimativamente) P_t ; per quanto riguarda la sezione del truciolo (tratteggio in figura)

$$S = \frac{a}{2} \cdot \frac{D}{2}$$

La potenza a mandrino:

$$P_m = F_t \cdot v_t + F_a \cdot v_a$$

considerando trascurabile la forza di attrito...

$$P_m = F_t \cdot v_t = P_t \cdot S \cdot \frac{V}{1000} = P_t \frac{aD}{4} \cdot \frac{\pi Dn}{1000} = P_t \frac{aD^2}{4} \frac{2\pi n}{1000 \cdot 2} = \frac{aD^2}{8} P_t \frac{2\pi n}{1000}$$

$$P_m = C \cdot \omega \quad \text{con} \quad C = P_t \frac{aD^2}{8} = F_t \cdot \frac{D}{2} \text{ (mom resistente)}$$

Per raggiungere rugosità inferiori a quelle ottenibili con le punte ad elica è necessario ricorrere ad allargatori ed alesatori. I primi servono per asportare molto meno truciolo ed infatti sono simili alle punte ad elica ma hanno anime più resistenti e più taglienti, tutto a vantaggio della finitura. Le velocità di rotazione sono simili ma gli avanzamenti sono decisamente ridotti. Sono utili anche per svasature. Gli alesatori sono utensili pensati per la finitura e si rendono necessari quando fondamentali diventano gli accoppiamenti foro cilindro. Quelli da rivoluzione (a punta) sono pluritaglienti, viaggiano a velocità ridotte, asportano poco truciolo. Spesso sono conici (lievemente) per permettere la contrattura del foro. Quelli per le alesature a mano hanno taglienti più lunghi perché aiutati nel centraggio e date le basse velocità di lavoro l'attrito non è elevato. Viceversa un alesatore da macchina ha taglienti più corti (attrito ridotto) o controllo meccanico o elettronico delle posizioni di ~~foratura~~ foratura. Per gli alesatori ad elica si distinguono quelli diretti da quelli indiretti. I primi hanno lo sviluppo dei solchi elicoidali concorde alla rotazione. Tende all'autopenetrazione a vantaggio del controllo dell'avanzamento (soprattutto lavori a mano), mentre quelli ad elica indiretta spingono il truciolo nel senso di foratura ed è da evitare per i fori ciechi. I maschiatori servono per le filettature interne. A mano servono fino a 3 max. per i vari passaggi di finitura.



I trapani sono strumenti con queste caratteristiche:

- il moto rotatorio di taglio è posseduto dall'utensile
- il moto di alimentazione anche è posseduto dall'utensile e può essere manuale o automatico
- il petto è fissato sulla tavola porta petto e in alcuni casi può avere il moto di appostamento.

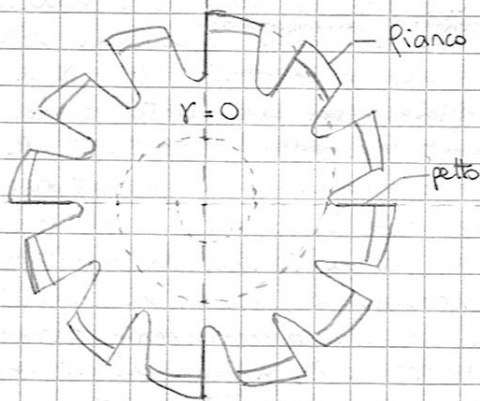
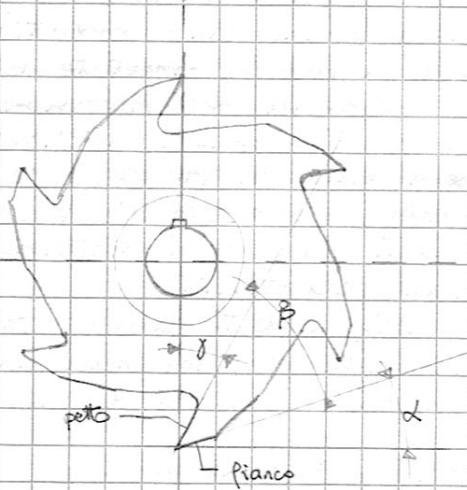
I trapani più piccoli sono detti sensitivi e servono per piccoli fori su piccoli pezzi. C'è bisogno di centratura (o intaglio tramite truschino) per fori precisi perché non ha un appostamento automatico.

I trapani a montante posseggono avanzamento automatico e quindi si può collegare il moto di avanzamento a quello di rotazione. La sua rigidità strutturale è superiore ma anche le dimensioni.

I trapani radiali, infine, sono di grosse dimensioni e per grandi produzioni. Il petto gode di moto di appostamento ed anche il braccio gode di più gradi di libertà che lo rendono versatile.

Gli alesatori sono, invece, delle grosse postazioni di lavoro con una precisione di posizionamento elevata sia dei pezzi che degli utensili. La loro dimensione è come quella di un tornio ma sono decisamente più complessi e versatili. Non si rende necessaria la centratura.

LE LAVORAZIONI DI FRESATURA



Le operazioni di fresatura permettono di realizzare molti tipi di superfici lavorate sia piane che non e sia a profili di lavorazione lineari che non. Il moto di taglio è rotatorio continuo ed è posseduto dall'utensile (chiamato fresa). Sia il moto di appostamento che quello di avanzamento sono solitamente posseduti dal pezzo da lavorare.

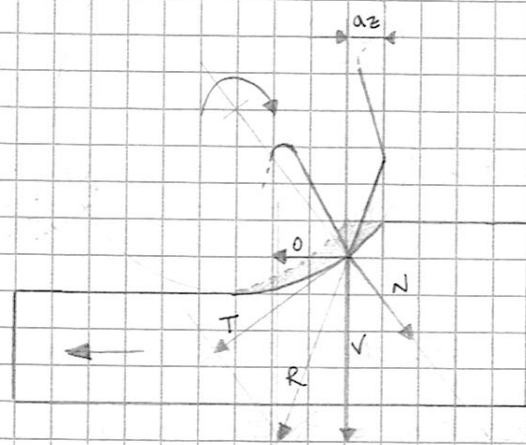
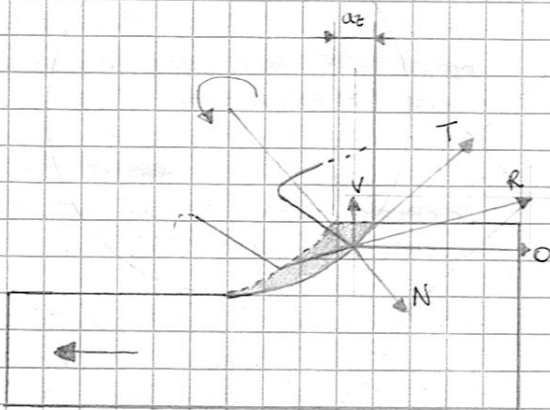
Le Prese sono utensili pluritaglienti con lame disposte sia su superfici piane che non. Ogni Tagliente è assimilabile ad un utensile monotagliente e i suoi effetti possono essere studiati come tali. Tranne che per l'evacuazione del truciolo. Le considerazioni sugli angoli caratteristici sono valide. I denti delle prese sono il collegamento dei taglienti e della testa degli utensili, al corpo principale della ruota della fresa. Questi denti possono essere di due tipi:

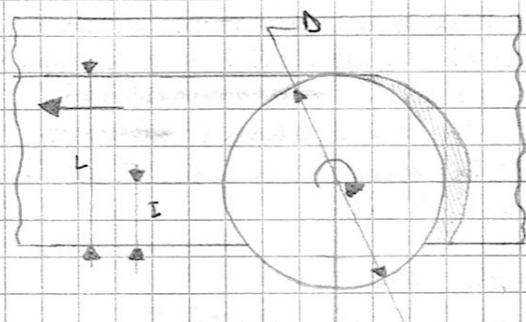
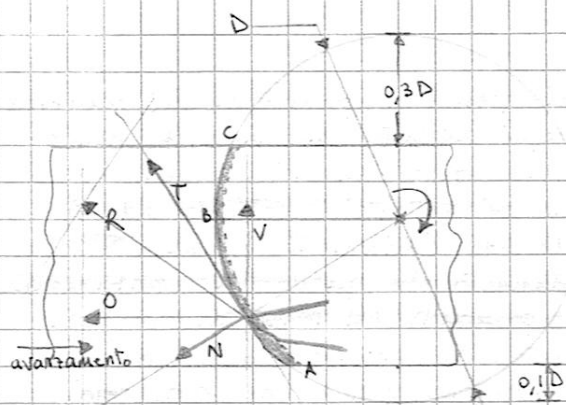
- fresati (o di sega)
- spogliati (o a profilo costante).

I primi (primo disegno) hanno angoli di affilatura variabili e più o meno denti a seconda della lavorazione (α e γ crescono al diminuire dei denti per lavorazioni su materiali teneri e alte velocità). I secondi hanno angolo di spoglia superiore nullo ed i denti sono legati ad una spirale logaritmica per la loro forma. La caratteristica di queste prese è quella di non perdere la

forma originale dei denti dopo le varie affilature (fatte sul petto a diff delle prese a denti di sega) se visti in sezione con un piano passante per l'asse della presa. Sono indispensabili per lavorazioni dove le scanalature non devono variare di forma ma mano che "invecchia" l'utensile. La pecca è che l' $\gamma=0$ comporta grandi sforzi di taglio e di conseguenza la produttività è ridotta. Le prese più comuni ed utilizzate sono le seguenti:

- Prese cilindriche: taglienti su una superficie cilindrica; lavora con l'asse parallelo alla superficie (piana) da lavorare
- Prese cilindrico-frontali: hanno taglienti anche su una superficie piana perpendic. a quella cilindrica e servono per la lavorazione di spigoli (prese a manico) o per scanalature, gradini, cave... (prese a costolo).
- Prese per scanalature a T: hanno denti su tre superfici e...
- Prese ad angolo: servono per scanalature a coda di rondine (ad esempio) ed hanno denti su due superfici coniche intersecanti.





- frese a disco: hanno un elevato rapporto diametro-spessore e denti sia sulla superficie cilindrica che quella piana. Hanno produttività superiore di quelle a codolo, limitate nell'avanzamento dal problema dell'inflessione. Purtroppo non conservano lo spessore con l'invocchiuma esistono frese a disco con ~~spessori~~ spessori regolabili per la registrazione dello spessore. Inoltre esistono anche frese ad inserti di carburi sinterizzati per l'elevatissima produttività. Come abbiamo visto, i denti possono trovarsi su superfici cilindriche e piane (nella maggioranza dei casi, e ciò comporta due modi di asportare truciolo:

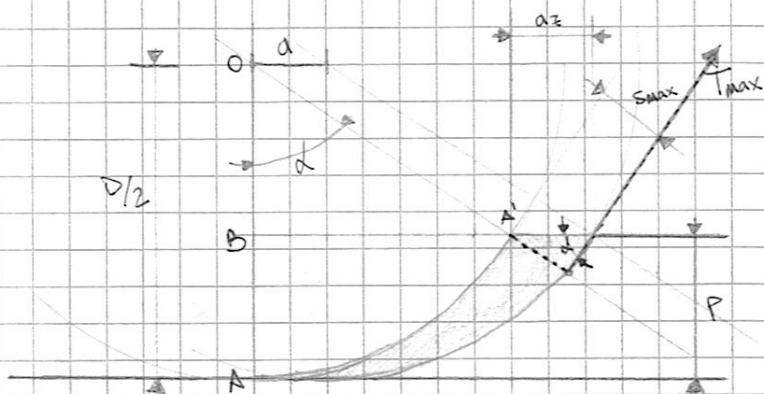
- a Taglio periferico (3-4° disegno)
- a Taglio frontale (5-6° disegno)

La prima modalità può a sua volta suddividersi in fresatura ^{in opposizione} diretta o ^{in concordanza} inversa a seconda della rotazione della fresa. Se il dente inizia a lavorare la superficie con un urto e la componente orizzontale della risultante R è concorde all'avanzamento, la fresatura

periferica è appunto, concorde. Il taglio in opposizione vede il dente incurvarsi nel materiale lentamente, o meglio là dove lo spessore di materiale da asportare è minimo. Infatti il dente struscia sul materiale, incurvandolo, prima di cominciare il suo ciclo di asportazione. Questa è una causa di sprechi. La componente orizzontale della risultante evita il distacco tra vite e madrevite del sistema di avanzam. e quindi le vibrazioni legate a questo gioco, però la componente verticale tenta di allontanare il pezzo dal porta pezzi. Nel taglio periferico in concordanza la componente O accentua le vibrazioni e quella verticale invece ~~rende~~ rende stabile il pezzo. Il dente evita di strusciare sul pezzo ma inizia il Taglio con un urto. Se la fresatrice ha il sistema di recupero del gioco vite-madrevite questo secondo metodo di fresatura è preferibile. In ognuno dei due casi però il truciolo è a virgola e la variazione di sezione causa una variazione dello strato di taglio e quindi c'è comunque un regime vibratorio di cui tenere conto in progettazione e nella scelta dei parametri di taglio. L'alternativa, come abbiamo visto, è il Taglio frontale. In questo caso la forma del truciolo non è a virgola ed il suo spessore rimane quasi costante. È un bene cercare di lavorare con frese con diametro maggiore della larghezza del pezzo per una maggiore regolarità e per far sì che la componente O di R possa essere sempre opposta all'avanzamento (per i giochi e vibrat vite prima). Per far ciò deve essere $AB > BC$ ed il centro di rotazione della fresa essere spostato rispetto all'asse del pezzo. Se non disponiamo della giusta

fresa, saremo costretti a fare più passate. In generale la fresatura frontale è vantaggiosa perché più denti sono in lavorazione contemporaneamente, ci sono meno vibrazioni e la possibilità di usare degli inserti in carburo permette di ottenere elevate produttività.

In generale le profondità di passata coincidono con quelle indicative di alesatura (per



sgrossature o finiture) e un aumento della velocità di taglio migliora la finitura.

Vediamo ora come ricavare la potenza di taglio in fresatura. Tenendo presente che la velocità di avanzamento è data da

$$V_a = a_z \cdot n \cdot Z$$

con a_z avanzamento per ogni dente [mm], n è la velocità angolare della fresa [rpm] e Z numero di denti; e guardando la figura in basso della pagina precedente, si afferma che:

in fresatura periferica lo ~~spessore~~^{spessore} del truciolo varia con l'avanzamento e raggiunge il suo massimo nel valore:

$$s_{max} = a_z \cdot \sin \alpha$$

ovviamente questa semplificazione è fattibile se consideriamo rettilinei i denti. Su questa sezione agisce lo sforzo di taglio massimo T_{max} . Per ricavare il valore di $\sin \alpha$ ragioniamo così:

$$OB = \frac{D}{2} - p = \frac{D}{2} \cos \alpha \quad (\text{dato che } OA' = OA = D/2)$$

$$\cos \alpha = \left(\frac{D}{2} - p \right) \frac{2}{D} = 1 - \frac{2p}{D}$$

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2p}{D}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(1 + \frac{4p^2}{D^2} - \frac{4p}{D}\right)} = \\ &= \sqrt{\frac{4p}{D} - \frac{4p^2}{D^2}} = 2 \sqrt{\frac{p}{D} \left(1 - \frac{p}{D}\right)} \end{aligned}$$

ma essendo $p \ll D$ (anche per lavorazioni di sgrossatura p non supera il centimetro mentre il diametro di una mola periferica è almeno un ordine di grandezza in più)

$$1 - \frac{p}{D} \approx 1 \quad \Rightarrow \quad \sin \alpha \approx 2 \sqrt{\frac{p}{D}}$$

$$s_{max} = \frac{V_a}{n Z} 2 \sqrt{\frac{p}{D}}$$

Se l è lo spessore in lavorazione della fresa (o meglio la larghezza) alla sezione massima corrisponde $l \cdot s_{max}$

$$S_{max} = s_{max} \cdot l$$

e la T_{max} sarà:

$$T_{max} = p_t \cdot S_{max}$$

dove p_t è la pressione di taglio [N/mm^2] definita in precedenza la potenza è forza per velocità (periferica del dente):

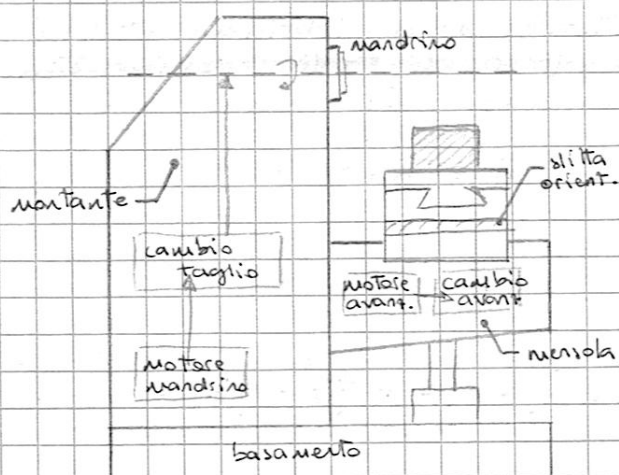
$$W_{max} = T_{max} \cdot \frac{V}{60000} \quad (\text{se } V \text{ è in rpm}) \quad W \equiv [\text{Watt}]$$

Per la fresatura può essere valutata la potenza media come

$$T_{med} = \frac{T_{max}}{2}$$

$$W_{med} = \frac{W_{max}}{2}$$

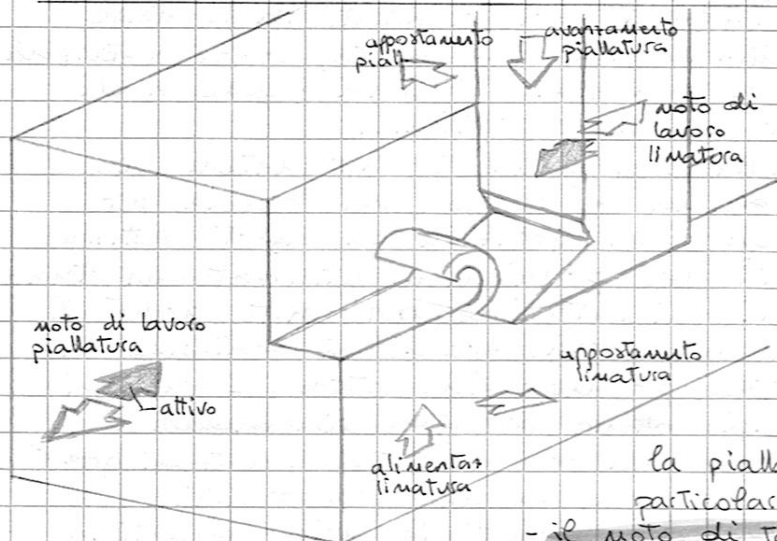
e se la potenza massima serve al dimensionamento del motore principale, questo valore medio è utile per il calcolo del consumo energetico. La potenza necessaria al moto di alimentazione (motore secondario per una fresatrice universale) può essere tenuta in conto, in prima approssimazione, aggiungendo un 15% al valore di potenza massima.



La generica fresatrice è formata da un solido montante su un basamento e da una mensola che si muove verticalmente scivolando su delle slitte ricavate dal montante. Ha due motori con buone possibilità di controllo ed anche sincronizzabili. La slitta, la tavola portazzo e la mensola, permettono svariati posizionamenti e avanzamenti manuali o automatizzati. Lo staffaggio del pezzo deve essere una fase fatta con cura essendo variabili gli sforzi subiti da esso in questo tipo di lavorazioni. Questa macchina ha elevata flessibilità grazie anche al

semplice montaggio di teste (sul montante) che permettono di trasmettere il moto del mandrino con diverse angolazioni o di montare uno slittone con un ponte (magari una contropunta) per lavorazioni con treni di prese o di pezzi molto lunghi.

LAVORAZIONI A MOTO DI TAGLIO RETTILINEO

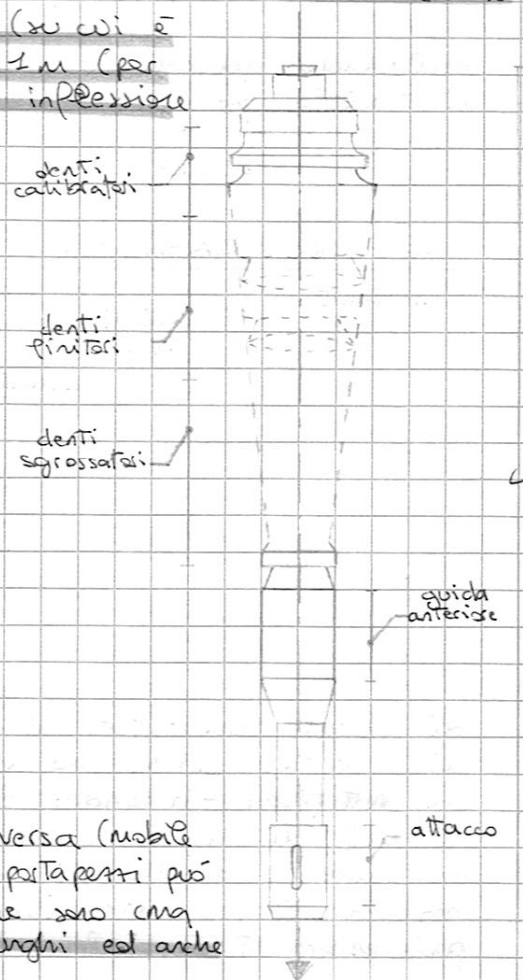
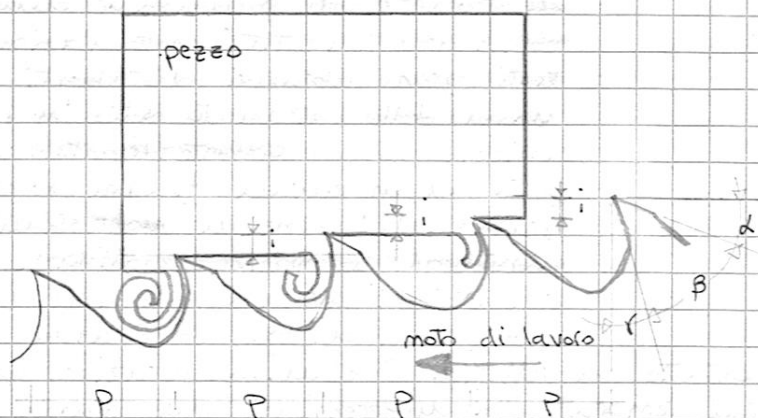


Sono lavorazioni necessarie per la realizzazione di superfici esterne piane (limatura, piattatura) e per la creazione di superfici interne tipo guide o linguette (stornatura) partendo da fori pre esistenti. Queste operazioni hanno in comune una bassa produttività e scarsa finitura superficiale a fronte di una spinta economica degli utensili. La limatura e

la piattatura si differenziano per pochi aspetti particolari:

- il moto di taglio è rettilineo alternativo per entrambe ma per la piattatura è posseduto dal pezzo in lavorazione. Questo è il principale motivo per il quale la produttività è bassa. Il moto alternativo, come è noto, è caratterizzato da ingenti forze di inerzia qual'ora le masse in gioco diventano ingrandi.
- il moto di alimentazione è posseduto dall'utensile per la piattatura mentre può essere compiuto anche dal pezzo in limatura. Tale moto, per entrambe, si realizza alla fine della corsa non produttiva.
- il moto di appostamento è altrettanto posseduto dall'utensile in piattatura e entrambe le possibilità per la limatura.

Gli utensili sono molto simili a quelli usati in Tornitura ed infatti anche per il calcolo di sforzi e potenze in gioco si rimanda a quanto detto per la tornitura. Anche i valori di profondità di passata sono alquanto simili. Gli utensili sono spesso fatti in acciai superduri ed in ogni caso devono resistere agli urti che sono presenti ad ogni ciclo di lavorazione. Le limatrici sono strumenti di notevoli dimensioni ed il moto alternativo è a carico di uno slittone (su cui è montato l'utensile). Il limite è di circa 1m (per la corsa) perché oltre subentrano problemi di inflessione dovuti alla resistenza dei vincoli dello slittone stesso. Come al solito la slitta portapezzo permette il posizionamento del pezzo in moltissime configurazioni diverse.



La piattatrice vede l'utensile fisso ad una traversa (mobile per il preposizionamento dell'utensile) e la slitta portapezzi può muoversi alternativamente. I limiti di produzione sono cmq forti ma la piattatrice può lavorare pezzi più lunghi ed anche finire e precisione di taglio superiore.

La storratura è per i profili interni a fori preesistenti. Ha le stesse caratteristiche delle operazioni rettilinee viste fino ad ora, con la sostanziale differenza che lo slittone (su cui è montato l'utensile) gode sì di moto alternativo ma si muove in modo verticale.

Le ultime due immagini della pag. precedente rappresentano il modo di lavorare di una broccia, e proprio una broccia per interni. La brocciatura è comunque un'operazione di asportazione rettilinea ma differisce molto dagli altri due perché viene utilizzato un utensile pluritagliente in cui il moto di alimentazione non esiste perché il processo viene completato in una sola corsa. Avvolte si sostituisce la brocciatura all'alestratura (soprattutto per lavorazioni interne). I vantaggi di questo metodo sono molteplici: ottima precisione dimensionale e finitura superficiale e buona durata della broccia. Purtroppo i costi di questi utensili sono elevati e giustificati solo da alte produttività.

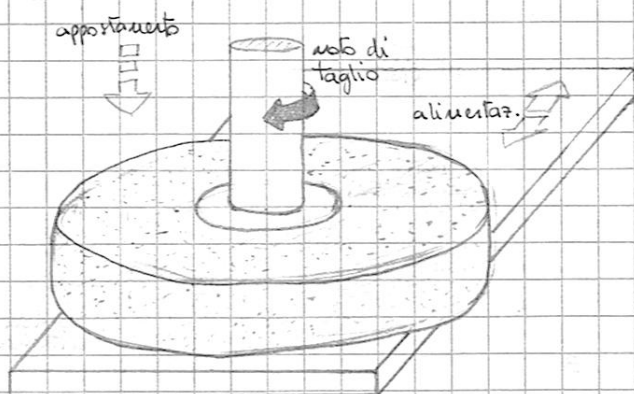
Come da disegno, la broccia ha dei taglienti in serie, sfalsati in "altezza" del valore i (incremento) ed a distanza p (passo). Sono intervallati da sedi raccogli truciolo. I primi denti che incontrano materiale sono sgrassatori ed hanno un incremento elevato (relativamente). Poi ci sono denti finitori (i piccoli) ed infine denti di calibratura in cui l'incremento è nullo. La guida anteriore è fondamentale per il centraggio del foro, a sua volta indispensabile per ottenere geometrie di buona fattura. Bisogna evitare nella brocciatura che la lunghezza del pezzo da brocciare sia un multiplo del passo (p) per evitare che contemporaneamente un dente smetta di lavorare e l'altro inizi il lavoro. (si creano problemi di ondulazioni superficiali). Inoltre la broccia non dovrebbe superare il metro di lunghezza perché la tempra che viene effettuata sulla broccia porterebbe a deformazioni eccessive. La valutazione del passo è valutabile con la seguente:

$$p = 1,5 \div 2,5 \sqrt{L}$$

escludendo quindi il valore che rende L un multiplo di p . La serie di truciolo per ogni dente in presa è:

$$S = i \cdot \ell$$

LE LAVORAZIONI DI RETTIFICA



La rettifica consiste nell'asportazione di truciolo di piccolissime dimensioni ed in gran quantità, sotto l'azione di tanti grani abrasivi distribuiti sulla massa dello strumento detto "mola", tenuti insieme da un collante (legante). L'operazione porta ad un'elevata finitura superficiale grazie all'azione di moltissimi taglienti (considerati a spalla negativa). L'elevata velocità di lavorazione è una delle cause (decine di m/s) ed è anche causa

di elevate temperature al contatto. La rettifica è l'unica operazione capace di lavorare anche su acciai temprati. Si differenziano due grandi gruppi di rettifica: - in tondo: lavorazioni su superfici cilindriche (esterne o interne); il moto di taglio è dell'utensile, quello di avanzamento può essere di entrambe e quello di spostamento è dell'utensile ed avviene solo quando non si è in lavorazione (e definisce la passata). La rettifica in piano può essere tangenziale o in piano (in figura) a seconda se si lavora

sono i grani sulla superficie sferica o piana della mole. In ogni caso l'alimentazione spetta al pezzo da lavorare ed il moto di apporto all'utensile quando non è in lavorazione.

I grani delle mole sono del primo gruppo se di diamante, corindone (ossido alu.) e la silice. Appartengono al secondo se fatti di ossido di alluminio, carburi o altri ossidi. Il legante può invece essere ceramico, al silicato o elastico (gomma). Quest'ultimo usato molto ad esempio per operazioni che presentano urti.

In generale si cercano grani grossi per operazioni di sgrossatura e con materiali di bassa durezza. La durezza della mole, invece, è inerente al legante e non al grano e deve essere elevata dove non vogliamo che i grani lascino la massa della mola facilmente. Per lavoraz. dove il consumo dei grani è elevato è meglio non avere il legante duro per espellere i grani arrotondati. Infine, una mola può essere presa o meno e ciò è a svantaggio della rigidità dell'utensile ma a vantaggio del raffreddamento.

Per le rettifiche esterne conviene usare la mola più larga possibile, mentre per i fri il suo diametro non può superare i $\frac{2}{3}$ di quello del foro per problemi di smaltimento del calore.

La mola è uno strumento molto duraturo grazie anche ad un oprat. di riavvittura; questa è fatta per mezzo di una tornitura con utensile al diamante, sulla superficie delle mole. La conseguenza è un recupero di forma geometrica (che può essere persa durante le varie operazioni per consumi irregolari) e soprattutto l'emersione di nuovi grani affilati, facendo cadere quelli arrotondati.

Per il calcolo della potenza per questa operazione, si può usare la formula empirica seguente:

$$W = 0,155 \cdot K \cdot \sqrt{V \cdot s} \cdot \sqrt{v/30} \quad [kW]$$

con V = volume del truciolo asportato nell'unità di tempo [cm^3/min]

v = velocità periferica di taglio [m/s]

s = spessore della mola a contatto con il pezzo [cm]

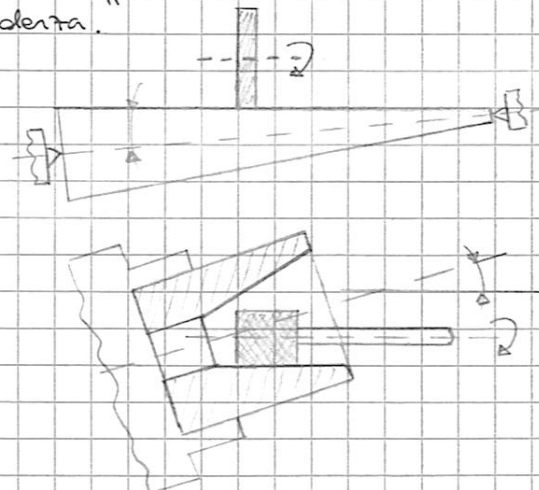
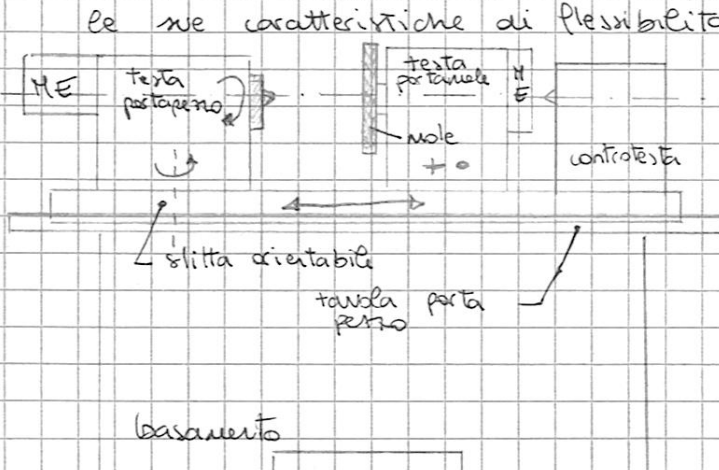
K = dipende dal tipo di rettifica:

↳ 7,5 in tondo per esterni

↳ 6,2 in piano

↳ 7,0 in tondo interna

Le rettificatrici sono strumenti di semplici caratteristiche cinematiche ma di elevata precisione realimentativa. La precisione di movimento e posizionamento di utensile e pezzo sono il loro forte. I cinesmatismi sono a cinghie per evitare vibrazioni, e i cuscinetti capaci di elevatissimi valori di rotazione al minuto. In figura è rappresentata una mola con le sue caratteristiche di flessibilità in evidenza.



NB: grazie a rotazione di testa e controtesta si effettuano rettifiche coniche.

CICLO DI LAVORAZIONE E REGOLE FONDAMENTALI DELLE LAVORAZIONI MECCANICHE.

È un ciclo di lavorazione, l'insieme delle operazioni necessarie a fabbricare un singolo elemento attraverso una successione di processi tecnologici.

Di sequenze di operazioni con le quali raggiungere lo scopo sono molteplici e spesso spetta all'esperienza degli addetti ai lavori definire i vari step (fasi) produttivi. Il motivo è legato all'enorme quantità di variabili, poco misurabili, in gioco. Bisogna avere buone conoscenze di economia, fisica, organizzazione industriale per produrre con elevate efficienze. La stesura di un ciclo di lavorazione può essere sintetizzata come segue:

- analisi critica del disegno di progetto: veloce analisi sulla possibilità o meno di approvvigionarsi della materia prima o sulla possibilità che i macchinari possano lavorare tali materiali
- determinazione dei processi tecnologici: elenco delle operazioni necessarie.
- stesura del ciclo per ogni macchina:
 - individuazione delle superfici da lavorare e quelle per il bloccaggio
 - determinazione delle singole operazioni (sgrossat, finitura...)
 - scelta degli utensili
 - scelta dei parametri di taglio
 - controllo qualità (scelta della modalità)
 - valutazione costi

Ecco invece, di seguito alcune regole fondam. da tenere in mente:

1. Nel disegno di un elemento, le quote con tolleranza, devono sempre essere indipendenti e mai legate a relazioni algebriche di altre quote
2. Le quote di fabbricazione (che indicano all'operatore della macchina dove lavorare) di una superficie lavorata è definita dalla posizione del tagliente rispetto alla relativa superficie di riferimento. E quindi
3. le quote di fabbric. possono essere diverse a seconda degli utensili usati.
3. Una quota di fabbricazione deve essere verificata (controllo qualità) utilizzando gli stessi riferimenti di origine.

CONDIZIONI DI PLASTICITÀ E DEFORMAZIONI PLASTICHE.

Quando le sollecitazioni applicate ad un provino fatto di qualsiasi materiale, superano un certo limite, si causano variazioni nella forma (deformazioni) che persistono anche dopo la rimozione delle sollecitazioni. In queste condizioni siamo nel campo delle deformazioni plastiche. Lo studio che porta alla conoscenza di regole generali per la valutazione di queste sollecitazioni limite, necessita la conoscenza dello stato di tensione in ogni punto del provino. Si dice condizione di plasticità lo stato limite delle tensioni che portano a queste deformazioni plastiche. La condizione da noi adottata sarà quella (empirica) introdotta da Guest e detta della "massima sollecitazione tangenziale". Questa condizione presuppone che la deformazione plastica avvenga sempre a causa di uno scorrimento interno di masse elementari su altre e si basa anche sulla costanza del volume istante per istante. Guest affermava che: si raggiunge una ~~note~~ def. plastica in un punto del materiale, ~~per~~ appena la forza tangenziale locale raggiunge un valore caratteristico del materiale (K). Per arrivare alle conclusioni del Guest analizziamo un punto interno qualsiasi di un generico corpo sottoposto a più forze esterne ed interne ed in equilibrio. Se eseguiamo un taglio dividendo con l'immaginazione questo corpo, possiamo sostituire alla porzione di solido asportata, un complesso di forze applicate adeguatamente per sostituire la parte asportata. Per la meccanica del continuo queste forze sono univocamente definite e sempre esistenti. Si postuli, ancora, che queste forze non sono concentrate e quindi l'aliquota infinitesima della F che agisce sulla superf. di taglio (infinitesima) dS , sia dello stesso ordine di dS rendendo finito il valore dF/dS che definisce una sollecitazione. Scomponendo la dF in due valori (dN e dT) tangenziale e normale a dS , definiamo le sollecitazioni (o tensioni) normali e tangenziali. Anch'esse finite o al limite nulle. dS può essere la generica porzione infinitesima che contiene il punto P in analisi. Tra le infinite angolazioni che può assumere dS (e quindi il taglio), ci sono 3 angolazioni che definiscono gli "elementi principali" del punto P . Queste dS sono caratterizzate da avere una sollecitazione tangenziale nulla ($\tau = 0$). Le relative sollecitazioni normali (σ) sono invece diverse da zero. Tra le tre la σ_1 sarà per convenzione la più grande e negativa se di compressione (cioè con la dF diretta verso l'interno del solido residuo dal taglio). Si dimostra che qualsiasi altra orientazione di dS , vede agire in P una tensione normale compresa tra σ_1 e σ_3 e soprattutto si dimostra che la τ_{max} è data da:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

e agisce su una particolare dS , piano che biseca l'angolo formato da dS_{σ_1} e dS_{σ_3} e che contiene σ_2 . (Dimenticato di scrivere che gli elementi principali di P sono mutuamente ~~pari~~ perpendicolari) Si dimostra, ancora, che qualsiasi τ , ed in particolare la τ_{max} , risulta nulla se $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Questa condizione è detta di "sollecitazione idrostatica" dato che le τ sono nulle per qualsiasi corpo immerso in un fluido. Riepilogando, la condizione di plasticità di Guest è sintetizzata dalla seguente:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = K$$

Se è verificata questa equazione, siamo nel campo del plastico.



Per un cilindro in trazione possiamo effettuare ragionamenti per giungere alle condizioni di plastic. di cui sopra:
La sollecitazione normale a superfici orientate come ds sarà:

$$\sigma_0 = \frac{F}{S_0}$$

Su un elemento ds' invece, solo un'aliquota di dF sollecita quella superficie in maniera normale, e comparirà anche un'aliquota tangenziale. Questa sollecitazione, media, sarà

$$\bar{\tau} = \frac{T}{S'} = \frac{F \sin \alpha \cos \alpha}{S_0}$$

perché: $T = F \sin \alpha$ e $S' = S_0 / \cos \alpha$
ma: $\sin \alpha \cos \alpha = (\sin 2\alpha) / 2$ e $F / S_0 = \sigma_0$

$$\bar{\tau} = \frac{\sigma_0}{2} \sin 2\alpha \quad \Rightarrow \quad \tau_{\max} = \frac{\sigma_0}{2}$$

e questo valore raggiunge il suo massimo per $\alpha = 45^\circ$. Si poteva anche notare che essendo

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_0}{2}$$

dato che $\sigma_1 = \sigma_0 = \sigma_{\max}$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ per $\alpha = 0$ (uno degli elementi principali).

Per la condiz. di plast. di quest, se:

$$\tau_{\max} = K \quad \text{e cioè se} \quad \boxed{\sigma_0 = 2K}$$

il provino subirà deformazioni permanenti e quindi plastiche. Questo valore limite può essere usato come misura di deformazione resistenza a deformazione di quel materiale. La resistenza a deformazione è funzione della temperatura e si chiamano deformazioni plastiche a caldo, se durante una trasformazione (o sollecitazione), la resistenza non varia. Sotto certe temperature, invece, si nota un aumento di resistenza a deformazione durante una lavorazione. È noto che si può parlare di def. a caldo se siamo nel range di temperatura compreso nell'ultimo terzo dell'intervallo $0 \div T_{\text{fusione}}$ del materiale ferroso in analisi. Causa dell'aumento della resistenza a def. dei metalli, è l'incrudimento che è un'alterazione della regolare forma dei reticoli cristallini. Infatti il fenomeno ha conseguenze anche su caratteristiche meccaniche e tecnologiche. Il fenomeno che può smorzare l'incrudimento, è la temperatura o meglio l'agitazione molecolare; questa produce un riassetto delle posizioni dei cristallini. Ecco spiegato perché l'incrudimento (e quindi l'aumento della resist.) è assente nelle lavoraz. a caldo. L'incrudimento ha un limite fisico, ed è quello della saturazione: si giunge ad un punto tale del disordine che successive sollecitazioni portano tanto ordine quanto disordine nel reticolo cristallino, bilanciando i due eventi. Altro fattore legato alla resistenza, è la velocità di deformazione; a parità di altre condizioni, un provino oppone maggior resistenza per deformazioni veloci. (Si parla solo di deformazioni a caldo). Così non è per le def. a freddo. Dimostraremo:

n' = atomi fuori posto

$-rn'$ = velocità di riassetto dovuta all'agitazione termica ($= dn'/dt$)

D = atomi che passano in posizione irregolare nell'unità di tempo

Potremo considerare D costante per una trasformazione a caldo, dato che non si raggiunge la saturazione di atomi sordinati causata dall'agitazione termica, si può scrivere:

$$\frac{dn'}{dt} = D - rn'$$

Cioè, la velocità con la quale gli atomi passano a posizioni disordinate è computo di un effetto favorevole (incrudimento) ed uno sfavorevole (agit.) all'evento. Proprio perché D è costante, possiamo ammettere un equilibrio dei fenomeni tali che $dn'/dt = 0$ ed n' tende al valore limite D/r . Infatti è:

$$\frac{dn}{D - rn} = dt \quad \Rightarrow \quad -r \left(\frac{dn}{D - rn} \right) = -r dt$$

$$\Rightarrow \frac{d(D - rn)}{D - rn} = -r dt \quad \text{perché} \quad d(D - rn) = -r dn$$

$$\Rightarrow \int \frac{d f(x)}{f(x)} = \ln f(x) \cdot f'(x) \Rightarrow [\ln(D - rn)]_0^n = -rt$$

$$\Rightarrow \ln \left(\frac{D - rn}{D} \right) = -rt \Rightarrow \frac{D - rn}{D} = e^{-rt} \Rightarrow n = (1 - e^{-rt}) \frac{D}{r}$$

Questo valore tende a D/r per $t \rightarrow \infty$ ma già con $rt = 5$ possiamo considerare n tendente a D/r . Questo vuol dire che n sarà tanto maggiore quanto maggiore è D e quindi la resistenza a def. tanto maggiore quanto maggiore è la velocità di deformazione.

Per le deformazioni a freddo l'agitazione termica non riesce a rimettere atomi in ordine in tempo perché altri se ne disordinano e si raggiunge uno stato di incrudimento saturato e D non è più costante.

LAVORO E RENDIMENTO DI UN PROCESSO DI DEF. PLASTICA

Si definisce R , resistenza alla def. plastica, come la forza unitaria da applicare per avere uno schiacciamento della dimensione a nella direzione a . Immaginiamo un parallelepipedo $a \cdot b \cdot c$. Se consideriamo il lavoro come valutabile esclusivamente dalla forma iniziale e finale della lamination (non ci interessa il percorso) e se consideriamo la deformazione come parallelepipedo (il provino rimane istante per istante regolare e non sappiamo nulla degli scorrimenti interni) definiamo

$$dL = -R b c da$$

dL come lavoro speso per produrre lo schiacciamento da . Lo schiacciamento è negativo mentre il lavoro fatto dall'esterno è positivo (come sempre nei bilanci). L'integrale da a_0 ad a_1 ci dà il lavoro complessivo:

$$L = \int_{a_0}^{a_1} -R b c da = \int_{a_0}^{a_1} -R b c \frac{a}{a} da = \int_{a_0}^{a_1} -R V \frac{da}{a} = -R V \int_{a_0}^{a_1} \frac{1}{a} da = \\ = R V \ln \frac{a_0}{a_1} \quad (\text{lavoro di def. parallelepipedo a freddo})$$

Il volume è costante (riscontri pratici) ed abc è ricavabile da $a_0 b_0 c_0$. R è finito fuori dall'integrale in quanto la lamination considerata è a caldo; possiamo sostituire ad esso un valore medio per lavorazioni a freddo:

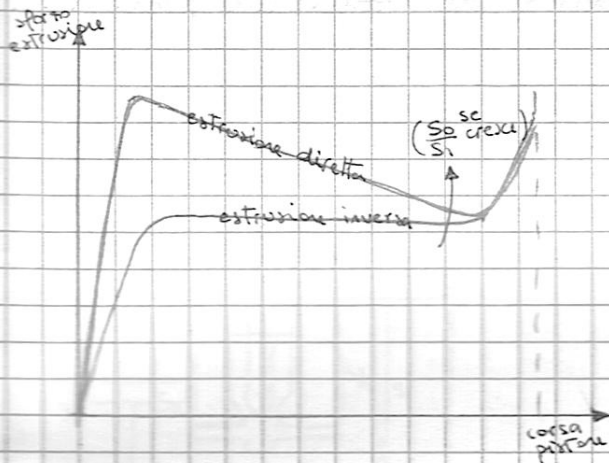
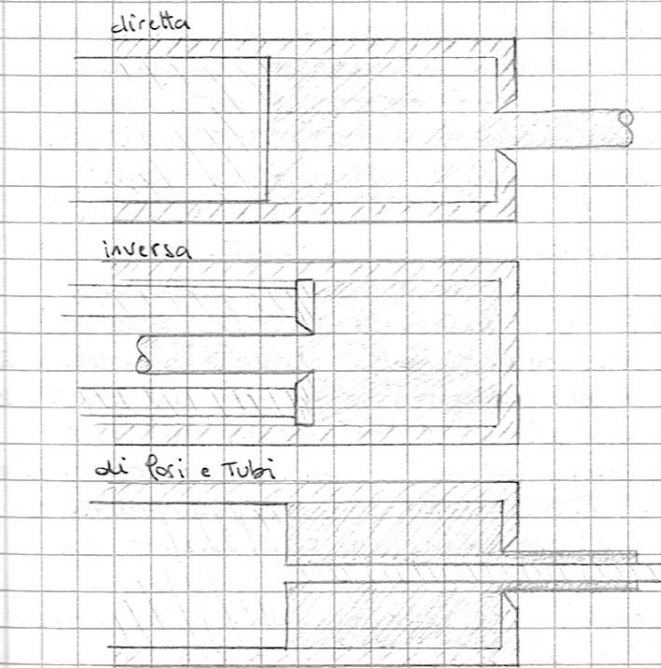
$$L_{\text{freddo}} = R V \ln \frac{a_0}{a_1}$$

Spesso (anzi, sempre) il reale lavoro necessario per una tale deformazione è più ampio di quello limitato di def. parallelepipedo. Il motivo risiede nel non tenere conto di una resistenza maggiore e legata a molti fattori. Si può comunque definire un rendimento di lavorazione come

$$\eta = \frac{L_{\text{utile}}}{L_{\text{speso}}}$$

Quello speso è misurabile (assorbimento elettrico a monte dei macchinari per esempio) ma non lo è facilmente quello utile. Se il nostro unico obiettivo è quello di deformare un corpo allora possiamo prendere come lavoro utile quello di def. parallelepipedo ma spesso una deformazione non è l'unico obiettivo: avvolte si ricerca, ad esempio, l'incrudimento. Spesso quindi quel rendimento va ben valutato come è stato calcolato.

IL PROCESSO DI ESTRUSIONE



a



È un processo tecnologico per def. plasti che costringe il materiale attraverso un orifizio tale da imporgli quella sezione. Le tre figure rappresentano estrusioni dirette, inverse e quelle per i tubi. La forza di pressione è esercitata da un opportuna pressa ed è dipendente dalla natura del metallo, temperatura di lavoro, velocità di estrusione e rapporto tra la sezione iniziale e quella finale. Le temperature raggiungono i 400° per le leghe leggere, gli 800° per ottoni, rame e anche 1100° per leghe cupro-nichel. Le elevate temperature in gioco ed anche le pressioni, hanno conseguenze anche sui macchinari e questi problemi sono tali che il processo di estrusione era una lavorazione applicabile solo a leghe e metalli con basse temp di fusione. Solo in tempi recenti si è riusciti ad estrudere anche materiali duri come l'acciaio. Ci si è riusciti grazie ad un trattamento chimico superficiale chiamato fosfatizzazione. L'effetto è quello di diminuire gli attriti e aumentare la velocità di estrusione; ciò ha a sua volta permesso di ridurre i tempi di trasferimento di calore per contatto (che causa l'indebolimento dei macchinari).

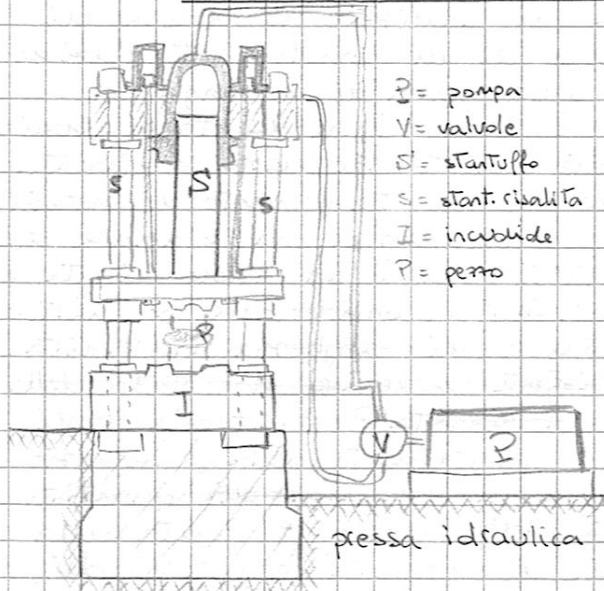
Da notare dal grafico che l'estrusione diretta necessita di sforzi maggiori. La causa è il maggior attrito tra lingotto e pareti interne dato che il materiale da estrudere deve scorrere sulle pareti interne. Sommata a questa resistenza all'avanzamento, c'è ovviamente lo sforzo di deformazione plastica. Il picco a fine corsa è dovuto al restringimento degli spazi tra pistone e cilindro e la maggior difficoltà che ha il materiale a fluire in queste condizioni.

Spesso si rinuncia all'estrusione a fine corsa. Nell'estrusione inversa manca l'aliquota dovuta allo strisciamento lingotto cilindro ed infatti a parità di altre condizioni, l'estrusione inversa ha bisogno di pressioni inferiori. Altro inconveniente dell'estrusione diretta è la cavità imbutoforme che si allunga all'interno del materiale estruso rendendolo fragile. La causa sono le zone morte e la diversa velocità di efflusso nelle zone dell'orifizio con più o meno attriti. Questa cavità interna può interessare anche il 20% della lunghezza dell'estruso e curarsene dopo vorrebbe dire troppi sfidi di lavorazione. La quinta figura è una delle soluzioni praticabili per ovviare al problema: il pistone con quella forma esercita più pressione sulle zone morte del lingotto "convincendolo"

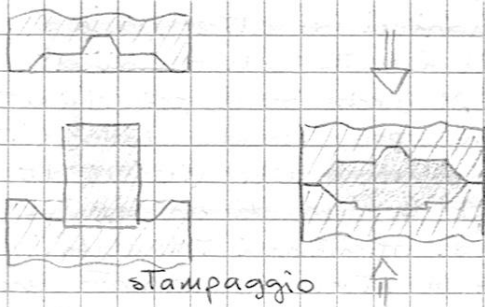
a fluire con la stessa portata della zona centrale del lingotto. La seconda soluzione è quella di un pistone con gioco (e quindi da centrare con particolare attenzione) in modo da rimanere un anello di 3 o 4 mm di ~~seg~~ larghezza attraverso il quale può essere espulsa la parte del lingotto più esterna (detta pelle esterna) ossidata, che altrimenti si incuneerebbe nella cavità di cui sopra. L'ultimo disegno è un ingrandimento della zona dell'orificio. Quella è la sua forma caratteristica dovuta a semplici considerazioni: l'imbocco serve per facilitare la fuoriuscita del materiale; una sezione trasversale causerebbe troppi attriti esterni rispetto al centro del foro, rendendo il materiale estruso poco omogeneo o addirittura provocando delle cricche superficiali dovute a scorrimenti troppo differenziati. La zona rettilinea di larghezza "a" è un compromesso tra attrito (che aumenta con l'aumentare di a) e la forma che deve avere il materiale estruso; quella forma permette una superiore finitura superficiale. L'altra superficie ~~serve~~ tiene conto del ritorno elastico perché uno spigolo vivo aumenterebbe l'abrasione e rovinerebbe la finitura superficiale.

Note: il materiale subisce diversi gradi di inacidimento tra inizio e fine estrusione, tanto da necessitare di altre lavorazioni dopo. Esiste anche l'estrusione per urto adatta per tubetti tipo dentifricio.

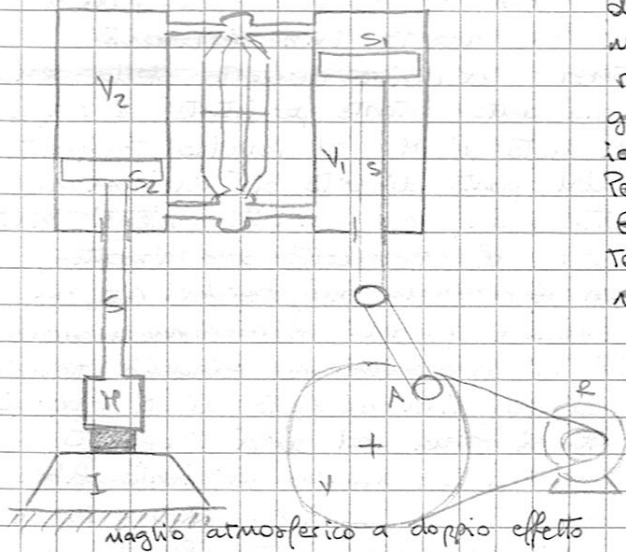
FUCINAZIONE ALLA PRESSA ED AL MAGLIO



P = pompa
V = valvole
S = stantuffo
I = stanti. risalita
P = pezzo

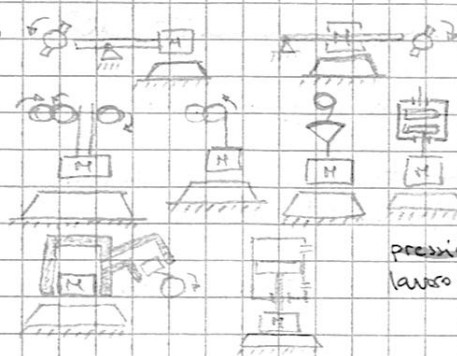


stampaggio



MAGLI

- A LEVA (alternata, Pontale, a sollevamento)
- A TRASMISSIONE LENTA (a tavola o a cinghia)
- A TRASMISSIONE VELOCE (attuatore a cinghia)
- AD AZIONE DIRETTA (a vapore, ad aria compressa)



a mano o meccanico automatico

nei primi le marte sono lasciate libere di cadere nei secondi c'è un effetto elastico che riporta su la marte.

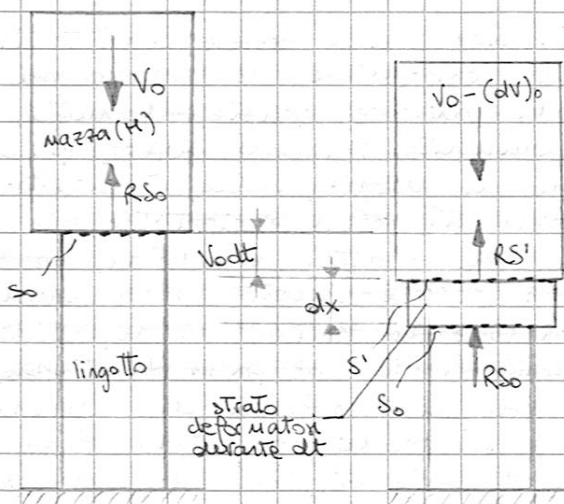
pressioni e depressioni dei fluidi lavoro, e stantuffi, muovono la marte.

mosse da forze di compressione o da volano e cambio riduttore.

PRESSE

- IDRULICHE
- MECCANICHE

La fucinazione alla pressa consiste in una lenta compressione del blocco di metallo da lavorare grazie al moto di avvicinamento tra due superfici. La fucinazione al maglio, invece, è caratterizzata da martellamenti veloci e ripetuti. Sia per l'una che l'altra macchina, se le superfici in avvicinamento sono sagomate in maniera tale da formare il negativo del prodotto finito, si parla di stampaggio. Qualsiasi sia la tecnologia di funzionamento dei magli, essi producono intense forze impulsive di sollecitazione sui pezzi da lavorare, dovuto alla (quasi) istantanea trasformazione dell'energia cinetica in urto. Il carattere propagatorio di questo tipo di forza, fa sì che la deformazione interessi tutto il corpo da lavorare. La pressa, invece, per sua natura, impone la deformazione solo su alcune sezioni del pezzo e ciò è dovuto alle condizioni di plasticità che si raggiungono prima in certe zone che in altre. Il riscaldamento precoce generato in queste zone, fa diminuire la resistenza a deformazione locale, accentuando a sua volta il fenomeno. A parità di deformazione è quindi da preferire il maglio per quanto riguarda omogeneità dei risultati. Però sono noti i problemi dei grossi magli nella progettazione di strutture idonee a resistere agli enormi sforzi dinamici. Per i grossi lingotti sono ancora preferibili le presse perché con esse si raggiungono elevate deformazioni. Ancora a vantaggio dei magli è però la lavorazione di filo (o di bassa penetrazione) dato che con le giuste proporzioni delle masse in gioco si possono ottenere deformazioni superficiali senza intaccare l'anima del lingotto. Qui di seguito un elenco di magli e presse di diversa tipologia:



Cerchiamo di analizzare il processo di deformazione di un lingotto sotto l'azione energetica della maza di un maglio a velocità V_0 . Come origine dei tempi assumiamo l'incipiente contatto tra maza e lingotto. Supponiamo che nel trasferimento di energia cinetica al petto non ci sia l'azione di forze costanti (magli ad azione diretta e forza peso). Inoltre consideriamo prismatico il lingotto e di lunghezza indefinita. dt è l'istante successivo al contatto della maza sul lingotto. Per la teoria degli urti (e fondamentalmente della conservazione dell'energia) la variazione di quantità di moto della maza M , legata alla variazione di velocità (negativa) dV ,

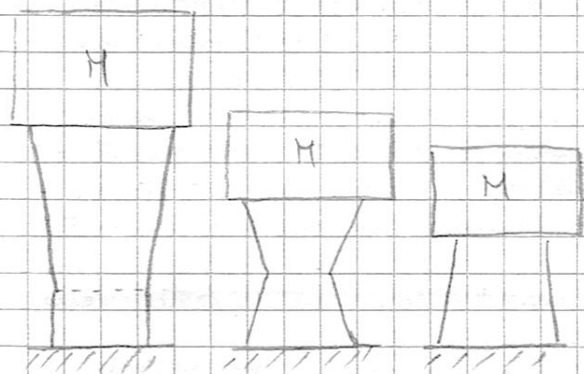
deve eguagliare le energie di impulso trasferite ad altre masse, aumenti di quantità di moto di altre masse o deformazioni di altre masse o della massa stessa. In effetti alcune fibre del lingotto alla fine di dt devono aver acquisito la stessa velocità di M (anche per la parte rigidità della maza rispetto al lingotto). Contemporaneamente, però, essendo indefinita la lunghezza del lingotto, non possono essersi mosse alla fine di dt tutte le fibre a qualsiasi distanza da S_0 . Solo le fibre di un infinitesimo spessore dx acquistano una velocità V_0 (a meno di infinitesimi trascurabili) altrimenti una massa finita di fibre avrebbe in un istante dt raggiunto una velocità finita e ciò sarebbe giustificabile solo con una forza infinita. Se le fibre su S_0 si sono mosse e quelle oltre dx no, non c'è altra alternativa che concepire uno schiacciamento della zona del lingotto immediatamente successiva a S_0 con una riduzione dell'altezza e successivo aumento della sezione S_0 ad S_1 (per la costanza del volume). Come già detto, istante per istante, è verificata un'equazione tra variazione di quantità di moto di M , ed impulso trasferito tra le sezioni successive sempre più distanti dal punto di urto più variazione di quantità di moto del volumetto, legato a dx , del lingotto. Negli istanti successivi a dt , quello che succede è che il volumetto del lingotto, di altezza dx , inizialmente deformatosi, non si deforma più, perché non ha più moto relativo rispetto ad M . La sua massa quindi, si aggiunge a quella di M aiutandola a trasferire energia più in profondità nel lingotto. Reiterando il discorso e vedendo nei successivi dt , la quantità di moto di M ridursi sempre più, succede inevitabilmente che M si ferma ed avrà trasferito tutta la sua energia cinetica. Gli effetti dell'urto avranno raggiunto fibre distanti una certa x dalla S_0 . Da qui si nota la natura propagatoria degli urti dei magli. Introducendo "y", un valore adimensionale legato al materiale in deformazione e velocità della maza:

$$y = V \sqrt{\frac{P}{R}} \quad \text{con} \quad y_0 = y(t=0)$$

possiamo definire penetrazione del maglio (distanza massima da S_0 alla quale arrivano gli effetti del colpo):

$$x = \frac{M}{\rho S_0} y_0 \quad (\text{è una formula approssimata})$$

Ora è anche chiaro perché era considerata indefinita la lunghezza del lingotto: è noto che se la penetrazione degli effetti del maglio sono maggiori della lunghezza del maglio, questi si



riflettono sull'incudine e poi eventualmente anche sulla mazzetta e così via fino ad esaurimento dell'energia. In figura sono (in maniera amplificata) rappresentati gli effetti di un maglio a penetrazione insufficiente, uno ad una riflessione ed uno a molte riflessioni.

Partendo dalla analisi di formule come quella della penetrazione si giunge a conclusioni (più o meno empiricamente verificate) sul rapporto tra le masse o i volumi di marte e petto da lavorare

(del tipo l'incudine è 100 volte grande il petto da lavorare). La cosa è necessaria perché sia magli troppo leggeri (molta deformazione in superficie, poca penetrazione) che troppo pesanti, vanno usati con cura e analizzando queste variabili. Ad esempio, a parità di altro, l'aumento della V_0 comporta sì maggior penetrazione ma anche disuniformità di deformazione; l'aumento della massa M comporta uniformità e penetrazione ma pochi materiali possono meccanicamente essere sollecitati a questi impulsi; un aumento della temperatura di lavorazione ha dirette conseguenze sulla resistenza a deformazione, che se diminuisce, aumenta penetrazione e (di molto) la disuniformità. Un modo veloce, ma poco approssimato rispetto al precedente, per leggere le variabili nelle mani del progettista e le deformazioni, è il seguente:

$$dL = -RS dh = -RS_0 h_0 \frac{dh}{h} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L = \int_0^h dL = -RS_0 h_0 \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = -RS_0 h_0 \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = RS_0 h_0 \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

$$\frac{1}{2} M V_0^2 = RS_0 h_0 \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

$$V_0 = \sqrt{2gh} \text{ (velocità torricelliana)}$$

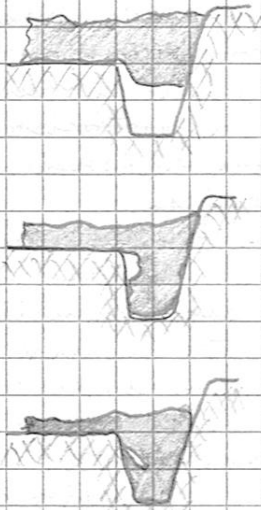
È stata uguagliata l'energia cinetica iniziale di M , al lavoro necessario per una deformazione parallelepipedica immediatamente trasferita a tutte le fibre del lingotto contemporaneamente. La formula da deformazioni maggiori a quelle realmente raggiungibili.

Il rendimento di ogni colpo di un maglio, dipende dalla quantità di energia cinetica trasferita al petto, dall'aliquota dispersa nell'incudine (facendo acquisire energia cinetica a quest'ultima) e dall'aliquota che respinge indietro la mazzetta, alleggerendo il lavoro a qualsiasi sia il sistema di risalita.

Tutti questi valori dipendono a loro volta dall'elasticità o meno dell'urto. Un urto elastico trasferirebbe molto moto alle masse (mazzetta ed incudine) e poca deformazione al petto, ecco perché vogliamo delle alte temperature in luccinazione. Inoltre è da notare che la deformazione è legata alla velocità relativa tra incudine e mazzetta e se la massa della ~~mazzetta~~ incudine è minima, essa velocemente (bassa inerzia) raggiungerà la velocità della mazzetta, annullando gli effetti sul petto tra loro compreso. Ecco, invece, perché la massa delle incudini sono anche 15 volte quella della mazzetta.

Ultima nota sui magli: è relativamente semplice ipotizzare le V_0 di un maglio a semplice effetto (caduta libera) mentre comincia a complicarsi il discorso per un maglio a doppio effetto (spinta in aggiunta alla gravitazione anche di altre forze attive).

La lavorazione alle presse non ha natura temporaria e conviene più analizzare i risultati di certe deformazioni più che il modo in cui si trasferisce energia...

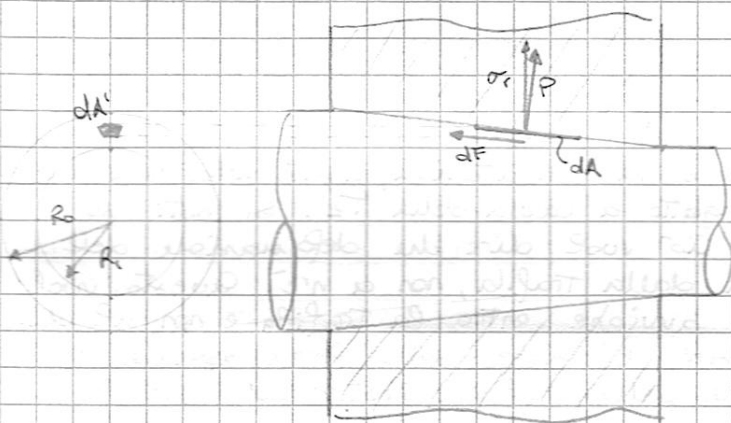
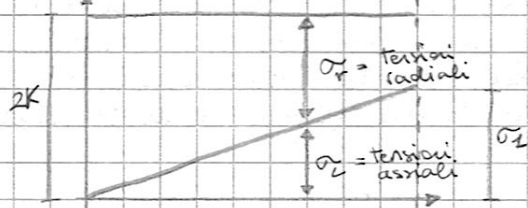
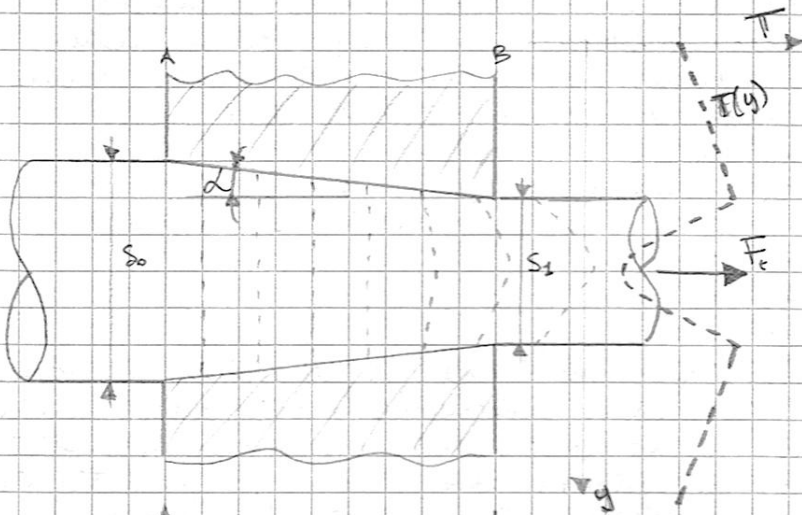


Di seguito un elenco delle principali difficoltà che si incontrano nell'effettuare operazioni di luccinazione o stampaggio con le presse:

1. Nel luccinare lingotti con stampi paralleli e una forma, la zona del lingotto a contatto con gli stampi possiede resistenza maggiore a causa dell'attrito in zona e del maggior raffreddamento grazie all'aliquota dovuta alla conduzione.
2. Nel comprimere un cilindro con foro, questo tende a ridursi il suo diametro.
3. Se i lingotti da luccinare (comprimere) ha altezze tre volte superiori alle dimensioni trasversali, si verifica inflessione laterale casuale e siamo ben lontani dal concetto di deformare parallelepipedo.
4. Per quanto riguarda la luccinatura con stampi, può risultare difficile riempire ogni angolo o lingua dello stampo causa pressioni non sufficienti o esercitate in zone errate.

5. La forte deformazione plastica dovuta alla contrizione del metallo di fluire, può provocare lacerazioni nella struttura.
6. Come in figura, per le gole profonde, alcuni gradienti di velocità del metallo nel fluire, possono provocare piegature di quel genere.
7. Il volume del metallo del patterna potrebbe non essere sufficiente, creando bolle di vuoto o zone non riempite.
8. Il metallo solidifica (ritirandosi) in maniera diversa nelle diverse zone degli stampi, ed è buona norma che il peso che si stampa sia prossimo a quello dei buoi finiti (pochi scarti).
9. Lo stampo superiore e inferiore potrebbero non essere allineati causando forme e lingue non volute.
10. Lavorare con gli stampi in maniera non continua, vuol dire sottoporli a cicli termici più intensi e stressanti.
11. La contrazione dovuta al raffreddamento può raggiungere il 1,5% - 1,6% e se ne deve tenere conto sia per gli stampi che per il materiale.
12. È fondamentale che ci sia un'inclinazione delle superfici degli stampi ($\alpha \approx 7^\circ$) per permettere l'estrazione dei pezzi.
13. I cicli termici di stampi e pezzi vengono effettuati in forni e si possono formare delle scaglie di ossido che poi si dividono dalle masse principali per producendo una perdita di massa anche del 7,5% per pezzi fino a 5Kg.

TRAFILATURA DI BARRE E FILI



È il processo di def. plastica che vede un lingotto di giusta forma, essere costretto da una forza di trazione, a passare per il foro a sezione decrescente di una trafilatura. È un'operazione che riduce la sezione del lingotto e ne aumenta le proprietà meccaniche. È fatta a freddo per assicurare la giusta resistenza del lingotto alla trazione, ma comunque ci sono notevoli sbalzi di temperatura in

zone critiche. La finitura di usata è solitamente elevata. Le trafilature sono fatte di acciaio con buon tenore di carbonio e temprati per la maggior parte delle lavorazioni, ma possono essere anche in ghisa o addirittura con carburi di cobalto o di manganese. Ovviamente vale sempre il discorso dei compromessi economici e dei materiali. La durata delle trafilature può essere molto limitata dai consumi che possono, senza precauzioni, diventare elevati. Spesso il materiale da trafilare viene lavorato prima per ridurre gli attriti causati dagli ossidi superficiali. La rollatura consiste nel far passare il lingotto tra due cilindri ad asse sfasato con lo scopo di eliminare questi ossidi. Il decapaggio consiste nell'immergere il lingotto

in una soluzione di acido solforico, cloridrico e nitrico, risciacquare e reinvenire per la riduzione dell'idrogeno, che lo indebolisce (non permettendo di raggiungere velocità più elevate di lavorazione). La fosfatizzazione consiste nel tenere a bagno per 10 minuti il lingotto nello zinco a 90°C e serve per creare uno strato superficiale che trattiene (è poroso) il lubrificante e serve per raggiungere uno stato di lubrificazione ad attrito quanto meno untuoso. Data la criticità dell'operazione spesso le riduzioni di sezione avvengono in maniera graduale in più passate ed ogni due si effettua una ricottura per eliminare le tensioni interne dovute alle lavorazioni. Le differenze di temperatura tra anima e bordi del lingotto ad esempio, generano raffreddamenti (e quindi contrazioni) differenti. Il risultato è un gradiente radiale di tensioni nel lingotto lavorato. ~~La finitura ora si assottiglia la modalità di plastificare e la forza in gioco in trafilatura.~~



La trafilatura di barre avviene a freddo come detto. Quella di tubi invece, causa la minor resist. a trazione dovuta all'anima vuota, può avvenire a temp. leggermente superiori. Per le riduzioni di spessore si usano i mandrini fissi e mobili. Quello fisso presenta un'ulteriore aliquota di attrito, quello mobile, avvolte, problemi di slittamento. Per i fili si usano le trafilature multiple e riduzioni multiple (causa lunghezza del filo).

Dato che spesso in Trafilatura il rapporto S_0/S_1 è molto vicino all'unità, possiamo considerare la trasformazione come parallelepipedo, quindi monodimensionale. In questo caso sappiamo che il lavoro per deformazione del quere è dato da:

$$W_{01} = \int_{L_0}^{L_1} \sigma S dL = \sigma_m \int_{L_0}^{L_1} S dL = \sigma_m S_0 L_0 \int_{L_0}^{L_1} \frac{dL}{L} =$$

$$= \sigma_m S_0 L_0 \ln \frac{L_1}{L_0}$$

sappiamo che σ è la sollecitazione su S ed ha dimensioni di forza su superficie proprio come R (resist a deformar). Questo valore varia per effetto dell'incrudimento e per uscire dall'integrale va sostituito con un valore medio σ_m . Per la costanza del volume il prodotto tra una sezione e la lunghezza corrispondente è costante. Questo lavoro deve uguagliare quello di una forza di trazione che estrae il lingotto dalla ~~trafila~~ trafilatura. Questa forza agisce per una lunghezza L_1 , proprio data dalla lunghezza finale della trafilatura.

$$W_{01} = F_z \cdot L_1 = T_z \cdot L_1 = \sigma_m S_0 L_0 \ln \frac{L_1}{L_0} = \sigma_m S_1 L_1 \ln \frac{S_0}{S_1}$$

$$\Rightarrow T_z L_1 = \sigma_m S_1 L_1 \ln \frac{S_0}{S_1}$$

$$T_z / S_1 = \sigma_z = \sigma_m \ln \frac{S_0}{S_1}$$

Con σ_z si è rappresentato lo sforzo o la sollecitazione, agente sulla superficie di uscita dalla trafilatura, ~~da~~ sulla lingotta a causa della T_z . Si noti che $\sigma_z < \sigma_m$ dato che $S_0/S_1 \approx 1$. Ciò vuol dire che deformazione del lingotto, nella sezione di uscita dalla trafilatura, non c'è. Questo vuol dire che ~~tutta la deformazione avviene entro la trafilatura~~ e non al di fuori. Il lingotto, oltre che subire l'azione della forza assiale esiste della reazione delle pareti interne della trafilatura. Ipotizzando piccolo α sufficiente, l'angolo di trafilatura α , possiamo considerare questa reazione radiale, perpendicolare all'asse del lingotto. L'angolazione delle superfici che contengono la σ_z di trazione e la σ_r radiale, è di 90° e formano gli elementi principali della condizione di plasticità da noi adottata. La σ_z corrisponde alla più grande delle sollecitazioni e quindi non appena la σ_{max} raggiunge il valore K si ha def. plastica:

$$\frac{\sigma_z - \sigma_r}{2} = K \quad \Rightarrow \quad \sigma_z + \sigma_r = 2K$$

in realtà σ_r è di compressione e va presa positiva. σ_z assume il suo massimo valore σ_z nella sezione di uscita, ed è nullo in quella di entrata. Il suo complementare al valore $2K$ è σ_r , che quindi avrà il suo minimo valore in uscita ed il suo massimo in entrata. A queste sollecitazioni si deve aggiungere quella di attrito tra trafilatura e lingotto. Questo valore è legato alla pressione media che a sua volta può essere ricavata dal valore della sollecitazione radiale media nel tratto AB, moltiplicata per la superficie interna della trafilatura. L'aliquota della forza di pressione agente sull'area infinitesima dA della trafilatura è

$$dF = f p dA$$

è ovviamente stato rappresentato con f il coeff. di attrito, e con p il valor medio della pressione. Proiettando tutto sulla superficie di ingresso (cambio di variabile) sarà più facile integrare.

$$\left. \begin{aligned} dF' &= f p dA \cos \alpha \\ dA' &= dA \sin \alpha \end{aligned} \right\} dF' = f p \frac{dA'}{\tan \alpha}$$

La somma di tutte queste aliquote infinitesime darà lo sforzo minimo assiale da dover applicare al lingotto per vincere le forze di attrito.

$$F' = \int_{R_0}^{R_1} dF' = \int_{R_0}^{R_1} f p \frac{dA'}{\tan \alpha} = \frac{f p}{\tan \alpha} \int_{R_0}^{R_1} dA' = \frac{f p}{\tan \alpha} \pi (R_1^2 - R_0^2)$$

La superficie anulare avrà l'estensione $S_0 - S_1 \dots$

$$F' = \frac{f p}{\tan \alpha} \pi (R_1^2 - R_0^2) = \frac{f \cdot p}{\tan \alpha} (S_0 - S_1) = \frac{f \cdot p}{\tan \alpha} S_1 \left(\frac{S_0}{S_1} - 1 \right)$$

a questa forza di attrito corrisponde una sollecitazione contraria a quella di trazione, nella sezione di uscita:

$$\sigma' = \frac{F'}{S_1} = \frac{f p}{\tan \alpha} \left(\frac{S_0}{S_1} - 1 \right)$$

come detto il valore di p può essere assunto come il valor medio della sollecitazione radiale:

$$p = \bar{\sigma}_r = 2K - \bar{\sigma}_L$$

ma $\bar{\sigma}_L$ può essere considerato come metà della sollecitazione massima di trazione σ_1 (che c'è in sezione di uscita).

$$\bar{\sigma}_L = \frac{1}{2} \sigma_1 = \frac{1}{2} \sigma_m \ln \frac{S_0}{S_1} = K \ln \frac{S_0}{S_1}$$

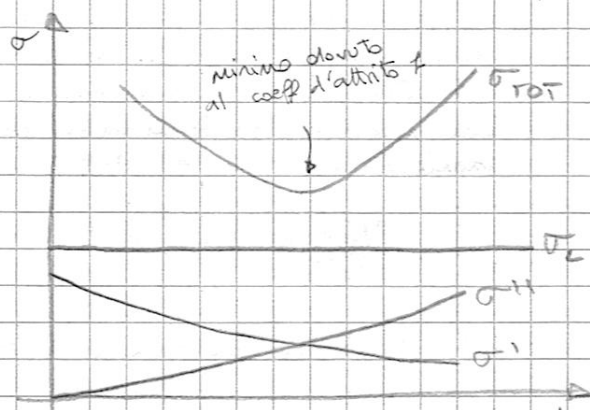
$$\Rightarrow \sigma' = \frac{2Kf}{\tan \alpha} \left(\frac{S_0}{S_1} - 1 \right) \left(1 - \frac{1}{2} \ln \frac{S_0}{S_1} \right)$$

coerente con il concetto che maggiore è α e minore è la larghezza della trafila (a parità di S_0/S_1) e minore saranno le sollecitazioni per attrito. E' da notare che oltre alle sollecitazioni viste fin'ora sono da tenere in conto le deformazioni lontane dalla semplice natura della def. parallelepipedica.

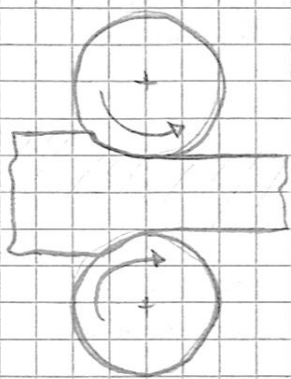
$$T_L = S_1 (\bar{\sigma}_L + \sigma' + \sigma'')$$

σ'' rappresenta la divergenza del fenomeno reale da quello ideale di deformaz. parallelep. L'esperienza indica che questo valore aumenta con l'aumento di α anche se nel contempo diminuisce quello di attrito.

2 valori usuali di α sono compresi fra 3° e 12° .



LA LAMINAZIONE



Lavorazione utile per eliminare le soffiature di fonderia, migliorare le proprietà meccaniche e ridurre le dimensioni dei lingotti, costringendoli tra due rulli (detti cilindri). Questi rulli possono avere separate sezioni; spesso sono il negativo della sezione di uscita richiesta al lingotto.

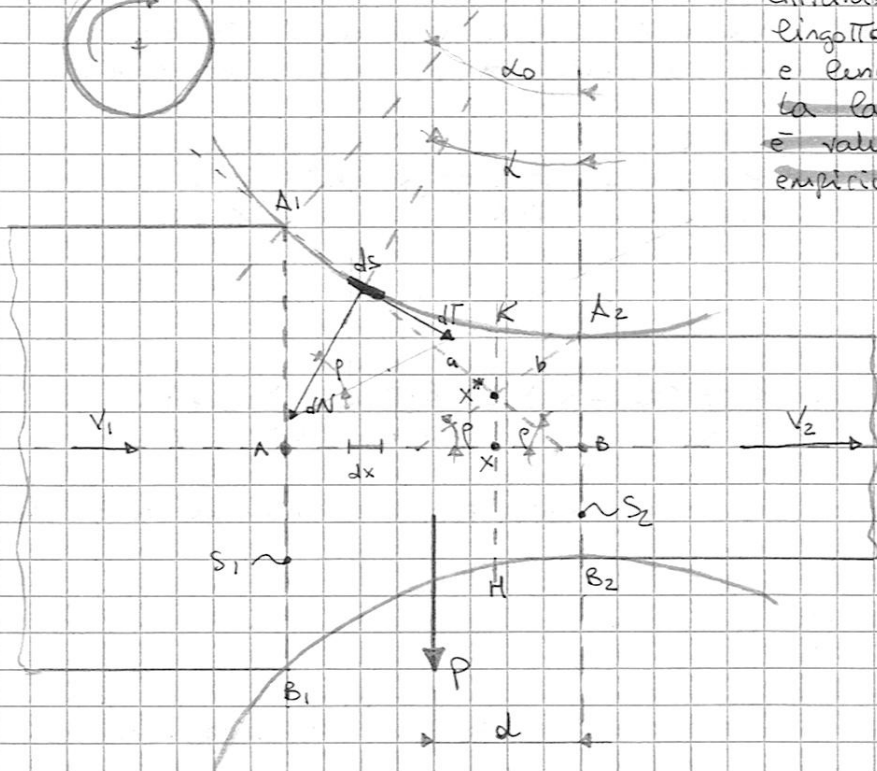
La conseguenza di forma vede modif. entrambe le tre dimensioni. Il lingotto vede aumentare larghezza e lunghezza, e ridurre l'altezza. La larghezza che assume il lingotto è valutabile con le seguenti formule empiriche:

$$\Delta b = 0,35 (h_2 - h_1) \quad (\text{GEUZE})$$

$$\Delta b = C \cdot L \cdot \frac{(h_2 - h_1)}{h_1} \quad (\text{SIEBEL})$$

dove C è una costante di proporzionalità ed L è l'arco di contatto $A_1 A_2$ tra lingotto e cilindro. Ovviamente il lingotto deve avere spazio per un libero allargamento. L è valutabile come:

$$L = \sqrt{R \cdot \Delta h}$$



La tendenza del materiale del lingotto a fluire nella direzione delle minori dimensioni è il motivo per il quale aumentando il raggio dei rulli (aumenta l'arco di contatto) aumenta l'allargamento. Esso è inoltre legato al coeff di attrito cilindro-lingotto e quindi aumenta anche all'aumentare della temp di lavorazione.

Valutiamo le forze in gioco nella laminazione:

È in ogni sezione conservata la costanza del flusso volumico, cioè:

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 \quad \text{ma} \quad S_2 < S_1 \Rightarrow V_2 > V_1$$

La velocità dei cilindri invece, è costante e quella tangenziale è

$$V_0 = \omega r \quad \text{con } r = \text{raggio dei rulli}$$

Si può affermare che le traiettorie delle singole masse elementari siano orizzontali dato che $\Delta h \ll r$. Dato che $V_2 > V_1$, la velocità di queste deve variare da V_1 a V_2 con continuità, assumendo tra gli altri, la velocità V_0 in una sezione intermedia HK . L'accelerazione (adimensionale) che subisce il laminato da questa sezione all'uscita è detta acc. della laminazione ed è data da:

$$\frac{V_2 - V_0}{V_0} \cdot 100 = a = \frac{S_0 - S_2}{S_2} \quad \text{sempre con} \quad V_0 S_0 = V_2 S_2$$

Per trovarla dobbiamo identificare la sezione intermedia S_0 .

Partiamo col notare che il materiale laminato, non è sollecitato da alcun'altra forza est che quella esercitata dai cilindri. Dove quindi eserci una risultante assiale, il quale impulso deve eguagliare la quantità di moto che è aumentata passando da V_1 a V_2 .

$$F = m \Delta V$$

$$F dt = m(V_2 - V_1)$$

$$F dt = \frac{\gamma}{g} V_2 S_2 dt \cdot V_2 - \frac{\gamma}{g} V_1 S_1 dt \cdot V_1 = \frac{\gamma}{g} V_1 S_1 (V_2 - V_1) dt$$

con γ/g peso specifico del materiale in lavorazione. Come è dimostrabile con delle analisi veloci (valori generici caratteristiche metalli) si dimostra che questa componente orizzontale è trascurabile rispetto alla forza verticale (+) che i cilindri effettuano sul laminato. Questa T è legata ad R (resist a deformat), b (larghezza laminato), L (lunghezza arco contatto). Si può addirittura considerare $F=0$.

Essendo questa T l'unica "in gioco", ed essendo nel campo plastico, consideriamo questa σ (stessa unità di misura di R) uguale a $2K$. Ipotizziamo anche che questa sollecitazione sia costante lungo tutto l'arco di contatto A_1A_2 (ipotesi adottata ma molto semplificativa). Ipotizzando inoltre che non varia la larghezza (b) del laminato, il cilindro sulla sezione ds esercita una forza normale ed una tangenziale. La forza tangenziale all'archetto ds , dovuta all'attrito, sarà diretta nello stesso verso del moto di avanzamento del laminato, nell'arco A_1K e contrario nell'arco KA_2 . Il moto relativo tra cilindro e laminato in K ha un'inversione ed i due cominciano a svincolare l'uno dall'altro in direzioni relative opposte.

$$dN = b_1 ds R$$

$$dT = f dN = f b_1 R ds = \tan p \ b_1 R ds$$

con f coeff di attrito e quindi p angolo di attrito. Proiettando tutto sull'asse del laminato, dove dobbiamo sommare le aliquote:

$$dx = ds \cos \alpha$$

$$dF_1 = -dN \sin \alpha + dT \cos \alpha$$

$$dF_2 = -dN \sin \alpha - dT \cos \alpha$$

dF_1 è la proiezione composta di dN e dT , nell'arco prima della sezione di inversione. Come detto è $F=0$.

$$\int_{A_1}^K dF_1 + \int_K^{A_2} dF_2 = 0$$

facendo le dovute sostituzioni...

$$\int_A^x (-\tan \alpha + \tan p) dx = \int_x^B (\tan \alpha + \tan p) dx$$

e la x che soddisfa l'uguaglianza è quella relativa alla sezione di inversione. Con delle opportune considerazioni geometriche, si vede che l'incontro fra le rette a e b , corrisponde ad un punto della sezione di inversione. Queste rette sono inclinate di p dall'asse AB e passano rispettivamente per A_1 ed A_2 . Il triangolo A_1KA_2 rappresenta la forza orizzontale esercitata dai cilindri sul laminato. Il tratto KX^* è proporzionale, ad esempio, alla forza orizzontale che va da sx a dx , agente sul tratto AX del laminato. Si nota infatti che prima del contatto con i cilindri e dopo

la lavorazione, la forza F è nulla. Da queste considerazioni si nota anche che non appena il laminato tocca i cilindri, risente di una forza orizzontale proporzionale al tratto tra il circolo e la retta d . Questa forza è positiva sin dal primo tratto e $d < p$. Questa è la condizione di trascinamento spontaneo. Se $d > p$ e fino al valore z_p , il laminato risente di una forza negativa che lo spinge fuori dai cilindri e questa forza dovrà essere vinta da una forza ext. Se $d > z_p$ per tutta la durata di laminazione il laminato risente di una forza di repulsione. Considero il coefficiente di attrito:

$$F = \mu p \quad d < \mu^{-1} p$$

Per la determinazione di μ , ecco le formule empiriche di Ekelund:

$$\mu = 1,05 - 0,000625 T \quad \text{cilindri in ghisa grigia}$$

$$\mu = 0,841 - 0,0005 T \quad \text{cilindri in acciaio o ghisa bianca}$$

$T [^{\circ}C]$

μ decresce all'aumentare di T però è a caldo più ampio che a freddo. L'ipotesi fatta fin'ora di una sollecitazione orizzontale trascurabile ed una pressione costante lungo l'arco è accettabile solo se d è di molto più grande ~~di~~ piccolo di h_1 . Allontanandosi da questa condizione l'idealità che $\sigma_2 < 0$, non è valida e neanche che $\sigma_1 = 2K$. Sarà valida l'ipotesi di Quest con

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = Z_{max} = K$$

Ci sono vari metodi, empirici e non per valutare la distribuzione della pressione sull'arco di contatto (che avrà comunque un picco di valore dove μ è massimo e cioè nella sez. di inversione). Nota questa distribuzione, possiamo indicare con P la risultante verticale di questa distribuzione, che risulterà spostata di d , dall'asse dei cilindri (vedi disegno). Il momento torcente da vincere sarà:

$$M = P \cdot d$$

e quindi la potenza:

$$W = 2 M \omega = 2 P d \omega = 2 P d \frac{V_0}{r}$$

sostituendo a V_0 , il valore ottenuto dall'acceleraz. di laminazione.

$$a = 100 \frac{V_2 - V_0}{V_0} \Rightarrow V_0 a = 100 (V_2 - V_0) \Rightarrow V_0 = \frac{100 V_2}{100 + a}$$

$$W = \frac{2 P d}{r} \frac{100 V_2}{100 + a}$$

$$L = W t = \frac{2 P d}{r} \frac{100 V_2}{100 + a} t$$

L ovviamente è il lavoro. Possiamo scrivere $V_2 \cdot t = L_2$ se t è la durata intera della laminazione.

$$W t = L = \frac{2 P d}{r} \frac{100}{100 + a} L_2$$

$$P = b_m \sigma_m \sqrt{r \cdot \Delta h} = b_m \sigma_m L$$

con la radice uguale all'arco L , σ_m è la pressione specifica media e b_m la larghezza del laminato, anch'esso considerato medio. L invece può essere preso come circa $0,5 L_2$.

$$L = \frac{2 b_m \sigma_m L}{r} \frac{0,5 L_2}{100 + a} = b_m \sigma_m \Delta h \frac{100}{100 + a} L_2$$

inoltre se a non è grande, anche questa ipotesi legata al $\Delta h \ll h_2$...

$$L = b_m \sigma_m \Delta h L_2 = \frac{h_2}{h_2} b_m \sigma_m \Delta h L_2 = \boxed{V_{finale} \sigma_m \frac{\Delta h}{h_2}}$$

ricordiamo che è adottabile se $\Delta h \ll h_2$. Di seguito qualche metodo di lavorazione e qualche esempio di laminatura.

Spesso sono necessarie forti riduzioni di sezione nelle laminazioni, ma come visto non si può richiedere diminuzioni superiori al circa 15% nelle alterne dei laminati. È necessario quindi fare più passate e lo schema più semplice è quello del laminatoio duo reversibile. I due cilindri si avvicinano e ruotano in entrambe le direzioni. La pecca è l'assorbimento di energia di spunto e soprattutto l'utilizzo a rendimenti bassi del motore elettrico nelle passate secondarie. Si può avviare con un volano ma il duo con volano non può essere reversibile. Si deve riportare il lingotto sempre dallo stesso lato o adottare il Trio. Nel Trio i cilindri ruotano sempre nella stessa direzione (possibilità di usare il volano) ma ci sono due possibilità di lavorazione. La maggior parte dei laminatoi usa comunque un volano grazie al metodo Nord-Leonard e Zilmer. Non ci sono inversioni di moto delle masse rotanti ma solo delle

correnti verso il motore della gabbia laminatrice. Spesso si usano diametri di rulli diversi e guide di uscite al laminato per obbligarlo a scorrere rettilineo e non avvolgersi su se stesso.

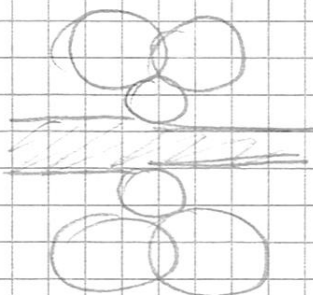
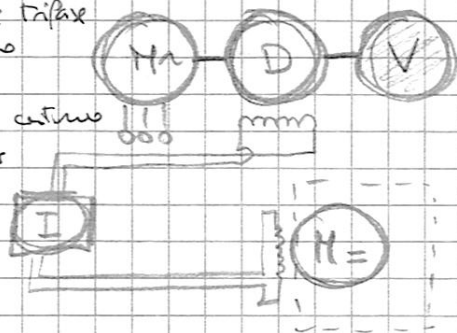
M = motore trifase

D = dinamo

V = Volano

M = motore continuo

I = inverter



Il laminatoio continuo è per le elevate velocità di lavorazione (100 km/h per il laminato) e la velocità di ingresso del laminato nella successiva gabbia di laminazione deve essere più alta per evitare avvolgimenti. Nel laminatoio aperto, l'ingresso alla gabbia succ è inferiore per assicurare la curvatura e non essere di intalciamento (il laminato). Per produrre laminati sottili, ci vuole elevata rigidità di sistema e piccole superfici di contatto. Si usano raggi piccoli di cilindri ma più cilindri di supporto (fino a 12 nella stessa gabbia di laminazione). Ci vogliono cilindri piccoli per ridurre la forza agente su di essi ~~forza portante~~.

Lamnezman → angolati di $6^\circ \div 12^\circ$. moto complesso con il lingotto elicoidale. Si forza da solo ma cmq c'è l'aiuto di un mandrino. Per ridurre spessore si usa passo di pellegrino.

TORNITURA

Forza di taglio

$$F_t = K_s(a * p)^{1-\frac{1}{n}}$$

Velocità di avanzam

$$u = a * n(\text{numero giri})$$

Rugosità aritmetica

$$Ra = \frac{a^2 * 1000}{(32 * r)}$$

Taylor

$$v_t T^n a^n P^r = V_1$$

$$v_t T^n = \left(\frac{V_1}{a^n P^r} \right) = V_1$$

V max economia

$$V_e = \left(\frac{\lambda'}{\lambda} \right)^n \frac{V_1}{\left[\left(t_{cu} + \frac{c_u}{c_0} \right) \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]^n}$$

$$\lambda = \left(\frac{\pi * D * L}{a} \right)$$

$$\lambda' = \left(\frac{\pi * D * (L + ex)}{a} \right)$$

V max produtt

$$V_p = \left(\frac{\lambda'}{\lambda} \right)^n \frac{V_1}{\left[t_{cu} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]^n}$$

t_{cu} = tempo cambio utensile

c_u = costo tagliente

$$\text{Inserto: } c_u = \frac{c_{au}}{n_t} + \frac{c_{ap}}{n_{tp}}$$

$$\text{HSS: } c_u = \frac{c_{au} + r c_r - c_{uu}}{(1+r)}$$

r = n. riaffi.

c_r = cost riaff

c_{uu} = valore utensile

$$c_0 = c_{amn} + c_{man} + c_{sg} \text{ [euro/min]}$$

$$P_n < P_M * \eta$$

tempo di lavoro

$$t_l = \frac{L}{u} = \frac{L}{(a * n)}$$

Tempo durata utensile

$$T = \left(\frac{V_1}{V_t} \right)^{\frac{1}{n}}$$

N di pezzi per tagliente

$$N_u = \frac{T}{t_l}$$

N di utensili per pezzo

$$N = \frac{t_l}{T * nt}$$

Tempo unitario

$$t_1 = t_p + t_l + \frac{t_{cu}}{N_u}$$

Costo unitario

$$c_1 = c_g + c_0 t_1 + \frac{c_u}{N_u}$$

MAGLIA SEMPLICE EFFETTO

-Lavoro di fucinatura richiesto

$$L_u = L_d = \frac{(P_f \cdot A \cdot s)}{1000}$$

P_f inserito in tabella (materiale,T)

-Lavoro fornito ad ogni colpo

$$L_f = P_c \cdot h$$

-Lavoro assorbito dall'incudine

$$L_i = \frac{(P_c^2 \cdot h)}{P_i}$$

-Lavoro disponibile

$$L_d = P_c \cdot h \cdot \left(1 - \frac{P_c}{P_i}\right)$$

-Spostamento nominale dell'incudine

$$S_i = \frac{L_i}{P_i}$$

-Forza al termine della deformazione

$$F_{max} = \frac{L_d}{S_i}$$

-Forza di deformazione

$$F = \frac{L_d}{s}$$

PRESSA IDRAULICA

Avendo la pressione di esercizio P_e
materiale,A,s,T

$$P_f \cdot A = \frac{(\pi \cdot d^2 \cdot P_e)}{4}$$

MAGLIA DOPPIO EFFETTO

-Lavoro di fucinatura richiesto

$$L_u = L_d = \frac{(P_f \cdot A \cdot s)}{1000}$$

-Lavoro fornito ad ogni colpo

$$L_f = (P_c + F) \cdot \eta \cdot h$$

$$h < 1 \quad \eta = 0.9$$

$$1 < h < 2 \quad \eta = 0.85$$

$$h > 2 \quad \eta = 0.8$$

-Lavoro disponibile

$$L_d = (P_c + F) \cdot \left(1 - \frac{P_c}{P_i}\right) \cdot \eta \cdot h$$

-Lavoro assorbito dall'incudine

$$L_i = (P_c + F) \cdot \frac{(\eta \cdot P_c \cdot h)}{P_i}$$

-Calcola la pressione dell'aria sullo stantuffo

$L_u = L_d$ ricavo F

$$P(\text{pressione}) = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}$$

d=diametro stantuffo

FRESATURA

-Fresatura Periferica

$$F_t = K_s * (a_z * 2 * \sqrt{\frac{P}{d}} * l)$$

-Fresatura Frontale

$$F_t = K_s * z_i * (a_z * p)^{1-\frac{1}{n}}$$

zi=denti i presa

az=avanzamento per dente

Caso *L>D* lunghezza pezzo maggiore D fresa

$$... I < \frac{L}{3}$$

$$... L = \frac{D}{2} + I$$

$$... L = \frac{(3+L)}{4}$$

$$... I = \frac{D}{4}$$

Calcolare zi

$$\frac{D}{2} * \sin(\alpha) = I$$

ricavo (α)

angolo di taglio ($\alpha+90$)= (θ)

$$\frac{360^\circ}{z} = \frac{\theta}{z_i} \quad z_i = \dots$$

FORATURA

--Prima foratura

$$F_t = K_s * \left(\frac{D}{2 * \sin \delta} \right) * (a_z * \sin \delta)^{(1-z)}$$

$$z = \frac{1}{n} \approx (0.197)$$

$$\delta = \frac{\eta}{2}$$

$$Z=2$$

$$u = a_z * Z * n$$

-Momento torcente

$$Mt = Ft * \frac{D}{2}$$

$$Pn = Ft * vt$$

--Allargatura

$$F_t = K_s * \left(\frac{P}{\sin \delta} \right) * (a_z * \sin \delta)^{(1-z)}$$

$$P = \frac{(D_i - D_f)}{2}$$

$$Mt = Ft * \frac{(D_i - D_f)}{2}$$

$$Pn = Mt * \omega$$

$$\omega = \frac{2 * \pi * n}{60}$$

INIZIO APPUNTI PROFESSORE

FONTE: ROX.IT

RIORGANIZZATO DA : DI PALMA FELICE

AUTORE : PROF. DEL CORSO DI TECNOLOGIA MECC. UNISA

1. Lavorazioni per asportazione di truciolo

Si definiscono lavorazioni per asportazione di truciolo quelle lavorazioni in cui si porta il pezzo ad assumere la forma e la dimensione voluta mediante l'asportazione di piccole quantità di materiali, dette trucioli, da parte di un utensile tagliente.

Le diverse lavorazioni si differiscono per la qualità dell'utensile utilizzato, per la macchina sul quale tale utensile viene montato, e per il moto di taglio generato dalla macchina stessa; le lavorazioni che utilizzano un moto di taglio rotatorio sono:

Tornitura, viene utilizzato un utensile monotagliente montato sul tornio;

Fresatura, viene utilizzato un utensile pluritagliante (detto FRESA) montato sulla FRESATRICE;

Foratura, viene utilizzato un utensile pluritagliante montato sul trapano (o trapanatrice);

le lavorazioni che invece utilizzano un moto di taglio rettilineo sono:

Limatura, viene utilizzato un utensile monotagliente;

Piallatura, viene utilizzato un utensile monotagliente;

Stozzatura, viene utilizzato un utensile monotagliente;

Rettificazione o Rettifica, viene utilizzato un utensile pluritagliante, detto MOLA.

1.1 Utensili

1.1.1 Materiali costituenti: il materiale da cui si ottiene l'utensile deve avere una durezza (resistenza all'usura) maggiore del materiale da lavorare;

Acciaio Ipereutettoidico: questo acciaio è stato il primo ad essere utilizzato per la creazione di utensili da taglio; gli acciai ipereutettoidici sono caratterizzati da una quantità di Carbonio superiore allo 0.8%, mentre quelli maggiormente utilizzati per gli utensili da taglio hanno una percentuale di Carbonio compresa tra l'1 e l'1.2, poiché tali acciai sono caratterizzati da una buona tenacità e buona durezza. Tale materiale è spesso accantonato poiché l'acciaio ipereutettoidico possiede una durezza a caldo non molto elevata (dopo i 200°C la durezza del materiale diminuisce sensibilmente), conseguentemente un utensile costituito con tale materiale non può lavorare a temperature elevate; per evitare di surriscaldare

troppo l'utensile, si è così costretti a diminuire la velocità di lavorazione, il che comporta ovviamente una minore redditività.

Acciai legati: questi acciai sono caratterizzati dalla presenza di altri alliganti oltre al Carbonio, come il Tungsteno, il Molibdeno, il Cromo, il Vanadio e il Tantalio. La presenza di questi elementi conferisce all'acciaio una maggiore durezza a caldo, una migliore tenacità, ed aumenta le proprietà autolubrificanti; la principale capacità degli alliganti è la quella di ridurre il grado di accrescimento dei grani del materiale, il che migliora le caratteristiche meccaniche, in particolar modo la tenacità. Il Molibdeno è in grado di diminuire il coefficiente di attrito dell'utensile, aumentando così l'autolubrificazione dell'utensile stesso. Il Tungsteno è invece in grado di abbassare la velocità critica di Tempra, tali acciai possono raggiungere anche i 600°C durante la lavorazione. Altra caratteristica degli alliganti è quella di creare dei carburi, ovviamente con il Carbonio, che aumentano la durezza a caldo del materiale. Gli acciai legati si dividono in:

- **Acciai Bassolegati**, con presenza di alliganti inferiore al 5%; vengono indicati con il simbolo HS, High Speed.
- **Acciai Altolegati**, con presenza di alliganti superiore al 5% ma comunque sempre inferiore al 18%, questi acciai sono caratterizzati anche da una maggiore percentuale di Tungsteno; questi acciai vengono indicati con il simbolo HSS, High Speed Steel.

Ossidi, Carburi e Diamante : gli utensili costituiti da ossidi e carburi possono lavorare anche a temperatura intorno ai 1000°C, mentre gli utensili in diamante sono quelli utilizzati per velocità di lavorazione massima. Gli utensili costituiti da questi 3 materiali hanno una minore tenacità (capacità di sopportare gli sforzi senza rompersi), hanno quindi un comportamento simile al vetro. Solitamente gli utensili costituiti da questi materiali sono costituiti da un supporto in acciaio al quale viene aggiunto un inserto propriamente costituito da ossidi, carburi o diamante.

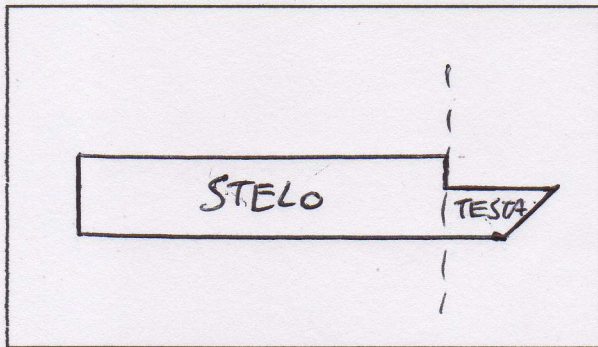
Sinterizzazione delle polveri

La sinterizzazione è un trattamento termico di un compatto di polveri al di sotto del punto di fusione del componente principale. Grazie a tale processo riusciamo ad ottenere un elemento con una geometria definita con caratteristiche meccaniche elevate.

Tale processo consiste nel mescolare, per esempio, polveri di Tungsteno con un 20% di polveri di Cobalto; questo miscuglio viene poi versato in uno stampo e compresso notevolmente in modo tale che la superficie esterna dei grani di Cobalto fonda generando microbrasature con i grani di Tungsteno. Il risultato dopo la compressione, denominato

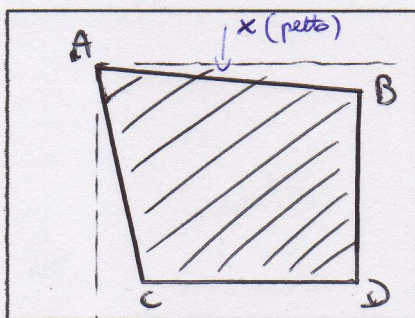
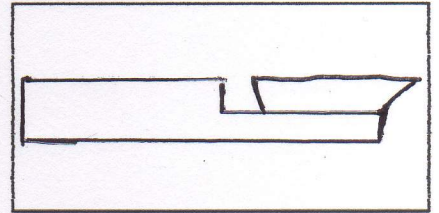
"verde", viene tolto dallo stampo e inserito nel forno, dove il Cobalto si fonde completamente e si distribuisce uniformemente nel Tungsteno. L'elemento così ottenuto, nel caso degli inserti da taglio, è necessario solo che esso sia affilato.

TORNITURA



Un utensile è formato da uno **stelo** e da una **testa**. Studiare la geometria di un utensile significa studiarne la testa. Lo stelo permette di fissare l'utensile sulla macchina operatrice; la testa possiede il/i tagliente/i necessari per eseguire l'asportazione di truciolo. Per gli acciai

HSS la testa viene ottenuta sagomando una bacchetta a sezione costante, mentre per il carburo di Tungsteno, lo stelo è diverso dal solito: è infatti presente una sede dove verrà poi poggiata la testa. (a destra)

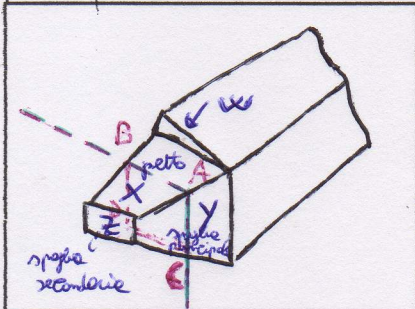


- AB= **Petto dell'Utensile**, piano sul quale scorre il truciolo; (in basso X)

- AC= **Faccia di Spoglia Principale** (in basso Y)

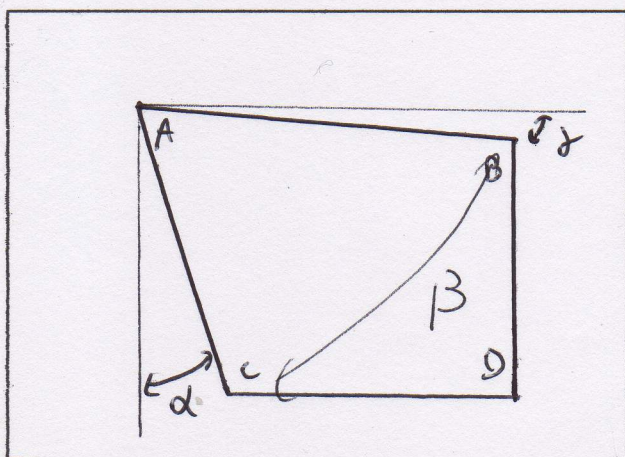
- A (intersezione tra AB e AC)= **Tagliente Principale**, genera il truciolo; (in basso è l'intersezione tra X e Y)

- Z= **Faccia di Spoglia Secondaria**:



- Intersezione tra X e Z= **Tagliente Secondario**, ha il compito di rifinire la superficie lavorata dal tagliente principale, viene utilizzato solo nel caso in cui il materiale da lavorare abbia un elevato ritorno elastico;

- W= Rompitruciolo



1.1.2 Angoli Principali di Taglio

α = Angolo di Spoglia Principale

β = Angolo di Taglio

γ =Angolo di Spoglia Superiore

Relazione fondamentale:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

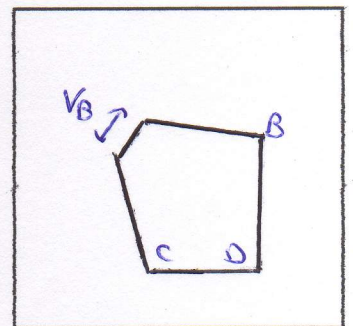
1.1.3 Grado di usura dell'utensile

La lavorazione comporta un certa usura dell'utensile da taglio, il quale si usura ovviamente in prossimità del tagliente principale; una volta raggiunto un determinato grado di usura è possibile riaffilare l'utensile, riportandolo alla geometria iniziale (in particolar modo per gli acciai HSS e HS) oppure sostituire il tagliente principale. Nel caso in cui si riaffili l'utensile è importante lavorare il pezzo solo fino a quando non si raggiunga una lunghezza minima.

Il controllo del grado dell'usura dell'utensile si fa spesso statisticamente. In alcuni casi però lo si fa anche scientificamente; vi sono 2 criteri: il criterio del "labbro di usura" e il criterio del "cratere di usura".

Criterio del labbro di usura

Col passare del tempo, il tagliente principale di un utensile arretra la sua posizione, in figura è rappresentato dal segmento V_b , segmento che aumenta la sua dimensione col passare delle lavorazioni. L'utensile ha raggiunto il grado massimo di usura quando il labbro V_b ha raggiunto una determinata lunghezza; vi sono 2 soglie: una soglia per le lavorazioni industriali, e una per l'ambito scientifico o di ricerca.



Lavorazioni industriali $V_b \geq 1\text{mm}$

Ambito scientifico $V_b \geq 0,1\text{mm}$

Criterio del cratere di usura

Il cratere di usura è un foro generato dal passaggio del truciolo sul petto dell'utensile. Vi sono 2 parametri che definiscono il cratere di usura di un utensile:

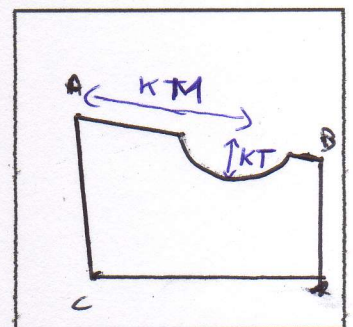
KT = profondità del cratere

KM = distanza tra l'asse del cratere ed il tagliente principale

Affinché un utensile sia ancora utilizzabile il rapporto tra KT e KM deve essere inferiore a 0,4

$$KT/KM < 0,4$$

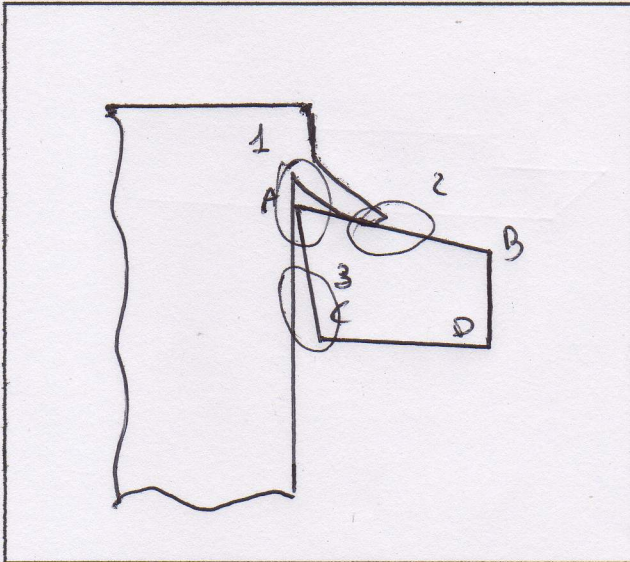
Questo criterio è più affidabile del criterio del labbro di usura poiché KM tiene conto anche del labbro di usura.



Taglio Ortogonale

Il taglio ortogonale avviene quando l'utensile è fermo e il pezzo si muove di moto rettilineo uniforme. Il taglio avviene per effetto delle sollecitazioni di taglio τ così elevate da dar luogo allo strappo del materiale dalla superficie di partenza; non vi è quindi distacco atomico dovuto al lavoro dell'utensile sul pezzo.

1.1.4 Funzione del Rompitruciolo e zone di deformazione



I motivi per cui il truciolo viene spezzato sono molteplici: per una questione di sicurezza, per evitare che il truciolo intralci la lavorazione entrando a contatto col pezzo e con l'utensile, per frenare l'aumento di temperatura.

Si possono definire 3 zone di deformazione: Primaria, Secondaria, Terziaria:

Zona di deformazione primaria: zona tra il tagliente ed il pezzo da lavorare, è una zona con elevata deformazione plastica dove avviene il distacco del truciolo dal pezzo, e un aumento di

temperatura per il sistema pezzo-utensile; in questa zona abbiamo una temperatura T_1 .

Zona di deformazione secondaria: zona di contatto tra truciolo e petto dell'utensile, in questa zona aumenta il calore dovuto all'attrito tra truciolo e petto, oltre al calore derivante dal truciolo stesso; in questa zona abbiamo una temperatura T_2 molto inferiore a T_1 .

Zona di deformazione terziaria: eventuale zona di contatto tra la faccia di spoglia principale e la superficie del pezzo già lavorata che ha un ritorno elastico; in questa zona abbiamo una temperatura T_3 inferiore a T_2

$$T_1 \gg T_2 > T_3$$

Durante la lavorazione l'utensile raggiunge temperature maggiori rispetto al pezzo in lavorazione poiché la parte che si riscalda del pezzo è il truciolo, il quale ovviamente si distacca dal pezzo stesso, entrando poi a contatto con l'utensile; per evitare eccessivi aumenti di temperatura, vi è la presenza del rompitruciolo che spezzando il truciolo impedisce che esso stia a contatto con l'utensile a lungo.

Taglio Obliquo

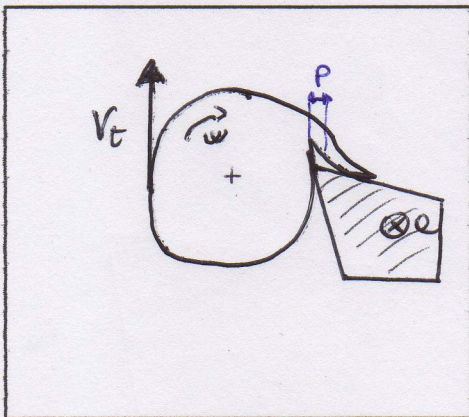
Il moto non è uniforme, ma combinazione di due movimenti (uno del pezzo e uno dell'utensile). Si usa nella tornitura, fresatura e foratura.

Moti del taglio obliquo

Nel tornio per esempio c'è il moto di rotazione del pezzo in lavorazione ed un moto traslatorio (rettilineo uniforme) dell'utensile. La risultante di questi due movimenti è un moto elicoidale.

Parametri del taglio obliquo

Sono i parametri da fissare nel caso di taglio obliquo affinché la lavorazione sia possibile.



P: profondità di passaggio, di taglio, di passata (lavorazione sul pezzo per tutta la sua lunghezza). E' l'interferenza tra tagliente e pezzo. Si misura in **mm**.

V_t : velocità periferica del pezzo in rotazione. Non è costante ma diminuisce al diminuire del diametro man mano che la lavorazione continua. $V_t = \pi D n / 1000$, dove D è il diametro del pezzo iniziale [mm] ed n è il numero di giri del pezzo al minuto. V_t si esprime in **m/min**.

a : avanzamento dell'utensile. Nel disegno è ortogonale al foglio, parallelo all'asse di rotazione del pezzo. Indica di quanti mm si sposta l'utensile per ogni giro che compie il pezzo. [**mm/giro**]

u : velocità di avanzamento dell'utensile. $u = a n$ [**mm/min**].

Dimensionamento angoli di taglio

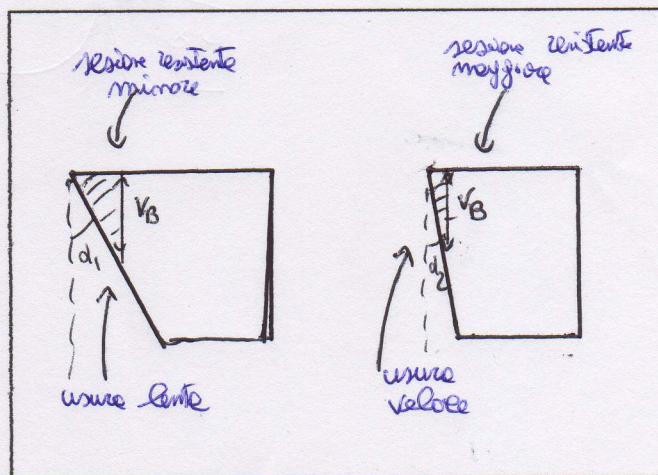
$$2^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ - 14^\circ$$

$$\alpha \geq 2^\circ$$

- A causa del ritorno elastico non è possibile utilizzare un α nullo. La superficie del pezzo potrebbe infatti interferire con la faccia di spoglia principale, strisciare dando qualità scadente e facendo crescere la temperatura di taglio.
- Il taglio è obliquo, quindi si ha una serie di solchi che possono interferire con la faccia di spoglia principale. La superficie di lavorazione è inclinata rispetto all'asse di rotazione del pezzo.
- In ogni caso il ritorno elastico del materiale viene controllato con un angolo di 1° , ed anche la superficie di lavorazione inclinata non può avere angolo maggiore di 1° . La somma delle due interferenze fa in modo che α debba essere per forza maggiore di 2° .

$$\alpha \leq 14^\circ$$

- L'angolo α diminuisce la sezione resistente. La sezione resistente è una superficie che ci dà idea di quanto l'elemento possa resistere sotto l'azione di sforzi esterni. A parità di forza applicata, α cresce con le proprietà meccaniche dell'utensile. Ma anche la scelta del materiale da tagliare influenza α , perché a parità di α , F è tanto maggiore quanto più è resistente il pezzo da tagliare.

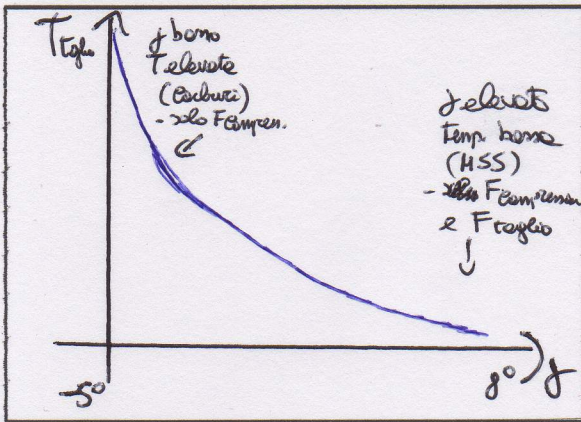


- L'angolo α va scelto anche in base all'usura: consideriamo due utensili della stessa altezza ma con un α diverso. Quando viene raggiunto il massimo grado di usura e quindi una dimensione massima per V_B , il volume asportato dall'utensile risulta essere molto maggiore per un angolo α elevato. Quindi al crescere di α ed a parità di materiale, l'utensile si usura più lentamente.

La scelta dell'angolo α quindi deve tenere conto sia della sezione resistente, sia della sua usura. Sono quindi scelte tra loro contraddittorie.

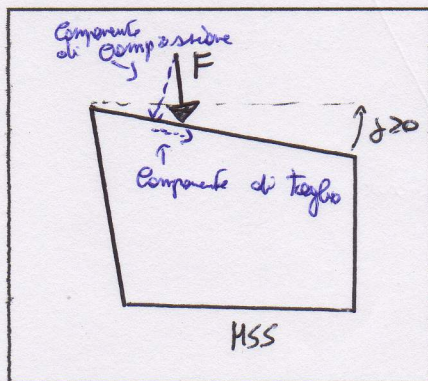
$$-5^\circ \leq \gamma \leq 7^\circ - 8^\circ$$

- Ancora una volta la scelta dell'angolo γ influisce sulla sezione resistente: a parità di α ed al crescere di γ si riduce la sezione resistente (infatti con γ elevati conviene lavorare su pezzi molto malleabili).
- γ influisce però sulla temperatura di taglio: al diminuire di γ aumenta la temperatura di taglio e la durezza dell'utensile diminuisce.

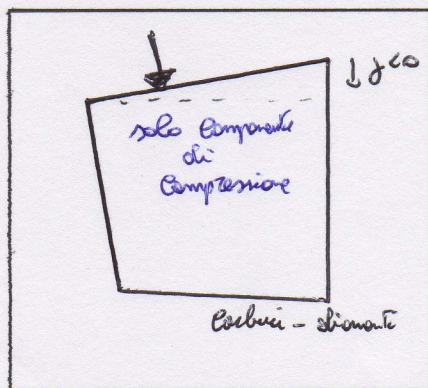


Anche qui quindi bisogna tenere conto del materiale da lavorare e del materiale dell'utensile: gli acciai HSS poco resistono a temperature elevate (per cui γ è alto); i carburi e i diamanti resistono bene alle temperature (per cui γ è basso).

- Ci sono inoltre materiali che resistono bene alla forza di taglio, mentre altri materiali sono meno tenaci. I carburi e i diamanti per esempio riescono a tenere bene la forza di compressione, mentre sono molto più fragili sottoposti ad una forza di taglio. Per fare in modo che le forze sull'utensile siano solo di compressione e non di taglio è bene adottare un angolo γ negativo:



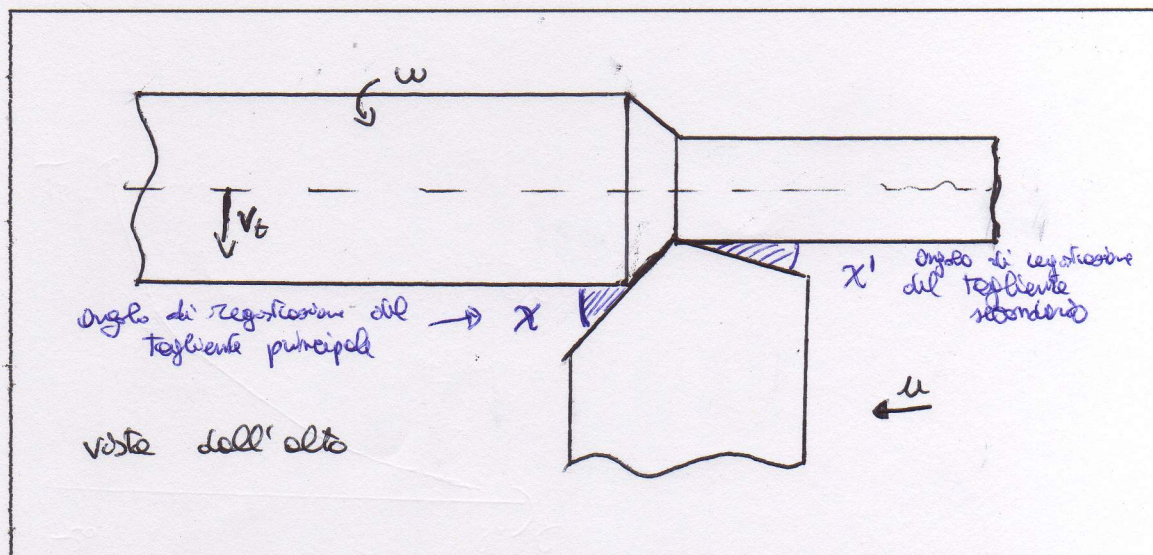
Con $\gamma > 0$ la forza applicata ha due componenti: una (ortogonale) è la forza di compressione, l'altra (tangente) è la forza di taglio. Non è una configurazione adatta per gli utensili in carburi o diamante (provoca l'usura accidentale).



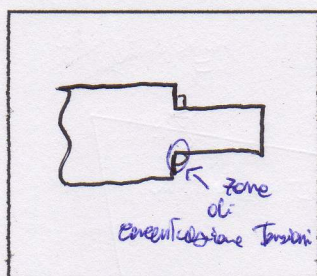
Con $\gamma < 0$ la forza applicata ha solo componente ortogonale e quindi è solo di compressione senza generare sforzi di taglio. E' adatta per carburi e diamanti.

- Non è una forza di flessione perché l'utensile è supportato dallo stelo che ha dimensioni maggiori.
- Con questo angolo $\gamma < 0$ la temperatura aumenta, ma con materiali refrattari (ossidi, diamante), ciò non pregiudica la loro durezza.

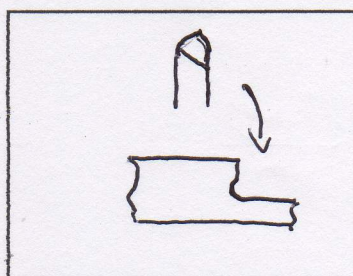
Angoli di registrazione del tagliente principale e del tagliente secondario



1. L'angolo di registrazione del tagliente principale definisce la geometria del pezzo finito: con angolo $x = 90^\circ$ si ha a fine lavorazione uno spigolo, assolutamente pericoloso perché in questa zona c'è un'elevata concentrazione di tensioni che porterebbe facilmente alla rottura del pezzo. Quindi x serve per evitare che il pezzo sia difettoso e quindi tende ad essere il più piccolo possibile.

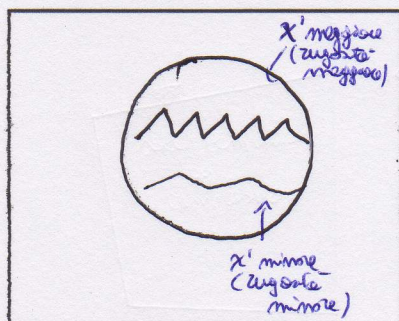


$x = 90^\circ$



Si può anche usare un utensile di forma per non avere spigoli e scaricare meglio le tensioni.

2. L'angolo di registrazione del tagliente secondario x' definisce la qualità superficiale del pezzo; controlla la rugosità della superficie lavorata.



Ingrandendo la superficie lavorata troviamo i solchi dell'utensile, che più sono alti, più la rugosità è elevata.

I solchi sono tanto più alti quanto è maggiore l'angolo x' .

L'angolo x' si può ridurre fino ad un massimo di $2^\circ-3^\circ$, non meno altrimenti l'utensile striscia sul pezzo.

Tipi di truciolo e raffreddamento dell'utensile

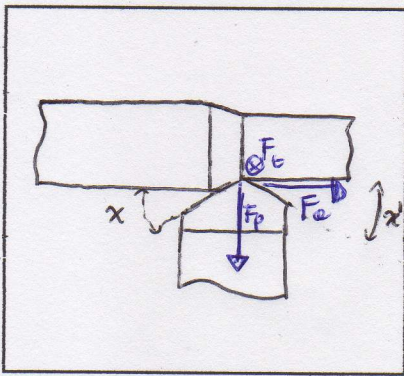
Continuo: non c'è interruzione di continuità tra pezzo ed utensile; il truciolo non viene rotto e ciò è pericoloso perché può avvolgere il pezzo ed inoltre aumenta la temperatura.

Segmentato: tende a rompersi in piccoli pezzi ma resta sempre attaccato ad un filo di materiale. E' meno pericoloso perché appena tenta di avvolgersi al materiale si frantuma ed inoltre la temperatura si abbassa notevolmente.

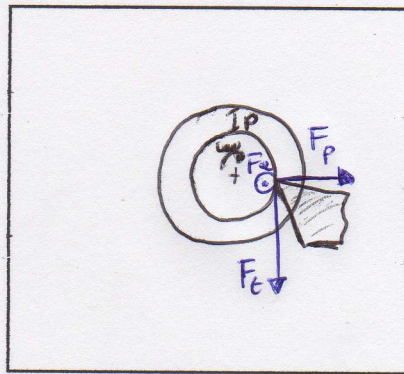
Frammentato: costituito da tanti elementi, separati dal rompi truciolo. Mantengono le temperature di taglio entro limiti accettabili.

- Per diminuire la temperatura di taglio non è sufficiente spezzare il truciolo, ma si può usare un **liquido lubrorefrigerante**, un liquido ottenuto miscelando acqua con oli (detti da taglio o emulsionanti): funge da lubrificante (grazie all'olio) e da refrigerante (facendo evaporare l'acqua). L'inconveniente di questi liquidi è che sono molto inquinanti e difficili da smaltire.

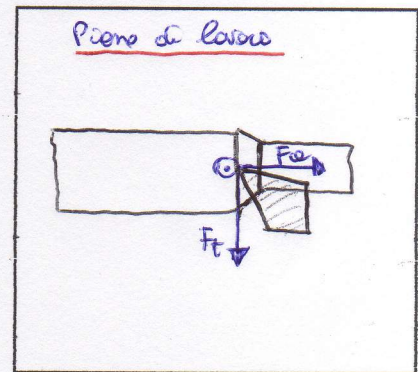
Forze che agiscono sull'utensile e calcolo della potenza al mandrino (lavorazione possibile)



dall'alto



da destra della precedente



frontale, da destra della prec.

Le principali forze a cui è soggetto l'utensile sono 3:

F_t , che si oppone al taglio

F_a , che si oppone all'avanzamento u

F_p , che si oppone alla penetrazione dell'utensile nel pezzo.

- Tutte le forze vengono solitamente **proiettate sul piano di lavoro** (ultima figura a destra), **passante per l'asse di rotazione del pezzo ed ortogonale all'asse dell'utensile**. Vediamo che sia F_t che F_a giacciono sul piano, mentre F_p è ortogonale ad esso, ha componente nulla e perciò può essere trascurata.

In base all'intensità delle forze vediamo se la lavorazione è possibile: esse dipendono dai parametri di taglio, scelti dall'ufficio tecnico. Inoltre, per rendere possibile la lavorazione bisogna fare riferimento a due tipi di potenze: P_M , potenza di targa del motore (scritta sul motore della macchina) e P_m , potenza al mandrino, quella che effettivamente si rileva durante la lavorazione. P_m si calcola così: $P_m = F_t V_t + F_a u + F_p v_p$

$F_p V_p$ risulta nulla per 2 motivi:

1. Poiché **ortogonale al piano di lavoro**, la proiezione di F_p su di esso risulta nulla.
2. V_p è la velocità impressa all'utensile per farlo avvicinare all'asse di rotazione del pezzo e così creare una certa interferenza pari alla profondità di passata. Questa velocità **si annulla prima di iniziare la lavorazione**, quindi nel calcolo della potenza deve essere necessariamente considerata nulla.

Considero la rimanente parte $F_t V_t + F_a u$: la $v_t = \pi D n / 1000$ si misura in m/min [mm/1000*min], mentre $u = a * n$ si misura in mm/min [mm*giri/giro*min], per cui **c'è un notevole divario tra i due contributi della formula**. Anche con $F_a > F_t$, **il secondo prodotto rimane trascurabile** ai fini della lavorazione (anche se non lo può essere ai fini della progettazione).

Rimane $P_m = F_t V_t$, con V_t uno dei 3 parametri di taglio stabiliti dall'ufficio tecnico. F_t può essere calcolato indirettamente tramite un sensore tra il motore ed il pezzo, ma ai fini della produttività ciò non conviene e quindi il valore di F_t è estrapolato grazie agli istituti di ricerca (Università).

$F_t = K_t (S)^{-1/n} \rightarrow \rightarrow n$ è un **parametro tabellato** in base al materiale da lavorare

S è la **sezione del truciolo**, calcolabile come $a * P$

K_t è la pressione di taglio, che viene calcolata come: $K_t = K_s S$, dove K_s è la pressione specifica di taglio, cioè la forza necessaria ad asportare truciolo che abbia sezione pari ad 1 mm^2 . K_s è legato sia al materiale da lavorare sia all'utensile; esso si calcola con le formule di Kronenberg per acciai ($K_s = 2.4 R_m^{0.454} \beta^{0.666}$; con R_m resistenza a trazione del materiale da lavorare e β angolo di taglio) e per ghise ($K_s = 0.9 \text{ HB}^{0.4} \beta^{0.666}$; HB durezza Brinell del materiale da lavorare). Per gli altri materiali ci sono valori tabellati. In entrambi i casi l'unità di misura è [**DaN/mm²**].

Quindi la forza di taglio si calcola come $F_t = K_s S^{(1-1/n)} = K_s (aP)^{(1-1/n)}$.

P_m così dipende da tutti e tre i parametri del taglio obliquo (a, v_t, P): $P_m = K_s (aP)^{(1-1/n)} \pi D n / 1000$

Leggiamo la potenza sulla targa del motore P_M (potenza di targa) e **verifichiamo che $P_m \leq P_{M\eta}$** ; dove η è il rendimento cinematico della macchina e tiene conto di tutti gli accoppiamenti cinematici presenti tra il motore della macchina ed il pezzo in rotazione ($\eta = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_n$). $P_{M\eta}$ è quindi la **potenza massima erogabile dalla macchina**: quella richiesta non può quindi mai superarla.

Scelta dei parametri del taglio in funzione del tipo di lavorazione

Generalmente la lavorazione prevede 2 fasi:

1. Fase iniziale di sgrossatura (riduzione grossolana del diametro del pezzo):

→ P deve essere **elevato** (più produttività);

→ a deve essere **elevato** (perché all'inizio non interessa la rigatura superficiale);

→ V_t deve essere **minore** (perché all'aumentare degli altri parametri esso deve diminuire).

2. Fase finale di finitura (riduzione minore del diametro del pezzo, in modo che la superficie ultimata sia migliore):

→ P deve essere più **piccola** possibile;

→ a deve essere scelto **più lento** possibile per non avere rigatura superficiale;

→ V_t deve essere **elevato**.

In generale però possiamo avere due tipi di lavorazioni in base al numero di passate: non è detto che la potenza disponibile della macchina riesca a completare il pezzo con una sola.

1. Lavorazione monopasso, quando viene effettuata una sola passata (di finitura).

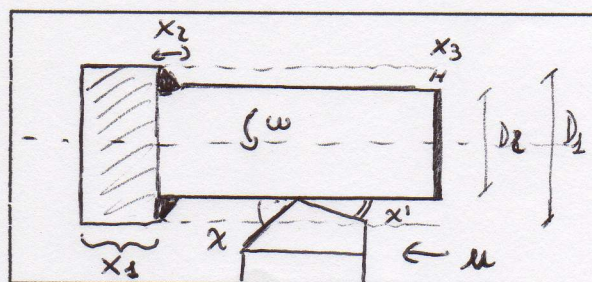
2. Lavorazione multipasso, quando viene effettuata almeno una sgrossatura ed una finitura.

Durata dell'utensile in funzione dei parametri di taglio

Una volta conosciuti i parametri di taglio dall'ufficio tecnico, è opportuno sapere a-priori quanto durerà l'utensile per la lavorazione. In alternativa si può fare in modo da imporre inizialmente la durata dell'utensile ed in base a questo provvedo a modificare i 3 parametri di taglio.

Tempo di macchina attivo e passivo

In realtà nel tempo di vita dell'utensile non bisogna considerare quei momenti in quali non c'è l'asportazione di truciolo. Il tempo macchina è appunto il tempo durante il quale l'utensile è a contatto col pezzo da lavorare.



X_1 è la parte serrata alla macchina e non può essere lavorata;

X_2 è la parte che deve essere smussata a fine lavorazione

X_3 è la parte iniziale che viene lasciata per poter lisciare il pezzo

Infine devo quindi avere una lunghezza $L = l + x_1 + x_2 + x_3$. Il tempo macchina non è tutto attivo: la parte in cui bisogna tenere conto di queste lunghezze è tempo macchina passivo.

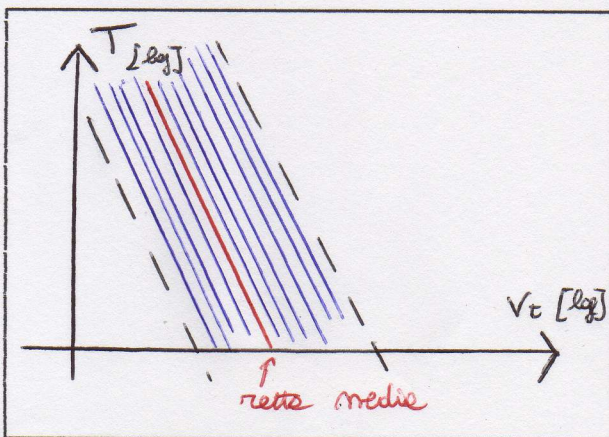
- Taylor fu il primo a trovare una relazione tra la durata dell'utensile T ed i parametri di taglio:

$v_t T^n a^m p^r = V_1$, ma non è risolvibile analiticamente per le troppe incognite nell'equazione. Si considera quindi una formula semplificata: $v_t T^n = V_1$, dove

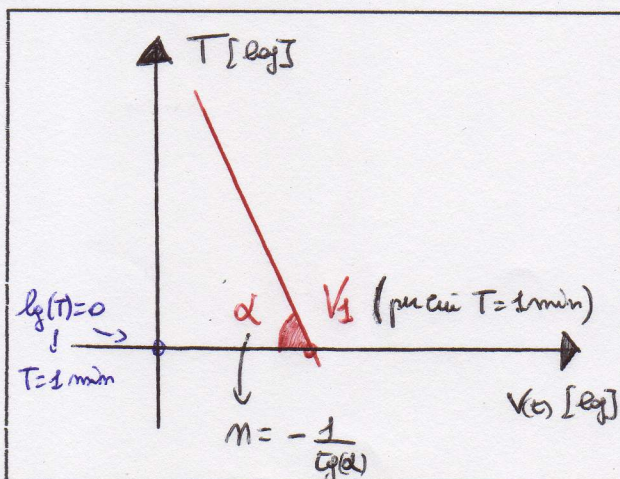
n è il coefficiente di durata, tiene conto sia del materiale del pezzo che di quello dell'utensile.

V_1 è quella velocità di taglio che fa durare l'utensile 1 min (generalmente durerebbe 15 - 30 - 60 - 90 min).

Trasformiamo la relazione sottoforma di logaritmo: $\log(v_t) + n \log(T) - \log(V_1) = 0$ che riconosciamo essere l'equazione di una retta in forma polare.



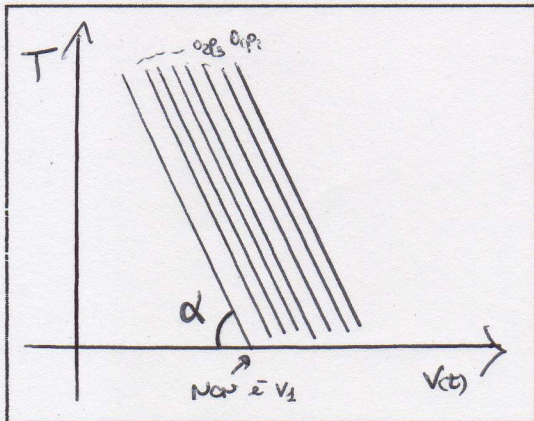
Taylor impose i parametri a e P costanti (pari a 1) e calcolò i valori di T con diverse v_t . A causa di errori di misura è opportuno fare almeno 15 prove con 5 v_t diverse adoperate ciascuna 3 volte. Si trovano così 15 rette comprese tra una certa fascia e si suppone che abbiano tutte la stessa pendenza. Si considera come approssimazione migliore i valori che si trovano sulla retta media.



Con la retta media di ogni materiale si può calcolare n e V_1 , nonché il valore della durata dell'utensile: l'intersezione della retta media con l'asse delle ascisse ($\log(T) = 0 \rightarrow T = 1 \text{ min}$) da proprio V_1 (velocità per la quale la durata è 1 min). Il coefficiente n può essere calcolato con l'angolo α : $n = -1/\text{tg}(\alpha)$.

- Con la formula di Taylor semplificata è possibile calcolare n e V_1 , la quale però non rappresenta la velocità specifica vera e propria (che si ottiene per $a^m p^r = 1$ e quindi infiniti valori dei 4 parametri), ma solo un caso particolare (avuto con a e P costanti, per esempio entrambi pari ad 1).

Considero ora invece la relazione di Taylor completa: $v_t T^n a^m p^r = V_1$: ho sempre troppe incognite (T , n , m , r e V_1); le ultime quattro le calcolo ancora una volta sperimentalmente e così posso sfruttare la relazione per ottenere T .

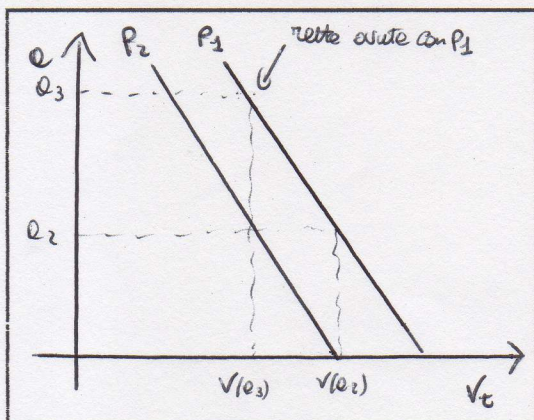


Per avere n adotto la seguente semplificazione:

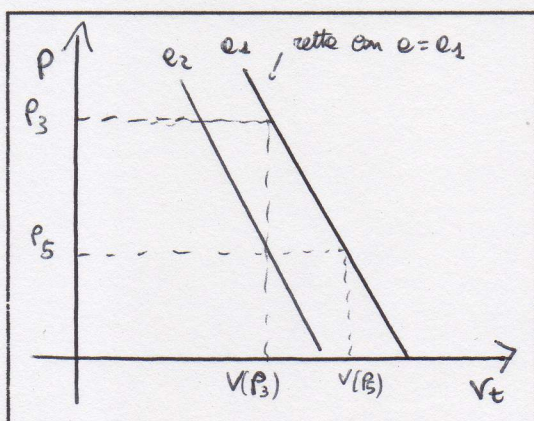
$a^m p^r = 1$. Ritorno alla relazione precedente con una retta in forma polare in cui n fa da coefficiente angolare.

Questa volta però non lascio a e P costanti, ma per ogni velocità di taglio rimango invariato prima il valore di a e poi di P facendo cambiare l'altro (sempre però rispettando $a^m p^r = 1$): $a_1 P_1$; $a_1 P_2$; $a_1 P_3 \dots a_1 P_1$; $a_2 P_1$; $a_3 P_1 \dots$

Posso quindi calcolare $n = -1/\text{tga}$



Per avere m costruisco sempre un diagramma doppio logaritmico, dove sulle ascisse ho ancora v_t e sulle ordinate stavolta ho a . Per inserire le rette prendo un valore fissato di P (es P_1) e cambio a (dai valori del primo grafico, es a_2 , a_3). Trovo così come varia a in funzione della velocità di taglio v_t . Considerando tutte le rette parallele, è ancora possibile calcolare m per definizione di coefficiente angolare: $m = -1/\text{tg}\beta$

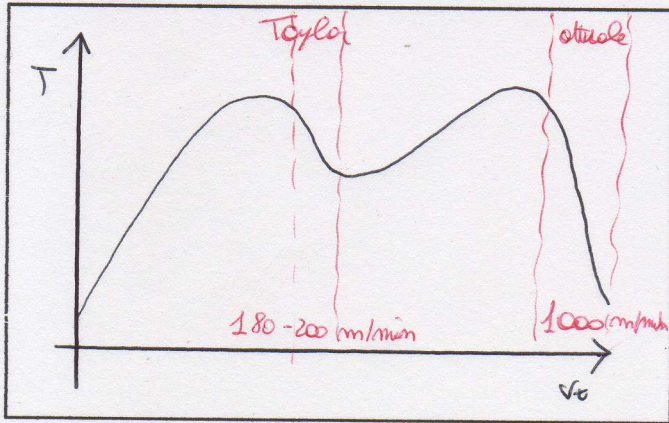


Per calcolare r devo ancora avere un diagramma doppio logaritmico, dove sulle ordinate stavolta ho P e sulle ascisse sempre v_t . Lascio costante a (es a_1) e prendo vari valori di P (dal primo grafico, es P_1 , P_2). Trovo così come varia P in funzione di v_t . Ancora una volta le rette sono considerate parallele, l'angolo che formano con il semiasse negativo di x permette di calcolare il parametro r : $r = -1/\text{tg}\delta$

- Per trovare la velocità specifica di taglio V_1 , posso considerare entrambi questi ultimi diagrammi e prendere sulle ordinate il valore $P = 1$ (o $a = 1$) che interseca un punto di

una retta per cui anche $a = 1$ (o $P = 1$). Proiettando questo punto sull'asse delle ascisse, trovo il valore di V_1 .

Taylor fece questi esperimenti all'inizio del 1900, per cui la tecnologia da allora ha compiuto passi in avanti. Recentemente è stato costruito un **diagramma T-v**, in cui si capisce che ai nostri tempi la velocità di taglio è tale che il coefficiente di durata n non varia linearmente con essa.



In realtà è ancora possibile approssimare la curva alla retta di Taylor, a patto che al parametro n vengano aggiunti dei particolari coefficienti di correzione.

Schema 1 Elementi del tornio parallelo (orizzontale) (asse del pezzo in posizione orizzontale)

Il **bancale (A)** è il pezzo del tornio sul quale vengono montati tutti gli elementi. Poiché deve assorbire tutte le forze della lavorazione esso deve essere un elemento molto duro: è ottenuto per fusione e viene lavorato solo in un secondo momento. Il bancale comprende due binari, i quali lasciano muovere il **carro (D)** e il **toppo mobile (E)**, facendoli allontanare o avvicinare al toppe fisso (B).

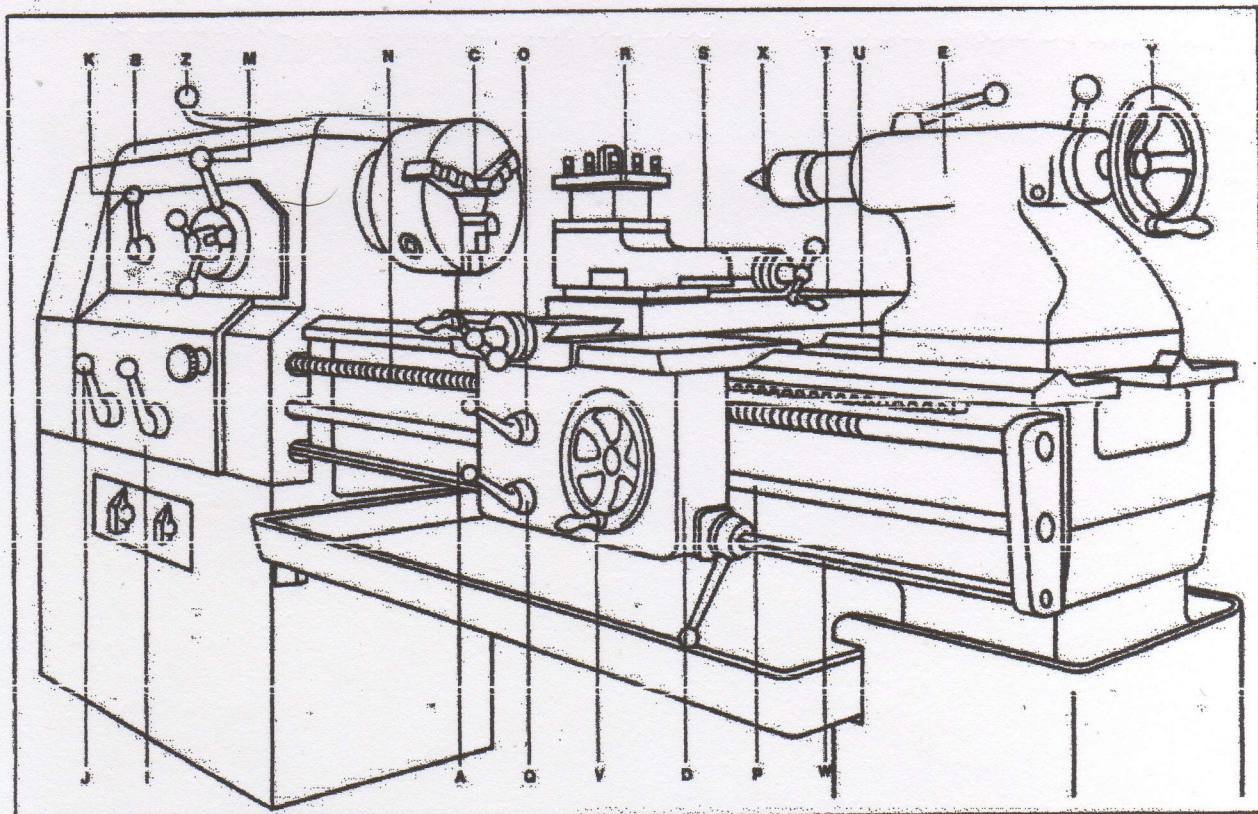
Il **toppo fisso (B)** contiene al suo interno:

- un **motore elettrico (F)** collegato con **cinghie e pulegge (G)** ad un albero;
- il **mandrino (C)** sul quale è montato il pezzo da lavorare tramite una morsa di tre griffe messe a 120° tra loro. Se il pezzo è troppo lungo potrebbe avvenire una deformazione plastica durante la lavorazione e quindi si usa anche una **contropunta (X)** che si fissa all'estremità libera del pezzo;
- **manopole (K,I,M)** che consentono di invertire il verso di rotazione, di scegliere la velocità di avanzamento u , di cambiare la velocità di rotazione (in serie geometrica);
- le **ruote dentate (L)** che danno la possibilità di far spostare il carro in automatico senza l'uso del **volano (V)**.

Sul fianco del bancale ci sono tre **alberi**, uno **filettato (N)** usato per le filettature (alta velocità di avanzamento u) ed una cremagliera che consente di spostare il carro manualmente.

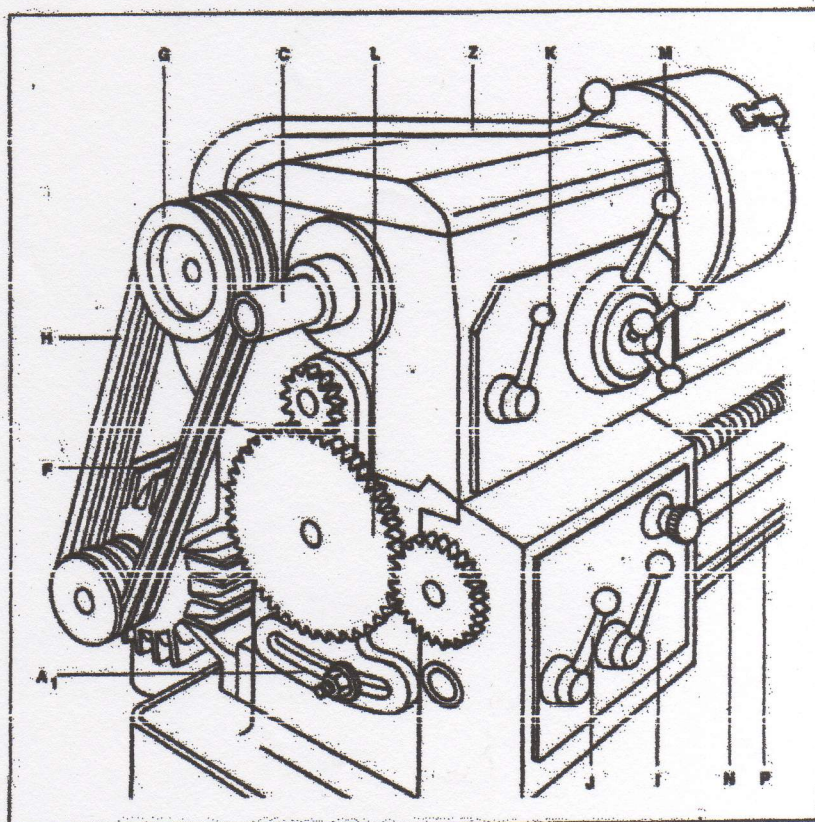
Sul carro è presente una **slitta trasversale (T)** che fa spostare il carro in senso ortogonale all'asse di rotazione del pezzo (imposta la profondità di passata P). C'è inoltre la **slitta porta utensile (S)** che può far muovere l'utensile in direzione diversa da quella parallela all'asse del pezzo (per formare estremità coniche anziché cilindriche). C'è inoltre il **porta utensile (R)** che sostiene e fissa l'utensile, ed una vasca che raccoglie truciolo e liquido lubrorefrigerante.

SCHEMA 1



Parti principali del tornio parallelo

- A. Bancale
- B. Testa motrice o toppo fisso
- C. Mandrino
- D. Carro
- E. Testa mobile o toppo mobile o controtesta
- F. Motore
- G. Puleggia
- H. Cinghie trapezoidali
- I. Scatola cambio velocità avanzamenti
- J. Leve del cambio di velocità degli avanzamenti
- K. Leva inversione moto avanzamento
- L. Rotismi di collegamento tra mandrino e scatole del cambio
- M. Leva del cambio velocità mandrino
- N. vite madre
- O. Leva chiocciola della vite madre
- P. Barra scanalata
- Q. Leva per la trasmissione del moto dalla barra scanalata al carrello
- R. Porta utensile
- S. Slitta porta utensile
- T. Slitta trasversale
- U. Slitta inferiore
- V. Volantino per lo spostamento longitudinale del carrello
- W. Barra di trasmissione per il comando dell'innesto della barra scanalata
- X. Contropunta
- Y. Volantino avanzamento contropunte
- Z. Leva innesto frizione e freno
- A₁. Supporto per ingranaggi detto testa di cavallo.



Schema 2 Lavorazioni principali di tornitura

Figura 1 → Tornitura cilindrica: il pezzo è bloccato tramite il fissaggio tra due punte: è un bloccaggio più preciso del mandrino: viene realizzato con un anello collocato sull'albero del mandrino (menabrida) che contiene un perno, il quale viene agganciato ad un altro anello presente sul pezzo (brida) e permette la sua rotazione. La coassialità tra pezzo e alberi di toppe fisso e mobile è garantita da due punte collocate ai due estremi del pezzo in lavorazione. E' prevista un' asportazione costante di truciolo in modo da ottenere un cilindro con diametro più piccolo.

Figura 2 → Tornitura conica: questa volta la contropunta del toppe mobile non è fissata sull'asse di rotazione del pezzo, ma è leggermente sfasata: ciò fa in modo che la lavorazione produca asportazione di truciolo non costante e quindi una figura conica.

Figura 3 → Sfacciatura: l'utensile si muove nel verso ortogonale all'asse di rotazione del pezzo grazie alla slitta trasversale. Esso non lavora su tutta la lunghezza del pezzo ma solo sulla sua faccia libera.

Figura 4 → Tornitura conica all'estremità: poiché il cono da creare è di piccole dimensioni è possibile lasciare invariata la posizione della contropunta sul toppe mobile e spostare solo la slitta porta utensile.

Figura 5 → Formatura: L'utensile affonda nel pezzo con una profondità P senza traslare. Forma una cava per l'inserimento di un anello di arresto. La larghezza della cava è pari a quella dell'utensile (detto utensile di forma).

Figura 6 → Troncatura: viene usata solamente la slitta trasversale ed il pezzo viene completamente tagliato.

Schema 3 Lavorazioni secondarie di tornitura

Figura 1 → Foratura: nel toppe mobile, invece della contropunta viene montata una punta elicoidale in modo da provocare un foro nel pezzo.

Figura 2 → Tornitura interna: si usa un utensile da interno; può essere un'operazione di finitura o di sgrossatura.

Figura 3 → Alesatura: viene usato un utensile detto alesatore, su fori interni. Può essere solo un'operazione di finitura.

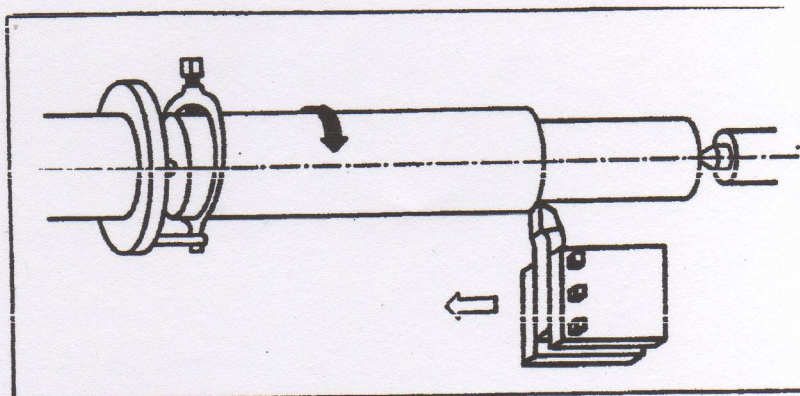
Figura 4 → Godronatura: viene usato un utensile detto godrone, che serve a far crescere l'attrito tra il pezzo da lavorare (generalmente una manopola) e qualunque altra superficie.

Figura 5-6 → Filettatura di fori, viti e filettatura esterna: le prime due vengono effettuate con l'aiuto di un maschio e di una filiera (girate a mano); l'ultima invece avviene con un utensile apposito.

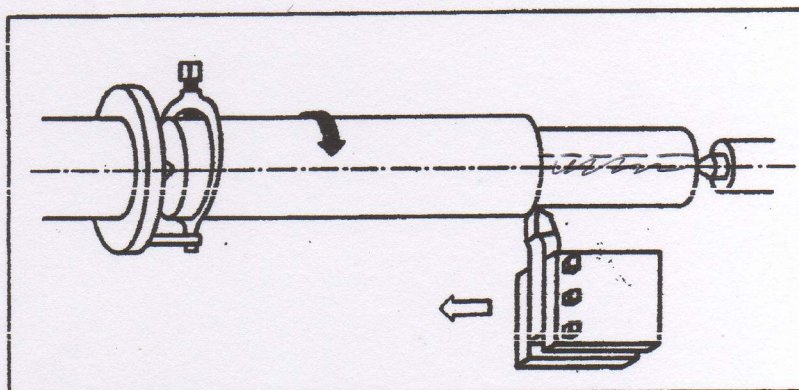
SCHEMA 2

Principali operazioni eseguibili sul tornio

Tornitura cilindrica esterna, fra punta e contropunta, o cilindatura, con passate di sgrossatura e di finitura.

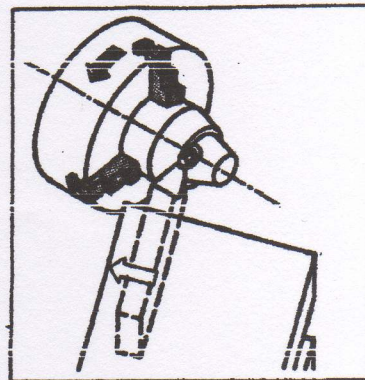
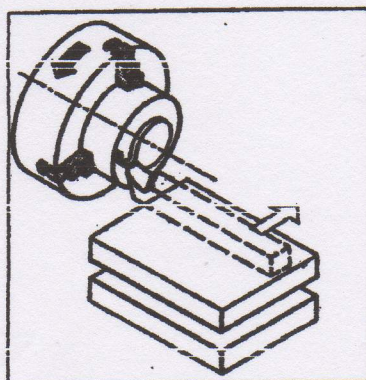


Tornitura conica con spostamento della contropunta, con passate di sgrossatura e finitura.



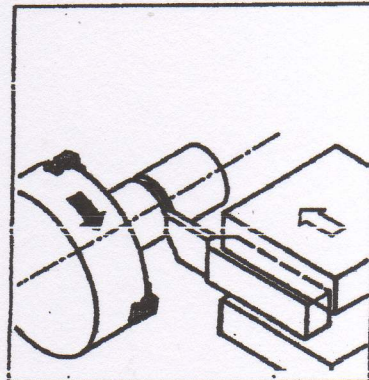
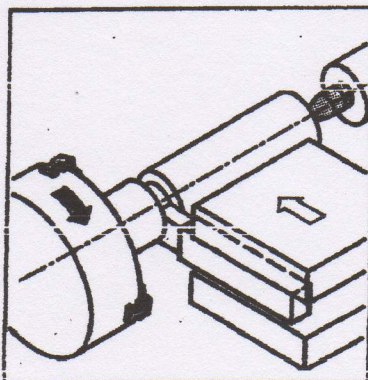
Sfiacciatura, con passate di sgrossatura e di finitura.

Tornitura conica con rotazione del carrello portautensile, con passate di sgrossatura e di finitura.



Formatura o tornitura, con avanzamento frontale dell'utensile, senza passate successive.

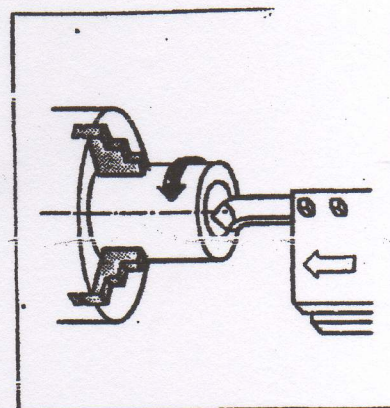
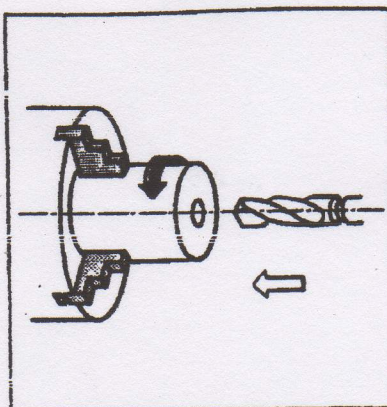
Troncatura o taglio.



SCHEMA 3

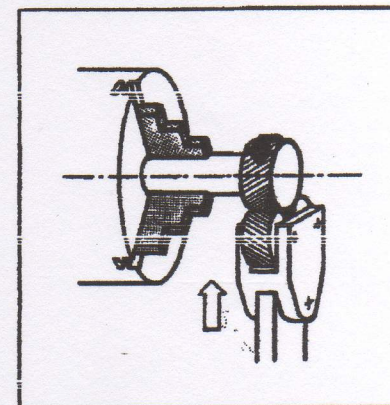
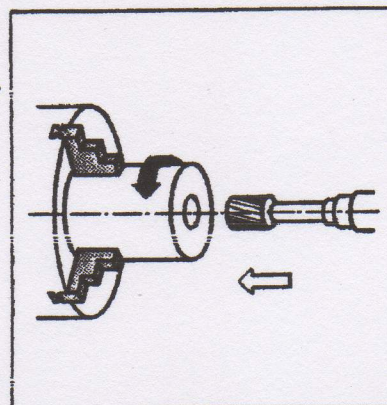
Foratura con punta elicoidale. ▷

Tornitura interna o alesatura con utensili a taglio singolo con passate di sgrossatura e di finitura. ▷▷



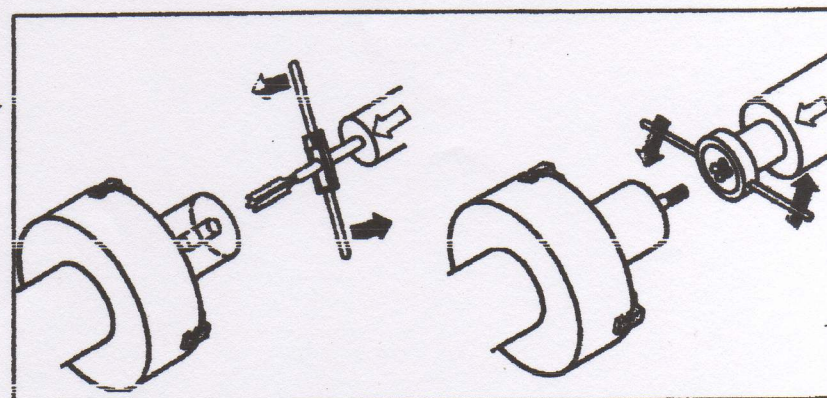
Alesatura, con alesatore a denti, detta anche allisciatura. ▷

Godronatura, con godroni per godronare e zigrinare. ▷▷

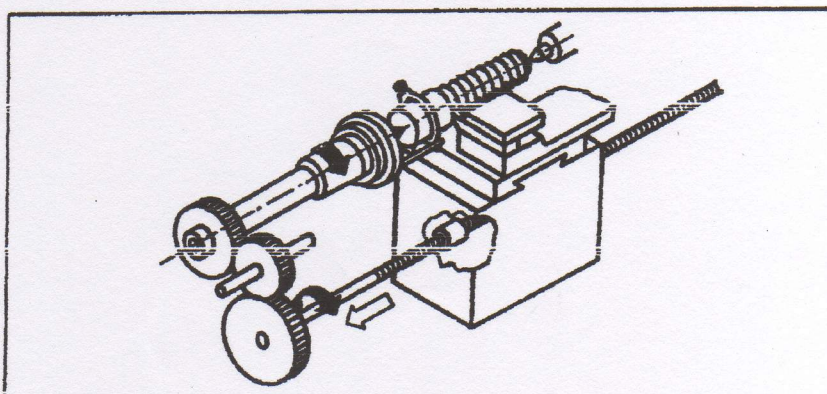


Filettatura di fori di piccolo diametro, con maschio filettatore, detta anche maschiatura. ▷

Filettatura di viti di piccolo diametro, con filiera. ▷▷



Filettatura con utensili per filettare, con l'aiuto della vite madre. ▷▷



Fresatura

Parametri di taglio, tipi di lavorazione e di apparecchiatura

E' una lavorazione a **moto di taglio rotatorio**. Mentre nella tornitura la **rotazione** spettava al pezzo, questa volta essa è **posseduta dall'utensile** (così come accade nella foratura). I **moti di alimentazione (a e P)** sono invece dati al pezzo (solo con macchine piccole la P viene assegnata all'utensile).

I parametri di taglio sono sempre gli stessi:

$v_f = \pi D n / 1000$ (D diametro della fresa e n numero di giri della fresa); a e P.

Con la fresatrice **si può avere una cava** su una superficie piana, oppure lo smusso di spigoli del tavolo (**contornatura**), oppure rendere complanare il tavolo (**rettificazione o spianatura**). In base al tipo di lavorazione abbiamo bisogno di varie fresature:

1. Fresatura periferica concorde o in concordanza; → Fresatrice a testa orizzontale
2. Fresatura periferica discorde o in discordanza; →
3. Fresatura frontale. → Fresatrice a testa verticale

Poiché si tende a costruire macchine più flessibili possibile, esistono le **fresatrici universali**, che consentono di adoperare o la testa orizzontale o la testa verticale.

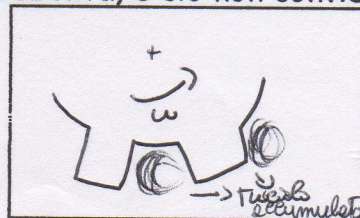
- La **fresatrice**, a differenza del tornio, **ha due motori**: uno principale, che dà la possibilità di ottenere il moto rotatorio dell'utensile, e l'altro ausiliario che consente i moti di alimentazione (a e P). Quindi mentre nel tornio il consumo energetico scaturisce solo dalla potenza al mandrino, nella fresatura **l'energia consumata dipende dall'assorbimento elettrico di entrambi i motori**.

Utensile

L'utensile usato è la **fresa**: è **pluritagliante**, cioè costituito da più parti monotaglianti, per cui lo studio può essere limitato ad un solo tagliente. I denti possono essere inoltre dritti o elicoidali.

Scelta del numero di denti

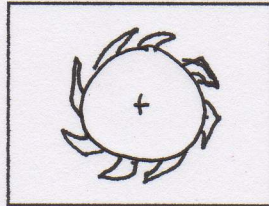
- Con una **sgrossatura** conviene utilizzare un **numero minimo** di denti: il truciolo da asportare è elevato (infatti P è grande), per cui la parte rimossa potrebbe occupare subito ed intasare lo spazio tra due denti; inoltre con più denti la sezione resistente di ciascun tagliente risulta indebolita, e ciò non conviene per grandi quantità di truciolo da asportare.



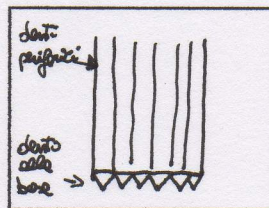
- Con una finitura invece può essere utilizzato un numero maggiore di denti, poiché il valore di P non è molto elevato.

Differenza tra fresatura periferica e frontale

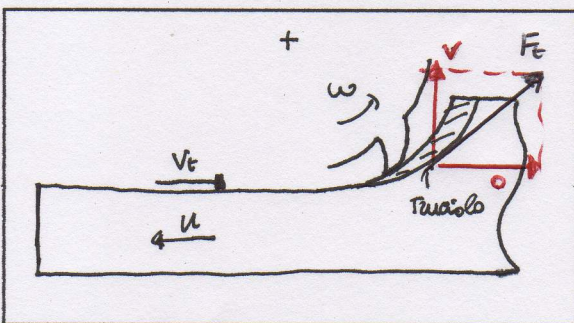
- La fresatura è periferica quando l'utensile lavora con i denti disposti lungo il perimetro dell'utensile.



- La fresatura è frontale quando la fresa ha i denti sia lungo la periferia sia su una delle due basi del cilindro primitivo (e lavora principalmente con i denti alla base).



Fresatura periferica discorde o in discordanza



La velocità di taglio v_t ha verso opposto ad u .

Il truciolo non ha sezione costante

E' inoltre possibile scomporre la risultante delle forze impresse dal dente al materiale, che è tangente al truciolo, in due componenti: v e o .

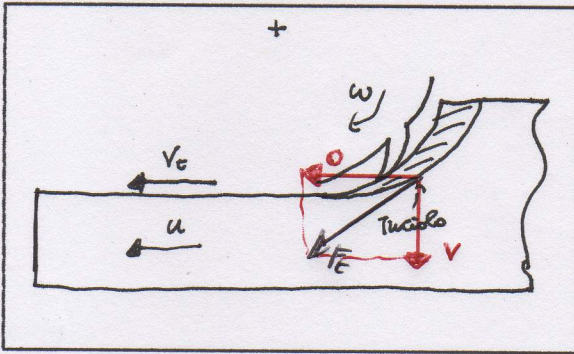
v tende a sollevare il pezzo dalla macchina; è quindi una forza dannosa, e l'unico modo per contrastarla è assicurare il fissaggio del pezzo al supporto (tavola portapezzi).

o è invece una forza che si oppone all'avanzamento del pezzo. Sapendo che il moto rettilineo viene compiuto grazie ad una filettatura di tipo trapezoidale che, con l'energia del motore ausiliario, è in grado di far muovere la chiocciola che funge da dado. Per come è fatta la forza o , essa fa in modo che l'elevato gioco presente tra vite e chiocciola (non evitabile in alcun

modo per esigenze costruttive) venga completamente eliminato, e con esso anche le dannose vibrazioni prodotte.

- Anche con il perfetto fissaggio del pezzo sulla tavola, non si può evitare che la superficie già lavorata venga "sfiorata" dal dente successivo della fresa poiché c'è un ritorno elastico che tende a far aumentare lo spessore del piano. Ciò è dannoso perché peggiora la rifinitura superficiale.

Fresatura periferica concorde o in concordanza



Nella fresatura concorde si ha che la **velocità tangenziale di taglio dell'utensile** (considerata parallela alla superficie già lavorata) e l'**avanzamento u del pezzo hanno lo stesso verso.**

Il truciolo non ha sezione costante.

Considero la forza di taglio (sempre tangente al truciolo) e la scompongo ancora una volta in v ed o (rispettivamente componente normale e tangenziale):

v è diretta verso il basso: **tende a mantenere il pezzo sulla tavola**, per cui non è necessario con questa lavorazione procurarsi un serraggio molto robusto per evitare queste vibrazioni.

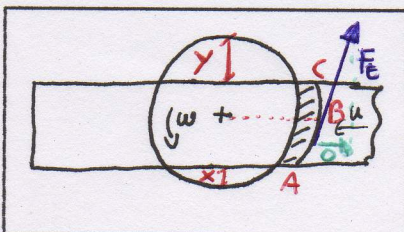
o invece è **dannosa** perché ha lo stesso verso dell'avanzamento del pezzo: tende a distaccare e quindi a favorire il forte gioco tra i filetti di chiocciola e madrevite; fa nascere quindi delle vibrazioni che influiscono negativamente sulla superficie del pezzo (che diventerà più rugosa). Ciò si evita se la macchina ha una **molla elastica** che agisce con una forza costante sulla chiocciola, che viene spinta sui fianchi dei filetti della madrevite.

- La sezione di truciolo da asportare decresce gradualmente nella fresatura concorde e cresce invece gradualmente nella discorde; ciò dovrebbe portare ad una finitura superficiale migliore per la discorde, ma non è così: infatti nella fresatura concorde i denti successivi non strisciano più sulla superficie appena lavorata nonostante il ritorno elastico, e questo riduce la rugosità.

Fresatura frontale (l'asse di rotazione della fresa è ortogonale alla superficie da lavorare)

Si possono avere due casi differenti; la scelta di uno di essi avviene in modo che non ci sia una forza orizzontale concorde con l'avanzamento (per evitare vibrazioni).

1. $D > L$



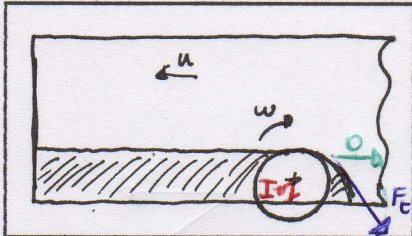
una sola passata permetterebbe di compiere una spianatura completa.

Il truciolo in questo caso è a sezione costante.

Affinché la forza orizzontale si opponga sempre alla velocità di avanzamento **bisogna fare in modo che l'arco di imbocco AB sia maggiore dell'arco di uscita BC** (quindi l'asse della fresa non deve coincidere con l'asse del pezzo, e nel disegno, con w antioraria, è opportuno che sia al di sopra).

I parametri da rispettare sono $D = (1,3 \rightarrow 1,7)L$ e $x = 0,1D$ $y = 0,3D$

2. $D < L$



per poter spianare l'intera superficie c'è bisogno di operare più di una passata.

Il truciolo non è costante in questo caso.

E' importante in questo caso **scegliere bene il verso di rotazione della fresa**: anche senza recupero automatico del gioco tra chiocciola e madrevite, si ha che la componente orizzontale della forza di taglio è sempre opposta ad u e quindi favorevole per la lavorazione. Inoltre il truciolo con questo metodo viene portato via subito senza intasare lo spazio tra i denti.

Per assicurare che o sia sempre opposto ad u , bisogna fare in modo che la distanza I tra l'asse di rotazione della fresa ed il bordo del materiale lavorato rispetti la condizione:

$$I < L/3$$

- La qualità superficiale è migliore con questo tipo di fresatura: infatti la presenza di più denti garantisce una migliore finitura.

Scelta dei parametri di taglio

$V_f \rightarrow$ deve essere il più alto possibile.

$a \rightarrow$ più piccolo possibile in funzione del materiale da lavorare.

$P \rightarrow$ dipende dal fattore sgrossatura (fino ad 1 cm con la periferica) o finitura.

Calcolo della potenza necessaria per eseguire la lavorazione (fresatura periferica)

Scelti i tre parametri di taglio bisogna vedere se la potenza al mandrino è sufficiente per la lavorazione.

La presenza di più denti rende il calcolo molto difficoltoso, ma si adotta la **semplificazione** per cui nella fresatura periferica il dente che asporta il truciolo sia unico.

Non si può parlare di profondità di passata costante, poiché la sezione di truciolo varia nel tempo partendo da un valore minimo ed arrivando ad un valore massimo. $\Rightarrow S(r) = S(e) \cdot L$

- Il consumo di energia elettrica è dovuto al contributo di entrambi i motori della fresa; inoltre la potenza al mandrino non è costante durante la lavorazione, e quella calcolata si riferisce al suo valore massimo. Per questi motivi il calcolo dell'energia elettrica consumata viene fatto dividendo per due la potenza al mandrino avuta precedentemente (in modo da dare una potenza media) e si somma il 15% della stessa potenza (per tenere conto anche del motore ausiliario) → $P_{m(reale)} = P_m/2 + 15\%P_m$
- Naturalmente, per fare in modo che la lavorazione sia possibile, bisogna verificare che la potenza calcolata sia inferiore o al limite uguale alla potenza di targa del motore moltiplicata per il rendimento cinematico della macchina → $P_m \leq P_t \times \eta$

Calcolo della potenza al mandrino per fresatura frontale

Anche per il calcolo della potenza necessaria alla lavorazione c'è bisogno di distinguere due casi differenti:

- $D > L$ Così abbiamo già visto che il truciolo è costante, per cui il calcolo della forza di taglio è semplicemente: $F_t = K_t \times q = K_t \times a_z \times P \times Z_x$ (dove Z_x è il numero di denti in presa).
Con gli stessi passaggi precedenti posso quindi calcolare la potenza (ed esprimerla, volendo, anche in KW).
- $D < L$ In questo caso sappiamo che bisogna fare più passate ed il truciolo non è costante. Il calcolo è analogo a quello fatto per la fresatura periferica, tranne che per la sezione del truciolo, che viene espressa così: $q = s_{max} \times P$, infatti in questo caso il contributo per la sezione di truciolo viene dato dalla profondità di passata e non dalla larghezza della fresa.

Schema 4 – Tipologie di utensile fresa per lavorazioni periferiche

Fresa a denti fresati a) → ogni dente è un utensile monotagliante con un proprio tagliente principale, un petto e un fianco (faccia di spoglia principale). E' costituito da acciaio HSS, ricavato da una barra cilindrica. La sua affilatura viene fatta sul fianco e ciò porta inconvenienti: allarga l'ampiezza del dente, cambiando la geometria dell'utensile.

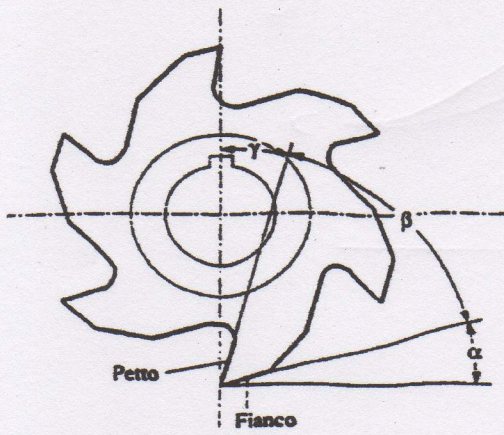
Fresa a profilo costante b) → l'angolo di spoglia superiore γ è sempre nullo, mentre il fianco è una porzione della spirale di Archimede. La figura c (vista di profilo e frontale) mostra l'affilatura di questo tipo di fresa: essa viene fatta non sul fianco ma sul petto, in modo da non variare la geometria dell'utensile.

Fresa a denti diritti d) → In questo caso il dente ingrana nel materiale con tutta la sua larghezza l, e ciò comporta una sollecitazione maggiore (dannosa).

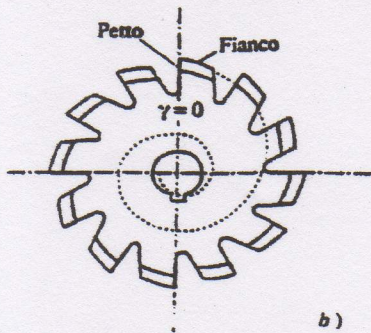
Fresa a denti elicoidali e) → Il tagliente questa volta è obliquo rispetto all'asse di rotazione della fresa: lavora gradualmente in modo tale che le sollecitazioni vengono diminuite. L'inconveniente è che la forza di taglio ha una componente parallela all'asse di rotazione, che tende a spostare l'utensile.

Fresa a denti bielicoidali f) → Ci sono due taglienti obliqui, di inclinazione opposta, in modo tale che le dannose componenti parallele all'asse di rotazione della fresa nella forza di taglio si annullino a vicenda.

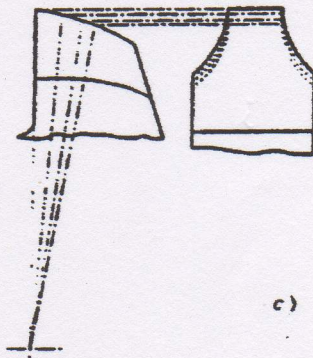
SCHEMA 4



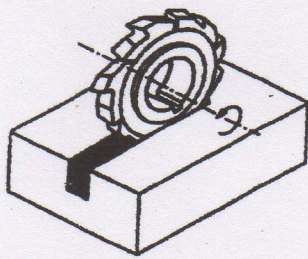
a)



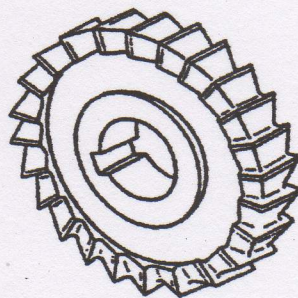
b)



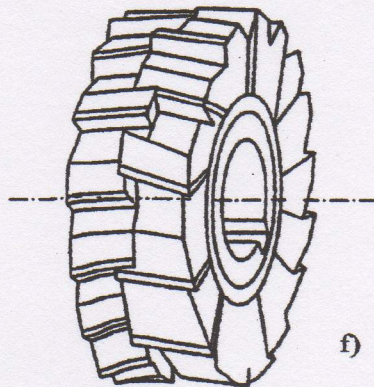
c)



d)



e)



f)

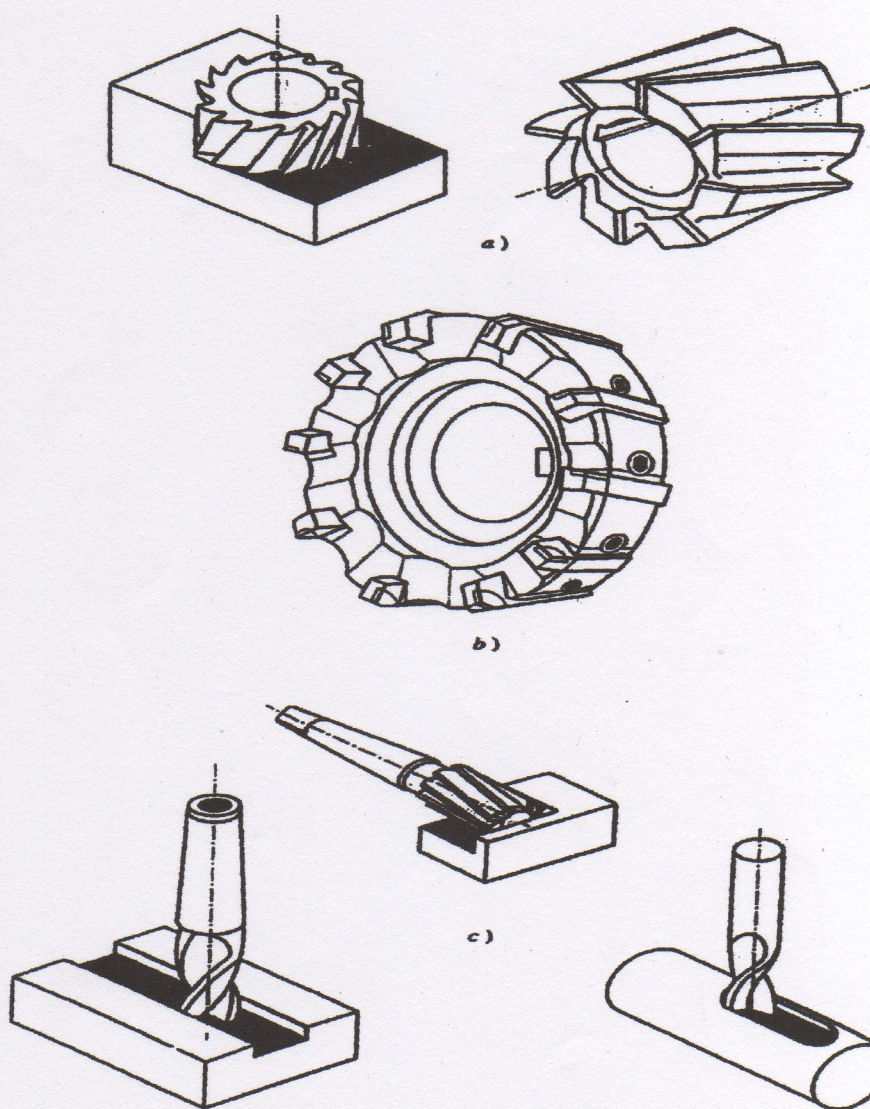
Schema 5 – Tipologie di utensile fresa per lavorazioni frontali

Fresa a manicotto a)→ I denti periferici servono solo per rifinire la parte laterale, mentre i denti alla base asportano la maggior parte di truciolo.

Fresa per spianatura b)→ E' costituita da un supporto circolare che ha i denti che sono veri e propri utensili monotaglianti come quelli del tornio; in questo modo gli essi non vengono riaffilati ma direttamente sostituiti. Per la complessità del pezzo esso ha un costo notevole (anche oltre 1000 euro).

Fresa a candela o a bottone c)→ Sono usate per ottenere delle cave per linguette o chiavette. Nel primo caso, poiché si sta facendo una cava periferica, il truciolo non ha difficoltà ad uscire, quindi si può usare anche un numero elevato di denti, mentre nei restanti due il numero di denti è minimo per fare in modo che il truciolo non resti intasato. La fresa è raccordata come la superficie della cava, così si evitano le concentrazioni di tensione.

SCHEMA 5



Schema 6 – Fresatrice universale, sulla quale si monta la testa orizzontale o quella verticale

La parte principale è composta da:

un basamento, fissato al suolo con elementi antivibranti;

un montante, all'interno del quale c'è il motore principale del mandrino ed un cambio che imposta la velocità di taglio. Sulla parte superiore c'è il mandrino, sul quale vengono montate le teste;

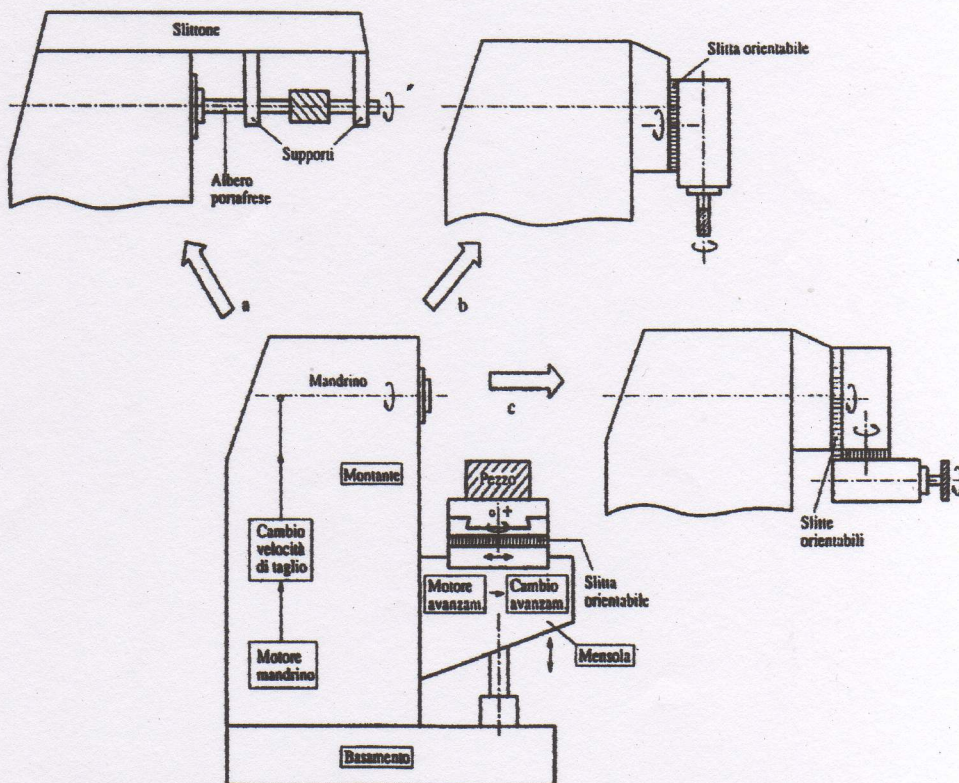
una mensola, che può sollevarsi o abbassarsi, impostando la profondità di passata P. Contiene il motore ausiliario ed un cambio che imposta la velocità di avanzamento. La mensola supporta la slitta porta-utensile, la quale può ruotare e muoversi sia in orizzontale, sia ortogonalmente al piano del foglio; per questi motivi si dice che la fresa ha 3 assi di movimento.

La figura a rappresenta una testa orizzontale adatta per lavorazioni periferiche: la parte superiore è lo slittone, in grado di regolare la distanza tra l'albero del mandrino ed i supporti dell'albero portafresa.

La figura b rappresenta una testa verticale adatta per lavorazioni frontali: al posto dello slittone c'è una slitta orientabile per spostare l'asse di rotazione della fresa ed avere un certo angolo tra essa e la superficie del pezzo da lavorare.

La figura c rappresenta invece una testa universale: la testa può qui assumere qualunque orientazione nello spazio. L'inconveniente è che con questo tipo di testa la macchina non è in grado di fornire le stesse potenze che può dare invece ad una singola testa.

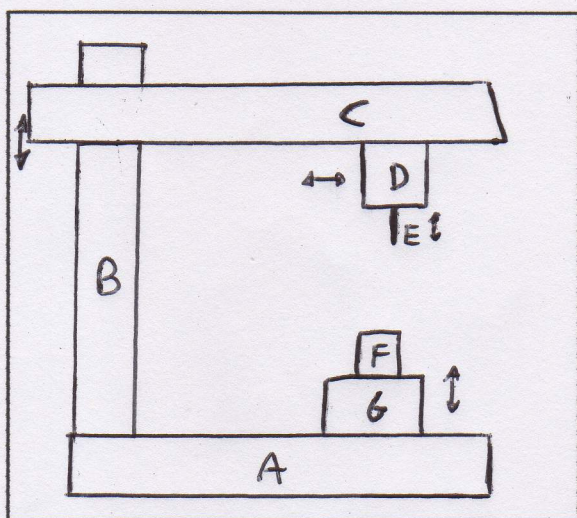
SCHEMA 6



Foratura

Lo strumento si chiama **trapano** o **trapanatrice**, può essere di più tipi:

1. **Trapano sensitivo**: tenuto in mano dall'operatore, si chiama così perché è la sensibilità dell'operatore a dare la forza con la quale si fa penetrare la punta nel materiale. Poiché si può spostare in qualunque modo, questo trapano è lo **strumento più flessibile**.
2. **Trapano da banco**: ha dimensioni maggiori; deve essere **sostenuto da un banco o tavolo da lavoro** e può essere sensitivo o automatico; nell'ultimo caso l'operatore con una leva è in grado di abbassare la punta facendola penetrare nel materiale.
3. **Trapano a colonna o a montante**: il suolo ha una **fondazione in cemento** nella quale vengono fissati i ferri ed il sistema antivibrante sul quale viene bloccata la macchina.



A è il **basamento**, fissato al suolo, che supporta tutti gli altri organi.

B è il **montante o la colonna**, sul quale è fissato il **braccio C**, che ha la possibilità di spostarsi verticalmente e ruotare intorno alla colonna.

Il pezzo D contiene il **motore ed il cambio**: fa ruotare la **punta elicoidale E** (che può lievemente spostarsi in verticale, sporgendo o meno da D); inoltre può traslare orizzontalmente (avvicinandosi o allontanandosi dal montante).

G è la **tavola portapezzi** (si sposta verticalmente o ortogonalmente al piano del foglio).

F è il **pezzo da lavorare**.

Se la macchina ha una potenza elevata, motore e cambio si trovano nel montante B e la trasmissione del moto avviene tramite il sistema puleggia-cinghia (metodo economico).

4. **Trapano multimandrino**: consente di eseguire più fori in un unico pezzo ed evitare così le perdite di tempo: c'è un motore ad elevata potenza che trasmette il moto a tutti i mandrini che possono abbassarsi indipendentemente l'uno dall'altro.

Parametri di taglio

Per tutte le macchine operatrici si ha:

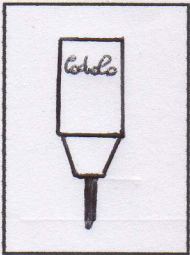
V_t , velocità di taglio impartita all'utensile in grado di ruotare;

a , avanzamento che può essere posseduto dalla punta elicoidale (per fori di piccola dimensione e profondità e macchine di potenza non elevata) o dal pezzo (con fori di grande diametro e macchine di forte potenza).

Non esiste la profondità di passata, ma si parla di **moto di appostamento**, cioè moto iniziale che in ogni fase della lavorazione consente di allineare l'asse di rotazione della punta con l'asse del foro da generare. Viene eseguito con la tavola portapezzi, o con la rotazione del braccio o con lo spostamento di D.

Operazioni di foratura

Centratura: operazione iniziale con un particolare utensile che consente di ottenere il posizionamento preciso della punta elicoidale sul materiale da lavorare. La punta che consente la centratura è fatta così:



la parte serrata nel mandrino è il **codolo**: ha diametro maggiore che non consente la flessione dell'utensile stesso. La **parte tagliente** (usata anche per fare gli alloggiamenti di punta e contropunta nel tornio) è molto breve per evitare ancora la flessione dell'utensile. Il collegamento tra codolo e punta è di tipo conico, per fare in modo che la successiva foratura avvenga con preciso allineamento.

- La centratura viene **effettuata** quando il **foro** è progettato **con tolleranze strette**; ma è utile anche quando la **superficie da lavorare non è ortogonale all'asse di rotazione della punta**.

Foratura: l'utensile usato è la **punta elicoidale** convenzionale, un utensile pluritagliente sempre **costituito da due utensili monotaglienti**. Non è un'operazione di alta precisione: la punta (per la sua geometria) da una superficie simile a quella ottenuta con un'operazione di sgrossatura (**molto rugosa**), inoltre non da un foro perfettamente circolare a causa delle oscillazioni flessionali e torsionali della punta elicoidale.

- I **fori** ottenuti possono essere **passanti o ciechi**; questi ultimi sono i più critici perché si ha un notevole surriscaldamento della punta elicoidale ed una maggiore difficoltà nell'espulsione di truciolo.

Allargatura: consente di ottenere un foro maggiore di quello fatto con la foratura: il diametro finale del foro viene ottenuto per gradi con punte via via maggiori (oppure foratura e allargatura vengono effettuate con una sola passata grazie alle punte a gradino). Ci sono due casi particolari:

- **Allargatura parziale**, quando vogliamo incassare la testa di una vite nel materiale forato.
- **Svasatura**, quando la testa della vite da incassare è conica: in questo caso la punta elicoidale genera un alloggiamento conico.

Alesatura: viene eseguita quando il foro necessita di tolleranze minime per avere un accoppiamento. L'operazione viene eseguita con particolari **punte multitaglienti** che, a differenza della punta elicoidale, devono asportare solo una minima quantità di truciolo e quindi **hanno un numero notevole di denti**. Può essere fatta su un tornio con un utensile da interno, mentre sul trapano viene eseguita con un **alesatore**, operazione che è possibile fare anche manualmente (con diversa geometria dell'utensile).

Maschiatura: non sempre è necessaria, consente di filettare i fori. Può essere fatta, come l'alesatura, sia automaticamente che manualmente con un maschio (i due utensili sono diversi). La filettatura viene raggiunta per gradi, quindi i maschi necessari a compiere questa operazione sono 3:

- **Sgrossatori:** consentono di dare una prima filettatura grezza;
- **Finitori:** dovrebbero dare la geometria finale, ma non ci riescono soprattutto se l'operazione viene fatta a mano, poiché il ritorno elastico del materiale deforma l'altezza del filetto;
- **Calibratori:** asportano una minima quantità di truciolo dovuta al ritorno elastico del materiale dopo il maschio finitore.

Con una filettatura eseguita con trapano, i tre tipi di maschi si trovano in successione sullo stesso utensile.

Tipi di punte elicoidali

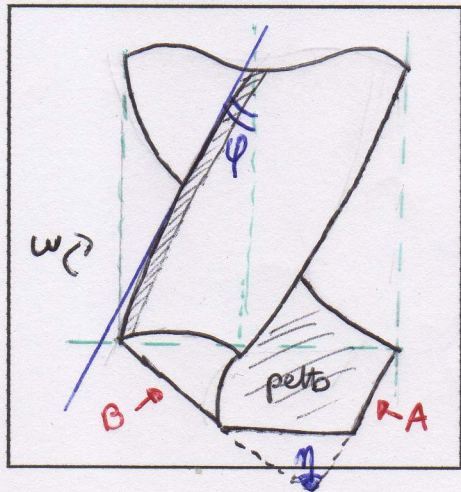
Le punte elicoidali sono tutte **fatte di acciaio HSS** e si dividono in tre tipi, in base al materiale da lavorare. La distinzione è presente nella geometria della punta: **cambiano gli angoli ϕ dell'elica e η dell'apertura della punta**.

N → Tipo di punta usata per forare acciai semplici e ghise grigie.

D → Usata per materiali difficilmente lavorabili, come acciai speciali e titanio.

T → Punta utilizzata per materiali molto teneri (rame, stagno...).

Geometria delle punte elicoidali



vista laterale:

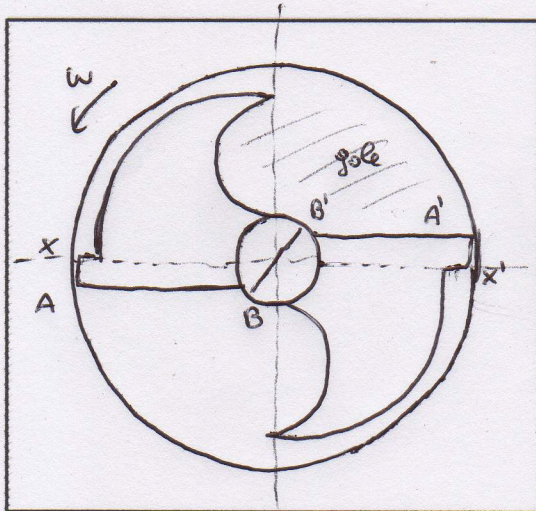
ϕ è l'angolo compreso tra la tangente all'elica e l'asse del cilindro primitivo;

η è l'angolo formato dalle due parti coniche della punta.

Si individuano i taglienti principali (segmenti A e B) che asportano la maggior parte di truciolo.

Il petto dell'utensile sarà la gola della punta elicoidale.

Il tagliente secondario va a rifinire le pareti del foro durante la sua generazione, e si sviluppa su tutto l'elicoide.



vista frontale

AB e A'B' sono i due taglienti principali.

Ax e A'x' sono i fianchi, coincidono col tagliente secondario e sono ortogonali al piano.

Il petto non è visibile perché ortogonale al piano della figura.

A'x' e Ax vengono detti il quadretto, perché sono gli unici punti della punta elicoidale a toccare le pareti del foro.

L'elemento circolare prende il nome di **nocciolo**, ed è la parte piena della punta elicoidale. **Riesce a trasmettere il momento torcente necessario**. Il diametro BB' non ha la funzione di tagliente, ma incrudisce il materiale, che subito si rompe grazie alla pressione della punta. La dimensione del nocciolo è quasi insignificante rispetto al diametro intero ($0,1D < d < 0,2D$), e per questo subisce due tipi di oscillazione, che sono causa della bassa qualità del foro:

- **Oscillazioni torsionali**, intorno al suo asse di rotazione (dovute al piccolo diametro);
- **Oscillazioni flessionali**, lungo l'asse del nocciolo stesso (dovute alla sua snellezza);

Calcolo potenza al mandrino (analitica)

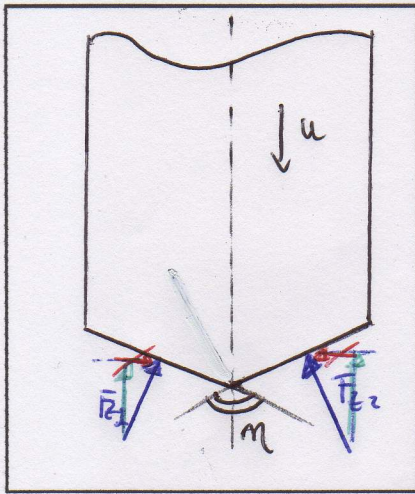
Prima di tutto **dobbiamo determinare quelle che sono le forze agenti sulla punta**, cioè l'insieme delle reazioni che il materiale produce sull'utensile.

Fatto ciò la relazione che ci consente di calcolare la potenza al mandrino è :

$P_m = F_t V_t + F_z u \rightarrow$ non si accenna alla terza aliquota perché la profondità di passata non è definita.

Ci riferiamo ad una vista semplificata della punta:

Vista laterale

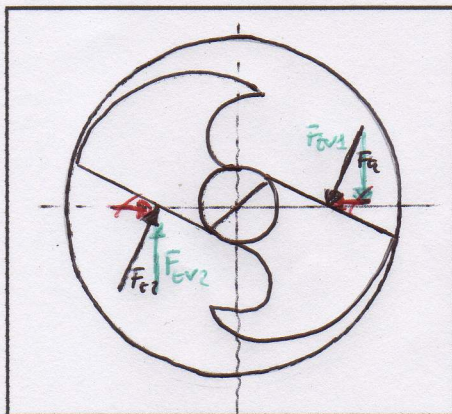


Individuiamo le forze che si oppongono alla penetrazione della punta elicoidale nel materiale: sono ortogonali ai taglienti principali.

Ritenendo la punta perfettamente simmetrica, le due forze sui taglienti sono uguali $\rightarrow F_{z1} = F_{z2}$. Possiamo scomporle lungo due assi: le componenti orizzontali si trovano sulla stessa direzione e sono opposte, quindi si annullano a vicenda. Le uniche due forze che agiscono sulla punta sono le due componenti verticali, che si oppongono all'avanzamento della punta.

- Ma l'aliquota che tiene conto della resistenza del materiale all'avanzamento può essere trascurata come nelle precedenti relazioni per lo stesso motivo ($u \ll v_t$).

Per individuare le forze di taglio F_t ci riferiamo alla vista (semplificata) frontale della punta, quando però i taglienti non sono paralleli agli assi, ma solo quando li intersecano a metà del loro raggio.



Le F_t sono ortogonali ai taglienti principali e rappresentano le reazioni del materiale alla rotazione dell'utensile. Ancora una volta è possibile scomporre le forze in due direzioni:

Le due componenti orizzontali si annullano a vicenda perché opposte e giacenti sulla stessa retta.

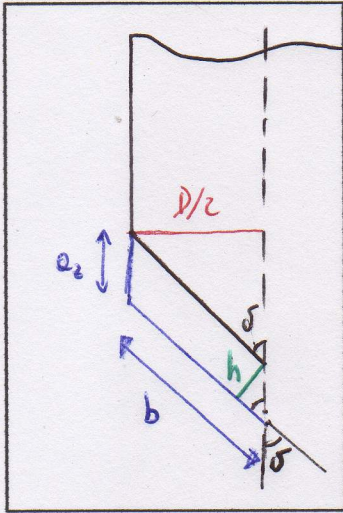
Le due componenti verticali non si annullano ma sommano i loro effetti nel calcolo della potenza al mandrino.

Quindi $P_m = F_t V_t$ (la velocità di taglio è nota così come anche l'altro parametro a).

$F_t/2 = F_{tv} = K_t q$, dove q è la sezione del truciolo e K_t dipende dalla pressione specifica di taglio. La pressione di taglio K_t , a differenza delle lavorazioni precedenti, non si calcola con la sezione di truciolo, ma è data dalla formula $K_t = K_s/h^z$, in cui h è l'altezza della sezione di truciolo, mentre z è un esponente tabellato che dipende dal tipo di materiale da forare.

Dato che $q = b \times h \rightarrow F_t = 2F_{tv} = 2K_s \times h^{(1-z)} \times b$. Servono così solo le dimensioni geometriche del truciolo:

Ci riferiamo alla prima metà della punta nella vista laterale:



L'asportazione di truciolo dipende dall'avanzamento del singolo dente ogni giro della punta, a_z . L'avanzamento completo è dato ovviamente dalla formula $a = 2 a_z$ (ci sono solo due denti nella punta elicoidale).

Noto nella figura l'angolo $\delta = \eta/2$

Geometricamente ottengo: $h = a_z \sin \delta$ (calcolabile sapendo il tipo di punta e quindi anche η). Inoltre $b = D/(2 \sin \delta)$.

Andando a sostituire: $F_t = 2F_{tv} = 2K_s \times (D/2 \sin \delta) \times (a_z \sin \delta)^{1-z}$

$P_m = K_s \times (D/\sin \delta) \times (a_z \sin \delta)^{1-z} \times V_t$ se voluta in KW bisogna dividere per 30×1000

Calcolo potenza al mandrino con il momento torcente

Questo metodo è più attendibile e preciso: viene preso in considerazione il momento M_t , cioè la coppia della forza di taglio per il braccio x , distanza compresa tra i due punti di applicazione delle forze $\rightarrow M_t = F_t \times x$.

Il momento torcente non necessita del calcolo della forza di taglio per essere determinato: esso viene direttamente misurato mediante un sensore applicato tra il mandrino che serra la punta e l'albero del mandrino.

La potenza al mandrino verrà quindi calcolata con la relazione $P_m = M_t \omega$, dove $\omega = 2\pi n$.

Ancora una volta se bisogna esprimere la potenza al mandrino in KW, bisogna dividere per 30 (per passare da giri al minuto a giri al secondo) e per 1000 (conversione W \rightarrow KW).

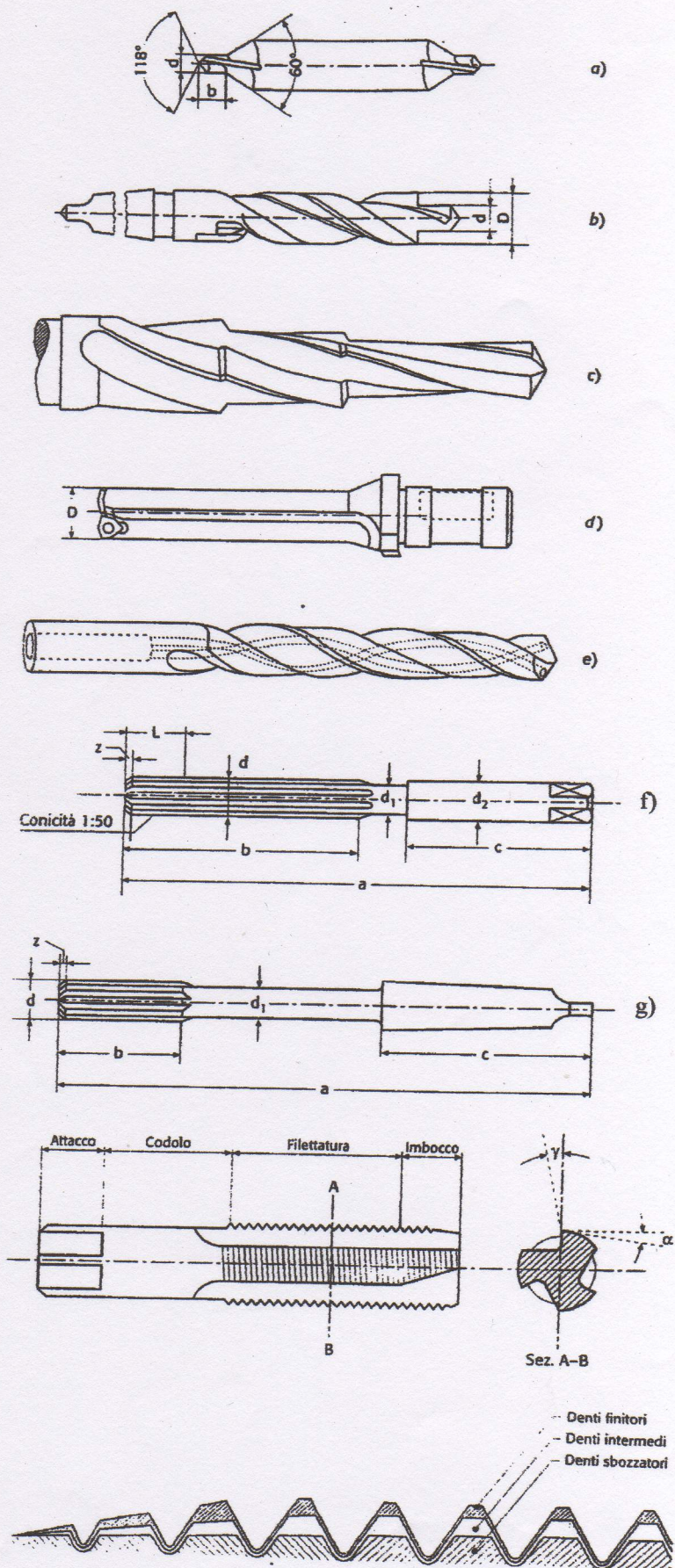
- Come al solito, una volta nota la potenza al mandrino necessaria per eseguire la lavorazione desiderata, bisogna confrontarla con la potenza di targa del motore moltiplicata per il rendimento cinematico $P_m = P_M \eta$.
- Se stiamo facendo una successiva foratura, con un foro già precostruito, nella formula del calcolo della sezione di truciolo ovviamente non bisogna usare il diametro nominale, ma la differenza tra il diametro nominale del foro da ottenere ed il diametro del foro già ottenuto con la punta precedente $\rightarrow (D-d)$.

Schema 7 – Tipi di utensili per foratura

- a) **Punta da centro**, per effettuare la centratura. Ha il tagliente solo nella parte iniziale e nella parte conica, per fissare tra le due punte nel caso di tornitura con contropunta, e per accogliere la punta elicoidale anch'essa conica di tipo N,D,T.
- b) **Punta doppia**, per evitare di cambiare punta durante la lavorazione e quindi ridurre i tempi di produzione: il foro è iniziato con una punta di diametro minore e poi continuata con una punta più grande.
- c) **Punta a gradini**, ha più diametri gradualmente crescenti: può essere utilizzata per un'allargatura e non per una svasatura (non ha estremità coniche).
- d) **Punta a inserti**, è costruita in acciaio comune su cui vengono montati gli inserti in carburo di tungsteno. Questo consente una velocità di rotazione molto più alta.
- e) **Punta con canali**. Bisogna ricordare che la temperatura maggiore durante la lavorazione si ha sul truciolo e nel caso di foratura esso trova difficoltà ad uscire dal foro in costruzione. Per questi motivi finché i diametri sono di piccole dimensioni basta intingere la punta in olio prima della lavorazione; per diametri di grosse dimensioni invece si usa questo tipo di punta, che presenta al suo interno due fori nei quali scorre il liquido lubrificante durante la lavorazione.
- f) **Alesatore manuale**, ha un numero maggiore di taglienti perché come già visto nel caso di alesatura il truciolo da asportare è minimo e non c'è bisogno di una gola tra i denti molto capiente. L'estremità della punta ha una conicità accentuata perché l'utensile così si auto-centra nel foro prima della lavorazione evitando difficoltà per l'operatore. Ogni tagliente è molto lungo sempre a causa della scarsa precisione che si può avere con alesatura manuale: il tagliente in questo modo, una volta penetrato, non ha più la possibilità di muoversi.
- g) **Alesatore a macchina**, con un numero comunque elevato di denti, ma a differenza di un alesatore manuale non c'è eccessiva conicità alle estremità e tutti i taglienti hanno lunghezza limitata.

Maschio per filettatura. La sezione mostra i tre taglienti che hanno una geometria particolare. L'utensile è formato da un attacco, che gli consente il fissaggio al mandrino o nel giramaschi; un codolo, una parte filettata e un imbocco leggermente conico in caso di filettatura manuale, per evitare sbavature durante la lavorazione. La figura più in basso mostra l'utensile per filettatura automatica sul trapano: i vari tipi di denti si trovano in successione sullo stesso maschio (denti sgrossatori, finitori e calibratori).

SCHEMA 7



Lavorazioni per asportazioni di truciolo con moto di taglio rettilineo

Servono per ottenere una lavorazione su superfici piane o per creare una cava di grosse dimensioni. Infatti le precedenti apparecchiature avevano un limite per quanto riguarda il volume di lavoro: i limiti spaziali entro i quali si può effettuare la lavorazione dipendevano dalle corse avute sui tre spostamenti possibili.

Limatura o piallatura

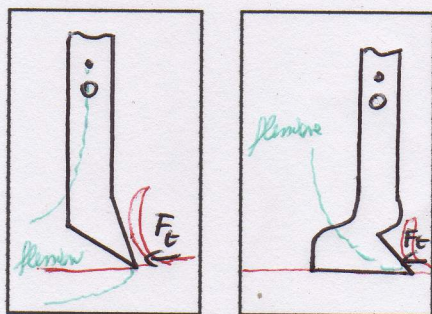
Queste due lavorazioni sono quasi identiche: utilizzano uno strumento dello stesso tipo, mentre la differenza permane sui differenti moti di lavoro:

V_t = posseduta dal pezzo per la limatrice e dall'utensile per la piallatrice;

Moto di alimentazione (a) = può essere posseduta da entrambi per la limatrice, mentre per la piallatrice deve necessariamente appartenere all'utensile;

Moto di accostamento (P) = può essere posseduta da entrambi per la limatrice, mentre per la piallatrice deve necessariamente appartenere all'utensile.

- Queste macchine, poiché lavorano su pezzi di grosse dimensioni, hanno un grave limite sulla loro produttività: le masse in movimento sono molto grandi e quindi posseggono un'elevata inerzia, per cui le velocità con le quali gli elementi si muovono sono molto basse, soprattutto a fine corsa in cui è necessario invertire il moto:
 V_t è uniforme e alternata, poiché si parla di corsa attiva e corsa passiva: la prima si ha quando l'utensile asporta truciolo, mentre la seconda si ha quando l'utensile torna indietro senza fare alcun lavoro sul pezzo. Questo è un altro fattore che riduce notevolmente la produttività.
- L'utensile adoperato per queste macchine è monotagliante; la sua geometria è identica a quella dell'utensile da tornio (però questa volta il moto di taglio è ortogonale). Cambia anche lo stelo: mentre per la tornitura esso è sempre dritto, in queste due lavorazioni può essere a stelo rettilineo oppure a stelo curvilineo.



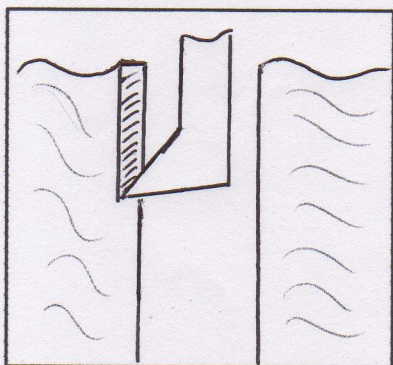
La forza di taglio agente su di essi è tale da provocare una flessione (rotazione oraria) rispetto al punto O: nel primo caso però l'utensile tende a penetrare nel pezzo dando una superficie più scabra e rugosa; nel secondo caso l'utensile tende a sollevarsi dalla parte appena lavorata, dando luogo ad una finitura superficiale migliore.

E' quindi ovvio che il primo tipo di utensile venga usato per sgrossature, mentre il secondo tipo di utensile sia utilizzato per operazioni di finitura.

- Il calcolo della potenza al mandrino per piallatura e limatura viene effettuata con le stesse condizioni della tornitura, poiché ancora una volta agisce un solo utensile monotagliante.

Stozzatura

Questo tipo di lavorazione viene considerato per creare delle cave in fori.. E' una macchina a moto di taglio rettilineo con utensile molto simile al precedente:



C'è sempre una corsa attiva ed una corsa passiva; inoltre la larghezza dell'utensile deve sempre avere la stessa larghezza della cava, così è possibile effettuare la lavorazione con una sola passata.

Il costo dell'utensile non è molto elevato, a differenza della brocciatura, e quindi conviene usare questo tipo di macchinario quando i pezzi da lavorare non sono molti.

La potenza al mandrino viene calcolata ancora una volta allo stesso modo della tornitura.

Brocciatura

E' una lavorazione ad asportazione di truciolo a moto di taglio rettilineo NON alternato, ma continuo. A differenza di stozzatura, piallatura e limatura, essa ha un'elevatissima produttività, dovuta al metodo di lavorazione che consente di ottenere il pezzo finito con un'unica passata.

- L'utensile è detto **broccia**; compensando l'elevata produttività di questa lavorazione, il costo dell'utensile è elevatissimo (centinaia di migliaia di euro). L'acquisto dell'apparecchiatura viene quindi fatto solo quando è possibile ammortizzarne il costo con numerose lavorazioni (non come per la stozzatura). La **massima lunghezza** per la broccia è **1m**, perché essendo fatta di acciaio HSS bisogna trattarla termicamente (tempra o cementazione): se fosse troppo lunga subirebbe una deformazione al momento del trattamento talmente elevata da comprometterne la funzionalità. Per lavorare quindi pezzi più lunghi di 1m è necessario progettare più brocche da usare in successione.

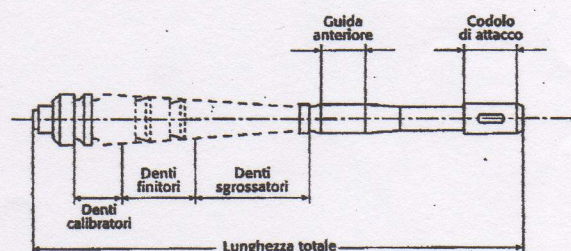
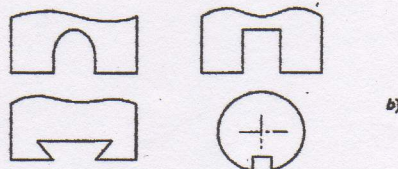
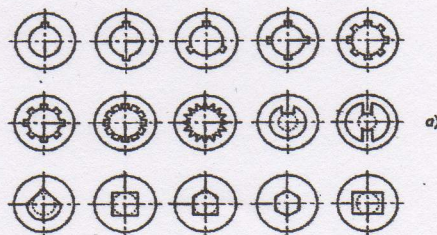
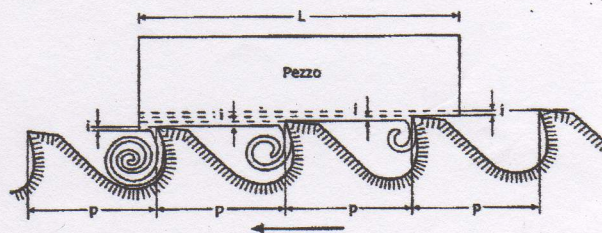
Schema 8 – Broccia e tipi di brocciatura

a, b) Lavorazioni di brocciatura (cave su tutta la lunghezza del pezzo). Nel primo caso sono interne, mentre nel secondo sono esterne al materiale; in particolare la terza è una cava a nido di rondine, utilizzata per accoppiamento tra bancale e carro nel tornio.

Broccia (ultima figura). L'utensile trasla da sinistra verso destra ed è fissato al codolo. La guida anteriore deve avere lo stesso diametro del foro precostituito in modo da centrare l'utensile con il suo asse. Ci sono 3 tipi di denti (sgrossatori, finitori,calibratori) per i quali il diametro aumenta gradualmente. I denti calibratori, oltre a tenere conto del ritorno elastico, sono anche una parziale scorta e fungono da denti finitori quando gli stessi vengono riaffilati più volte.

Lavorazione (prima figura). Intervengono prima i denti sgrossatori, poi i finitori e infine i calibratori. Tutto consiste nel tirare fuori (in figura da destra verso sinistra) la broccia dal foro. La distanza p tra i denti della broccia è il passo della broccia ed è costante relativamente ad ogni zona (il passo dei calibratori è pari a quello dei finitori perché dopo la limatura si devono confondere). Il passo deve essere ben dimensionato: per evitare che l'utensile fletta durante la lavorazione bisogna fare in modo che non avvenga contemporaneamente l'uscita di un dente e l'inizio di asportazione di truciolo per un altro; quindi si sceglie un valore del passo compreso tra $1.5 + 2.5\sqrt{L}$, cioè si evita che p sia un sottomultiplo della lunghezza totale della broccia. Inoltre tra due denti consecutivi c'è una differenza di altezza i , che prende il nome di incremento, ed è costante relativamente ad ogni zona (è nullo nei denti calibratori).

SCHEMA 8



Rettifica o rettificatura

E' l'ultima lavorazione per asportazione di truciolo che viene eseguita su un materiale prima di metterlo in commercio, perché vengono raggiunte le tolleranze di progetto.

Per poter eseguire questo tipo di lavorazione, sul materiale deve essere lasciato uno strato di sovrametallo di lavorazione (con spessore di alcuni centesimi di millimetro). Il truciolo asportato è in minima quantità.

Poiché con la rettifica è possibile raggiungere rugosità inferiori al micron, rispetto alle altre macchine, questa ha una struttura molto più rigida con gli accoppiamenti tra i vari elementi con tolleranze molto strette. Ciò comporta un costo molto elevato.

La rettifica e quindi anche la macchina rettificatrice può essere distinta in:

- **Rettifica in piano** → rende speculari le superfici piane;
- **Rettifica in tondo** → rende speculari le superfici tonde.

Non esiste una rettificatrice universale, a causa della precisione degli accoppiamenti.

La macchina per questa lavorazione è una rettificatrice, l'utensile è detto **mola**: costituito da due materiali:

1. **Abrasivo**, **parte tagliente**, in pratica sottoforma di polvere distribuita uniformemente in una matrice. Gli abrasivi possono essere **naturali** (diamante, ossido di alluminio, silice) o **artificiali** (elementi naturali mischiati con carburo di ferro, carburo di tungsteno o ossidi).
2. **Legante**, la **matrice** che accoglie i taglienti in grani. I leganti possono essere di **materiale metallico** (rame), **ceramico**, di **gomma**, di **resine termoidurenti** (per rimanere alla stessa consistenza alle elevate temperature raggiunte).

La mola asporta truciolo grazie ai microutensili nel legante. I **microtrucioli raggiungono temperature molto alte a causa dell'elevata V_f** . A contatto con l'aria i frammenti quindi si ossidano esotermicamente formando scintille.

Le caratteristiche di una mola sono 3:

1. **Dimensione del grano**, utile per capire come si comporta l'utensile: con **grano fine** i microutensili si consumano subito lasciando spazio a quelli sottostanti (**utile con lavorazione di materiali duri**).
2. **Durezza della mola**, riferita al legante: una mola **in gomma** ha durezza minore di una mola in cemento. **Con materiale da lavorare molto duro**, si usa una durezza di mola molto bassa (gomma).

3. Porosità, o struttura della mola, riferita al legante, indica la presenza e la grossezza di cavità. Una mola porosa è adatta a materiali teneri: il truciolo non riesce ad essere scagliato via e viene quindi trattenuto nei pori del legante senza andare ad intasare i taglienti.

Schema 9 – Lavorazioni di rettifica

Rettifica in tondo periferica esterna a) La V_t è posseduta dalla mola. Il moto di alimentazione è di due tipi: il pezzo trasla parallelamente all'asse di rotazione della mola (A_1) e ruota lentamente (A_2). La rettifica è in discordanza (si verifica con i vettori delle velocità periferiche). R rappresenta il moto di appostamento, posseduto dalla mola, imposta la profondità di passata e non agisce nel tempo macchina. Generalmente la velocità della mola è dell'ordine di migliaia di giri al minuto, mentre la velocità A_2 raggiunge solo poche decine di giri al minuto.

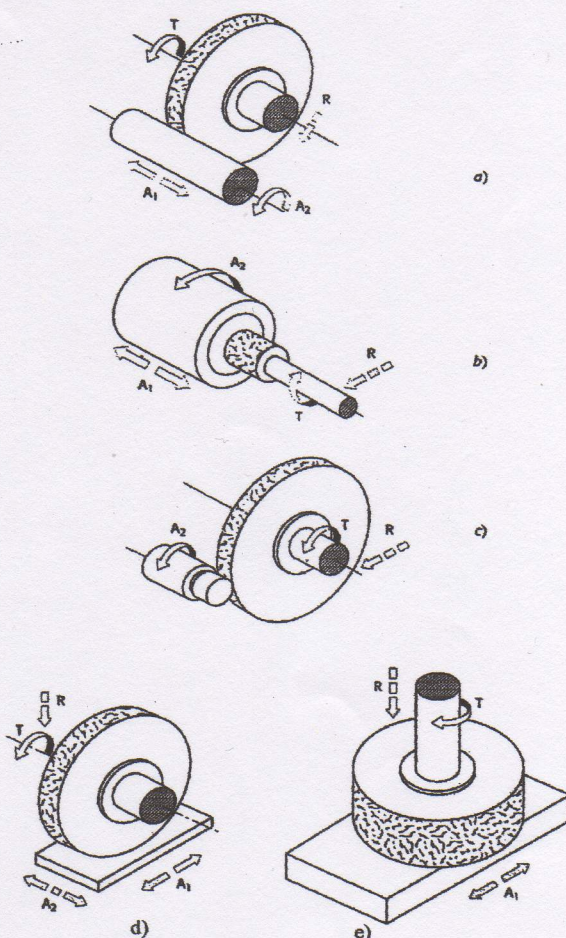
Rettifica in tondo periferica interna b) La mola in questo caso entra nel foro. I parametri sono gli stessi. Generalmente si ha $D_{mola} < 2/3 D_{foro}$.

Rettifica a tuffo c) La figura è errata perché R appartiene al pezzo.

Rettifica in piano periferica d) La mola lavora con i taglienti periferici su una superficie piana.

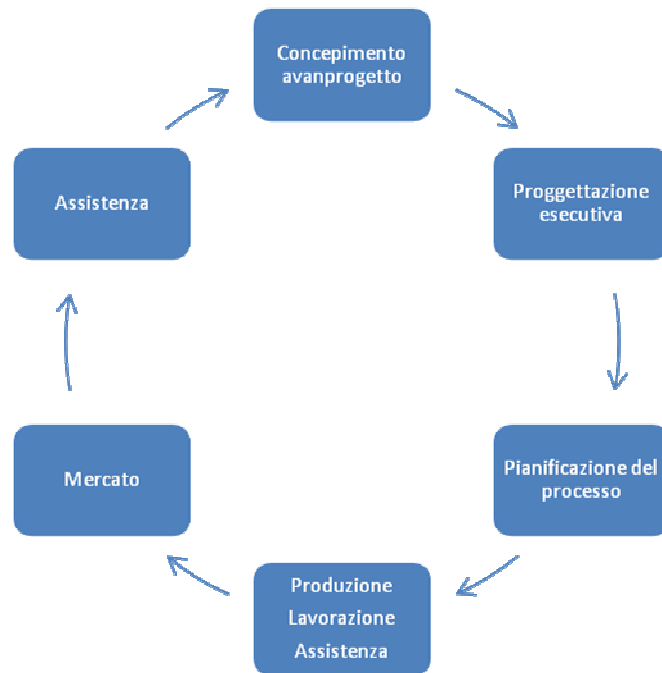
Rettifica in piano frontale e) La mola lavora con taglienti alla base. Si ha sempre $D_{mola} > L_{pezzo}$

SCHEMA 9



Ciclo di lavorazione

Si definisce ciclo di lavorazione la sequenza ordinata delle operazioni da eseguire per trasformare un pezzo grezzo in un prodotto finito che a sua volta può essere considerato un semilavorato per trasformazioni successive. La stesura (o pianificazione) **del ciclo di lavorazione** rappresenta una fase fondamentale **del ciclo di vita del prodotto**.



Il mercato e le modalità di produzione hanno subito un notevole cambiamento passando dalle cosiddette **economie di scala** (mercato insaturo, in grado di recepire enormi quantità di prodotto poco diversificato) ad **economie di mercato** in cui sono rilevati i concetti di flessibilità quali diversificazione del prodotto e riduzione dei tempi di immissione nel mercato. Tale passaggio è stato maturato e reso possibile da un lato dalle richieste del mercato dall'altro, dallo sviluppo e dalla penetrazione di strumenti elettronici ed informatici, in particolare le diverse tecniche assistite da calcolatore e lo sviluppo di macchine utensili a controllo numerico ed altri sistemi di produzione automatizzata.

CAD:Disegno (2d, 3d) assistito da calcolatore.

CAE:Progettazione ottimizzata.

CAM:Lavorazione e produzione assistita da calcolatore (stampi di materie plastiche).

CAT:Studio delle tolleranze in progettazione.

CAIP:Controllo della qualità.

CAPP:Pianificazione del processo.

CNC

A prescindere dalle tipologie di produzione (su **commessa o magazzino**) il ciclo di vita di un prodotto inizia da una **fase di concepimento** derivate da una specifica commessa o da un'analisi di mercato e da previsioni di vendita. La **fase di concepimento** consiste nell'elaborazione **dell'idea di prodotto** e la **messa a punto di schizzi schemi o disegni di avanprogetto** in tali disegni non vanno riportati quote tolleranze o altre prescrizioni a meno che non siano ritenute dei vincoli progettuali significativi (**ingombri**). In questa fase non vengono considerati calcoli su resistenza e altri problemi sul prodotto. Fase successiva è la **progettazione esecutiva del prodotto** e delle sue diverse parti, tale fase è affidata **all'ufficio di progettazione** (ingegnerizzazione) eventualmente affiancata dal settore ricerca e sviluppo per prodotti fortemente innovativi in questa fase le caratteristiche del prodotto sono completamente definite in relazione a diversi aspetti: **funzionalità, costo, durata, facilità nell'uso e nella manutenzione, assemblaggio, sicurezza, riciclabilità**. La **fase più importante non è quella di produzione ma quella di progettazione** legata a gli aspetti definiti in precedenza. **Risultato della progettazione è la stesura dei disegni di definizione di elementi, sottogruppi, gruppi e complessivo**. Per elemento si intende il singolo componente non ulteriormente scomponibile. Per sottogruppo si intende l'insieme minimo di elementi combinabili tra loro tramite assemblaggio. Per gruppo si intende l'insieme di sottogruppi e di elementi risultanti in un assieme con un preciso scopo di funzionamento (autonomo o condotto). L'assemblaggio di gruppi sottogruppi ed elementi ci dà il complessivo. Da un punto di vista tecnico tutte le informazioni che determinano **la funzionalità vanno codificate nei disegni di definizione** dei singoli elementi. Tale informazioni non vanno inserite salvo specifiche o eccezioni nei disegni di definizione di gruppi sottogruppi e complessivi. (L'assieme non ha bisogno di specifiche sui singoli gruppi o elementi). Infatti in tale fase si effettuano una stima di massima degli elementi da realizzare internamente e di quelli da acquistare (motori fiat-internamente, vetri-Smet ditta esterna). È importante sottolineare la differenza tra **quotatura funzionale e quotatura ausiliaria** all'atto della stesura dei disegni di definizione dei diversi elementi. Le **quote funzionali** sono quelle che determinano la funzionalità dell'elemento da realizzare ed inoltre sono le quote che fanno fede in sede di collaudo ai fini dell'accettabilità del prodotto. Tali quote **non possono essere modificate** in maniera autonoma dall'ingegnere di produzione ma richiedono una modifica da parte del progettista. Infine su tali quote per esigenze lavorative è possibile effettuare unicamente l'operazione di trasferimento di quote tollerate. Le **quote ausiliarie** riportate in parentesi **possono essere modificate** entro certi limiti dall'analista di produzione. Tali quote non necessitano strettamente del trasferimento di quote tollerate e possono essere riportate senza definizioni di tolleranze oppure utilizzando tolleranze generiche riportate in basso a destra tra le informazioni del disegno. Una volta definiti i particolari da realizzare si procede alla **pianificazioni dei processi di produzione** ossia alla stesura del ciclo di lavorazione con la definizione dei diversi aspetti connessi alla realizzazione del prodotto (processi, macchine, utensili, parametri di lavorazione, strumenti di controllo, tempi e costo) e l'ottenimento dei così detti **fogli di lavorazione (ciclo e fasi)**. Vanno sviluppati i cicli di assemblaggio e i cicli di controllo, anche tale fase si avvale dell'utilizzo di **disegni di lavorazione** che comprendono **(1) disegni del grezzo** ottenuti dai disegni di definizione mediante aggiunta di sovrametalli, sforni e raccordi ed altri elementi dipendenti dalla tecnologia di ottenimento del grezzo. **(2) Disegni del modello** necessari per l'ottenimento del grezzo di partenza.

(3)Disegni di fabbricazione ottenuti dai disegni di definizione mediante modifica delle quote ausiliarie ed eventuale trasferimento delle quote funzionali. Infine **(4)disegni di attrezzature** utensile e strumenti di controllo **non standard**.

A valle della pianificazione dei processi di lavorazione è possibile effettuare **la programmazione della produzione** ossia definire gli aspetti inerenti la gestione temporale delle risorse. Dopo di ch  si procede con la **messa in produzione degli elementi** da realizzare. La fase produttiva comprende tutte le operazioni di lavorazione assemblaggio e controllo delle parti lavorate. Infine si ha **l'immissione del prodotto sul mercato** (semplice consegna della commessa, oppure messa a magazzino dei prodotti). Il ciclo di vita   chiuso dalle **fasi di assistenza post vendita** che consentono al prodotto di conservare la propria funzionalit  nell'arco della sua vita (manutenzione, ricambi , ecc.). Dall'altra forniscono all'azienda un feedback cio  un riscontro sul prodotto immesso sul mercato per lo sviluppo di nuovi prodotti. Anche le fasi di vendita e postvendita prevedono l'utilizzo di opportuni disegni detti **disegni di catalogo**, in cui sono contenute le informazioni necessarie all'uso alle manutenzioni e ai pezzi di ricambio relativi al prodotto commercializzato (diversi dagli altri disegni). Il punto di partenza per la stesura del ciclo di lavorazione   l'analisi dell'elaborazione delle informazioni codificate nei disegni di definizione. Tali informazioni sono oggetto di un'analisi critica finalizzata alla valutazione della possibilit  e dell'evenienza dell'ottenimento delle specifiche desiderate; in particolare qual ora fossero riscontrate condizioni non ottimali va valutata la possibilit  di eseguire modifiche oppure segnalare eventuali problemi all'ufficio progettazione. In condizioni ottimali si dovrebbero seguire i principi dell'ingegneria simultanea in base ai quali gli ingegneri di progettazione di produzione e di pianificazione dei processi dovrebbero operare in stretta sinergia. Limiti a tale modalit  operativa sono legati alla necessit  di formati standard per lo scambio di informazioni sia a problemi di comunicazione del personale (**ingegneria simultanea=buonsenso** tra i vari reparti del ciclo; progettazione Vs pianificazione). In particolare l'analisi critica dei disegni esamina le diverse caratteristiche geometriche e dimensionali del prodotto da realizzare tenendo conto del fatto che risultano praticamente impossibile ottenere una dimensione prescritta in termini assoluti.

Tolleranze dimensionali

Ogni lavorazione quindi parte con una serie di **errori** che possono avere carattere **sistematico o accidentale** tuttavia ai fini dell'accettabilit  di una determinata quota   sufficiente che la sua dimensione effettiva sia compresa tra un **Dmax** (dimensione massima) e una **Dmin** (dimensione



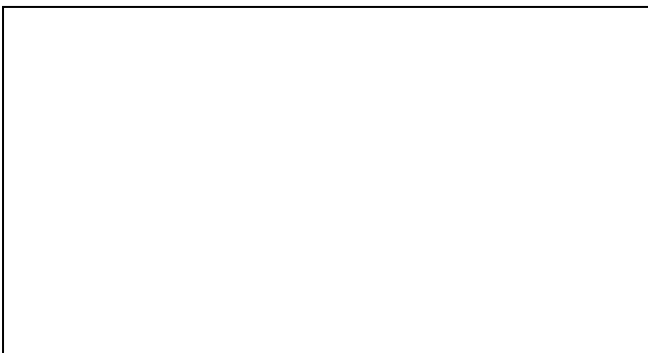
minima), in particolare la **Dn** (dimensione nominale) assume la quota indicata sui disegni di definizione o di fabbricazione individua la **linea zero**. La differenza tra Dmax e Dn definisce lo **scostamento superiore(Dmax-Dn=es)**; la differenza in valore assoluto e segno tra Dmin e Dn definisce lo **scostamento inferiore(Dmin-Dn=ei)**. Si definisce **tolleranza**

(t) la differenza tra Dmax e Dmin (**Dmax-Dmin=t**) Quindi la differenza tra scostamento superiore e

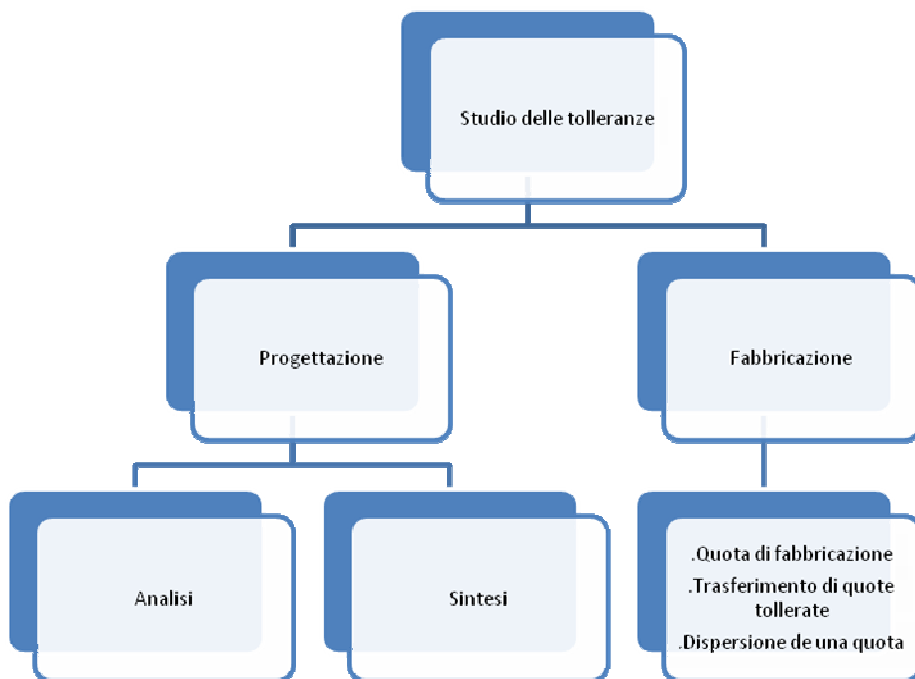
$$D \leq 500 \text{ mm} \quad i = 0.45(D)^{1/3} + 0.001D \quad D > 500 \text{ mm} \quad l = 0.004D + 2.1 \quad (\text{unità di misura micrometri})$$

vengono fissati **nella posizioni h scostamento fondamentale nullo**, dopo di chè è possibile ottenere qualsiasi accoppiamento variando la posizione dello scostamento fondamentale dell'elemento connesso. In base alla norme ISO le quote tollerate vanno prescritte indicando (Diametro nominale “Dn”, scostamento fondamentale; classe di tolleranza) (es. 25H8).

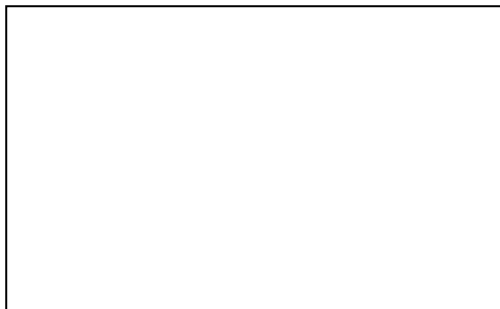
Al fini della funzionalità di un particolare meccanico vanno inoltre considerate eventuali tolleranze geometriche relative a forma e posizione degli elementi rappresentati dal disegno. La prescrizione delle tolleranze geometriche prevede la definizione della specifica tolleranza da rispettare tramite opportuna simbologia seguita da un valore numerico espresso in millimetri che indica l'intervallo della fascia di tolleranza ed eventuali superfici di riferimento. Applicazioni di relazione tra tolleranza dimensionali e geometriche ed eventuali note. Le norme Iso scrivono che ai fini dell'accettabilità di un particolare meccanico il principio **di indipendenza delle tolleranze** in base al quale tutte le prescrizioni sia dimensionali che geometriche devono essere rispettate in maniera indipendente dalle altre è tuttavia data facoltà al progettista di stabilire relazioni più o meno restrittive tra tol. geom. e dim. Tale prescrizione vanno riportate in seguito alla quota o le forme tollerate utilizzando una lettera cerchiata.



Studio delle tolleranze

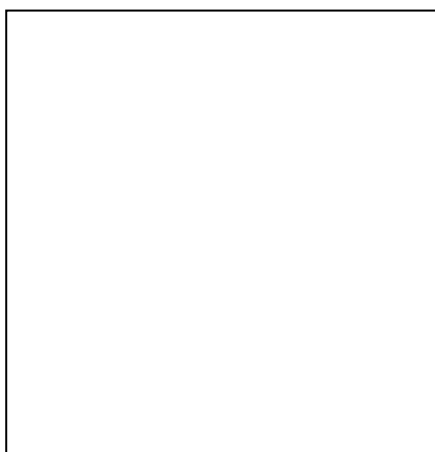


Lo studio delle tolleranze assume connotati diversi a seconda della specifica fase del ciclo di vita in esame. In particolare in fase di progettazione è importante definire o verificare le tolleranze



assegnate in modo tale da rispettare i requisiti funzionali. In fase di lavorazione è importante pianificare i processi in maniera tale che le tolleranze di lavorazione siano opportunamente comprese in quelle di definizione. Lo **studio delle tolleranze in fase progettuale** può essere eseguito secondo due modalità differenti: **analisi delle tolleranze** e **sintesi delle tolleranze**.

L'**analisi delle tolleranze** consiste nello studiare l'effetto di tolleranze già assegnate alle singole quote in relazione ai requisiti funzionali del progetto. La **sintesi delle tolleranze** segue il percorso inverso ossia mira a determinare le tolleranze delle singole quote a partire dai requisiti progettuali. In entrambi i casi è possibile procedere secondo due diversi approcci: **(1) worst case**, **(2) statistico**. L'approccio **(1) Worst Case** prende in esame il **caso peggiore** possibile partendo dal presupposto che la verifica del sistema nel caso suddetto implica il soddisfacimento del requisito funzionale in tutti gli altri casi. Vantaggi di tale approccio sono la completa intercambiabilità dei singoli elementi a fronte però di costi maggiori dovuti all'utilizzo di tolleranze più strette.



L'approccio **statistico** parte dalla considerazione che elementi differenti sono lavorati su macchine diverse o comunque in condizioni diverse e quindi le dimensioni in oggetto possono essere descritte secondo una **rappresentazione gaussiana(figura)** o normale centrata sul valore medio e di ampiezza t pari a 6 volte la deviazione standard ($t=6\sigma$). In tale

ipotesi il **99.73%** delle quote effettive risulterà compresa nella fascia suddetta di ampiezza **t**, in sostanza si accetta una piccola percentuale di **scarti 0.27%** dei campioni a fronte però di accettare tolleranze meno restrittive. L'analisi delle tolleranze eseguita secondo un approccio **Worst Case** assume che la tolleranza risultante di una catena di quote tollerate sia pari alla sommatoria delle

singole tolleranze degli elementi costituenti la catena $t_r = \sum_i t_i$. Nell'approccio **statistico** la catena di quote tollerate equivale ad una somma di distribuzioni statistiche $t_r = \sqrt{\sum_i t_i^2}$.

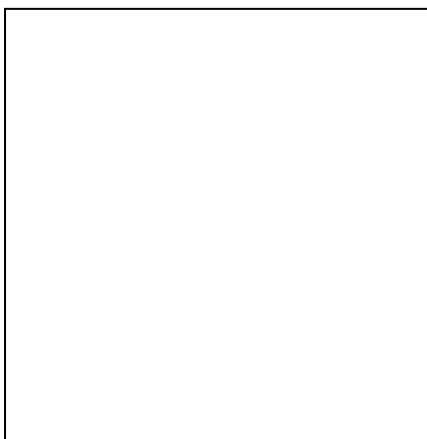
Nel caso di **sintesi di tolleranze** è possibile operare utilizzando entrambi gli approcci in base ai due diversi metodi: il metodo di uguale tolleranza assume che la tolleranza simultanea di una catena di quote tollerate si ripartisce equamente tra i diversi elementi costituenti la catena ossia

$t_i = \frac{t_r}{n}$ nel caso di approccio **worst case**; $t_i = \frac{t_r}{\sqrt{n}}$ nel caso di **approccio statistico**.

Il metodo di uguale tolleranza risulta tuttavia non adeguato in molti casi. In quanto non considera che i componenti d'acquisto hanno tolleranze assegnate ed inoltre trascura l'influenza della dimensione nominale sull'unità di tolleranza. Risultati migliori si possono ottenere adattando il metodo di **uguale precisione** in base al quale si assegna ad ogni elemento la stessa classe di tolleranza in base alla quale si ricavano le tolleranze per ogni singola quota da analizzare secondo di analisi.

Lo studio delle tolleranze in fase di lavorazione si basa su tre concetti fondamentali **(1) le quotature di fabbricazione, (2) La dispersione di una quota, (3) trasferimento di quote tollerate.**

La finalità di ogni singola lavorazione è comunque quella di rispettare la quotatura di definizione (da verificare in sede di collaudo). In particolare la quotatura di definizione è quella definita in fase progettuale affinché siano rispettati tutti i requisiti funzionali. La quota di fabbricazione invece è quella definita tra l'interferenza del tagliente o dei taglienti con il materiale in lavorazione assumendo le superfici di riferimento adottate nella specifica lavorazione (le superfici di riferimento sono definite opportunamente tramite battuta o contatto con le attrezzature di riferimento in maniera tale da identificare univocamente la posizione del pezzo nello spazio di lavoro). In prima approssimazione è conveniente avere una completa coincidenza tra quotature di definizione e quotature di fabbricazione il che implica l'opportuna scelta delle superfici e delle



attrezzature di riferimento. Nella figura la quota di definizione **A** coincide con la quota di fabbricazione assumendo **B** come superficie di riferimento e in base alla posizione dei taglienti periferici della fresa **C**. In maniera analoga la quota **E** è dovuta alla superficie di riferimento **D** e dalla posizione dei taglienti laterali sinistri della **fresa C**. In maniera analoga si riferisce la quota di fabbricazione **E**. La quota di fabbricazione va sempre verificata assumendo gli stessi riferimenti utilizzati per la lavorazione. Va considerata che ad ogni quota lavorata è

sempre associata una certa dispersione che può avere carattere sistematico o accidentale, in particolare nel primo caso la dispersione della quota segue una legge ben determinata (usura dell'utensile) nel secondo caso ricadono tutti gli eventuali problemi non previsti (vibrazioni, deformazioni elastiche, variazioni termiche, giochi nel sistema macchina pezzo e variazioni nel materiale).

Una **quota lavorata** con riferimento alla produzione di un numero elevato di pezzi a partire dallo stesso tagliente non assume un valore costante ma può essere assimilata ad una variabile statistica definita da un valore medio e da una certa deviazione standard (è un indice della dispersione dal valore medio). In particolare effettuando un certo numero di prove a partire dallo stesso tagliente e diagrammando il valore effettivo della quota lavorata in funzione del numero di pezzi lavorati è possibile evidenziare come le quote ottenute siano comprese in una fascia di dispersione definita tra due rette parallele **AB** e **CD** e caratterizzata da una retta media **EF** (come in



figura) la dove la distanza tra le rette AB e CD risulta pari a 6σ ed è indice della **dispersione accidentale** mentre l'andamento della **retta media** è indice della **deviazione sistematica** dovuta principalmente ai fenomeni d'usura. Al Contrario la dispersione accidentale è imprevedibile e imputabili a fenomeni quali vibrazioni, variazioni termiche, giochi, variazioni locali della resistenza del materiale in lavorazione sui quali influisce in maniera rilevante il valore della forza di taglio. Per questo motivo oltre ad avere considerazioni legate alla finitura superficiale si tende ad organizzare le diverse

lavorazioni nelle fasi di sgrossatura eventuale pre-finitura e finitura. Con riferimento all'immagine precedente è evidente che saranno accettabili i pezzi contenuti nella fascia di dispersione

compresi nel **campo di tolleranza t** della quota tollerata. Il rapporto $C_p = \frac{t}{6\sigma}$ definisce la **capacità di processo** ed è indice dell'idoneità del processo considerato ad effettuare la lavorazione in oggetto. In particolare nel caso in cui C_p abbia **valore unitario** risulta **accettabile nell'ipotesi di assenza di dispersione sistematica il 99,73%** dei pezzi lavorati (ciò non è vero perché l'utensile si usura). Il valore unitario della capacità di processo risulta quindi sconsigliato tuttavia è opportuno non ricorrere a processi di capacità troppo elevata in quanto sovradimensionati in relazione alle lavorazioni. Inoltre lavorando con macchine utensili CNC è possibile effettuare opportune **correzioni della posizione degli utensili** in modo da compensare effetti di usura indiretti e **controllare la dispersione sistematica**. Tale opportunità può essere realizzata mediante una definizione preliminare che permette alla macchina di **cambiare l'offset** ed evitare errori di quote dovute all'usura dell'utensile. Il **trasferimento di quote tollerate** è un operazione da effettuare ogni qual volta **non ci sia coincidenza** tra la **quotatura di definizione** e la **quotatura di fabbricazione** ossia qual'ora non sia possibile realizzare direttamente le quote tollerate in fase di progettazione o comunque risulti conveniente lavorare in altro modo. In Particolare si consideri la lavorazione di tornitura di uno spezzone di barra di



lunghezza **c** e sia dai **disegni di definizione** tollerata la quota **a**. In questo caso il modo più semplice per effettuare la lavorazione considerata consiste nel serrare il pezzo utilizzando eventuali **morsetti teneri** in corrispondenza delle **superfici 1 e 2** e quindi asportare il sovrametallo da



asportare in questo caso la **quota di definizione "a"** non sarà ottenuta direttamente ma sarà conseguenza della lavorazione della quota **b** riportata nei **disegni di fabbricazione**. Il trasferimento di quota tollerata consiste nel valutare la tolleranza ammissibile sulla quota **b** affinché sia rispettata la

tolleranza su **a**. Il trasferimento di quote tollerate è effettuato valutando dimensione massima e minima della quota da sostituire (quella di definizione) in funzione delle dimensioni delle altre quote costituenti la catena a,b,c. Nel caso specifico risulta $a_{max} = c_{max} - b_{min}$ analogamente $a_{min} = c_{min} - b_{max}$; combinando le due equazioni si ottiene:
 $(a_{max} - a_{min}) = (c_{max} - c_{min}) + (b_{max} - b_{min})$ ossia $t_a = t_c + t_b$. Da cui si ottiene che la tolleranza sulla quota sostituita **a** è pari alla somma delle tolleranze costituenti la catena. In definitiva risultante $t_b = t_a - t_c$. Ossia la tolleranza da assegnare alla quota di fabbricazione è pari alla differenza tra la tolleranza della quota sostituita e le tolleranze conservate. (Questa relazione $t_a = t_c + t_b$ non vale sempre esistono casi in cui (1) $t_a = t_c$ che implica tolleranza nulla alla quota **b** ma ciò è impossibile, oppure il caso in cui (2) $t_c > t_a$ in cui ottengo una tolleranza alla **quota b** negativa ma ciò non ha senso fisico. Si evince che la tolleranza su **b** è sempre minore di quella su **a**, dobbiamo inoltre ricontrollare le quote una volta finito l'operazione quindi è chiaro che dobbiamo **evitare di il trasferimento di quote tollerate**). È evidente che il trasferimento di quote tollerate risulta possibile solo nel caso in cui la **tolleranza sulla quota sostituita t_a** risulti **maggiore della tolleranza sulla quota conservata t_c** . In caso contrario si avrebbe una tolleranza negativa o al limite nulla il che è impossibile o fisicamente irrealizzabile. La procedura di trasferimento di quota risulta sconsigliata in quanto implica al ricorso di tolleranze di lavorazione più strette e quindi più costose ed inoltre inserisce nel ciclo di lavorazione le operazioni di controllo delle quote lavorate. Altro aspetto negativo è dovuto alla possibilità di scartare durante il controllo di lavorazione dei pezzi accettabile dal punto di vista funzionale.



Come è evidente diagrammando in un grafico avente la **quota "a" in ascissa** e la **quota "b" in ordinata**, su cui si riportano i limiti di accettabilità, l'area **ACDF** rappresenta tutti i pezzi che **rispettano le tolleranze di definizione**. Introducendo la tolleranza **b** l'area si riduce a **ABDE**. In particolare dal punto di vista funzionale risultano accettabili tutti i pezzi compresi nell'area **ACDF** tuttavia l'inserimento di un controllo sulla quota lavorata

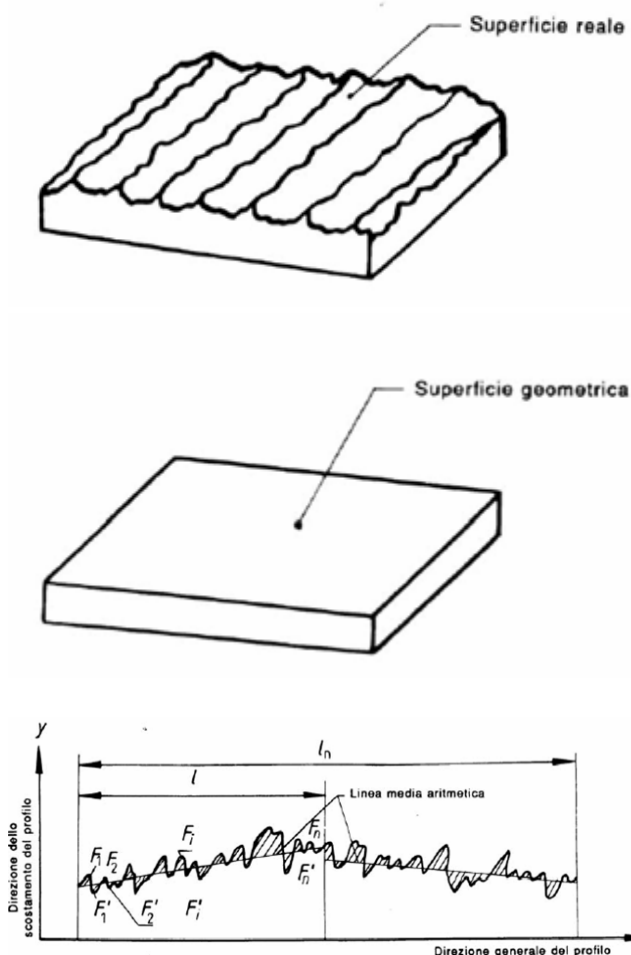
b porterebbe all'esclusione dei pezzi compresi nelle zone **AEF** e **BCD** anche se idonei dal punto di vista funzionale. Tale considerazioni vanno applicate rigorosamente nel caso di approccio **Worst Case**, lavorando secondo **criteri statistici** è possibile evitare il trasferimento di quota accettando però una certa quota di scarti. Nel caso in cui la **quota tollerata è uguale alla quota si fabbricazione** (a,c), posso eseguire la lavorazione tramite punta e contropunta oppure eseguendo prima una gola per ottenere la tolleranza a desiderata e poi invertendo il pezzo inserendolo questa volta in morsetti teneri.

Rugosità

Al fine del corretto funzionamento di un organo meccanico risultano rilevanti non solo le caratteristiche dimensionali e di forma ma anche le caratteristiche di **finitura superficiale**, definite praticamente dai **parametri di rugosità**. Elevati livelli di rugosità influiscono negativamente sulla resistenza ad usura a fatica e a corrosione di elementi meccanici, per cui in relazione a questi aspetti converrebbe ottenere superfici quanto più lisce possibili. L'usura delle asperità superficiali può comportare in alcuni casi anche l'uscita della dimensione considerata dal campo di tolleranza. Generalmente in fase di montaggio l'usura delle creste può arrivare anche a percentuali del 50% rispetto all'altezza iniziale. Tuttavia l'ottenimento di superfici di **bassissima rugosità** risulta comunque **costoso in relazione ai processi di lavorazione** ed in alcuni casi risulta sconveniente scendere al di sotto di determinati valori di rugosità (ad esempio negli incollaggi e in alcuni

accoppiamenti con interposizioni di fluido lubrificante). In relazione alle caratteristiche delle superfici bisogna definire diverse tipologie di errore risultanti in uno scostamento della **superficie reale** dalla **superficie ideale** in particolare si definisce superficie ideale quella rappresentata da disegni utilizzando le matematiche opportune. Si definisce **superficie**

reale la superficie effettivamente ottenuta dopo la lavorazione che si assume coincidente con la superficie misurata ossia quella rilevata dagli strumenti di misura. Inoltre si definisce **superficie di riferimento** la superficie ottenuta da quella reale mediante epurazione degli errore di forma e di ondulazione, oppure assunta in base ad un riferimento esterno. Infine si definisce **superficie media** la superficie di forma coincidente con quella di riferimento (o geometrica) e sovrapposta alla superficie reale secondo il criterio dei minimi quadrati ossia in maniera tale che i volumi sottesi al di

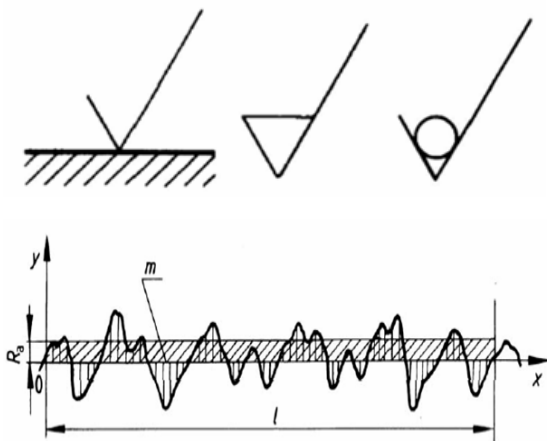


sopra della superficie media siano uguali ai volumi sottesi al di sotto della stessa. La finitura superficiale ha generalmente caratteristiche anisotrope e risulta di difficile valutazione per questo motivo si ricorre generalmente ad una **caratterizzazione bidimensionali** lungo direzioni prescritte da disegno in sostanza le superfici suddette sono sezionate utilizzando opportuni **piani di rilievo** ottenendo di conseguenza i **profili ideale, reale**, misurato, di riferimento e **medio**. Le superfici lavorate possono essere inoltre caratterizzate da un **orientamento definito dalla direzione dei solchi** prevalenti ed eventualmente da un **passo definito come distanza tra due creste successive**. (l'avanzamento durante un processo di lavorazione ad esempio tornitura determina un verso prevalente della rugosità). **Lo scostamento della superficie reale da quella ideale** è imputabile a due tipologie di errore **1 macrogeometrici** e **2 micro geometrici**. Gli **errori macrogeometrici** sono definiti dagli **errori di forma** e devono essere contenuti nelle tolleranze geometriche relative, tali errori sono dovuti principalmente ad imperfezioni delle guide della macchina o ad un non corretto posizionamento del pezzo sulla macchina stessa. Gli **errori micro geometrici** possono essere suddivisi in **errori di rugosità o tessitura primaria** (influenzata principalmente dall'avanzamento) e in **errori di ondulazione o tessitura secondaria** (imputabile principalmente all'effetto delle

vibrazioni). La differenza sostanziale tra i tre errori è data dal rapporto $\frac{P}{H}$ tra il **passo** e l'**ampiezza dell'errore** tale rapporto assume valori superiori a 1000 nel caso di errori di forma compreso, tra 50 e 1000 per gli errori di ondulazione, valori minori per la rugosità il cui passo è generalmente confrontabile con l'avanzamento. Le caratteristiche di finitura superficiale di una determinata superficie possono essere caratterizzate in maniera esaustiva utilizzando un numero molto elevato di parametri sulla cui validità non si è ancora raggiunta una standardizzazione da un punto di vista

normativo per questo motivo si ricorre generalmente alla valutazione di un numero limitato di parametri tra cui il fondamentale è la **rugosità media aritmetica R_a** . Qualora necessario va riportato sui disegni di definizione utilizzando un opportuna **simbologia**. La

definizione dei parametri di rugosità consiste sostanzialmente in un'elaborazione statistica del profilo in cui si assume come variabile il valore dell'ordinata reale rispetto a quella di riferimento in particolare si definisce **rugosità media aritmetica** il valor medio degli scostamenti tra i due profili



$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx$, la dove **L** rappresenta la **lunghezza di misura**. Si definisce rugosità quadratica media lo **scarto quadratico medio** (deviazione standard) degli scostamenti dai due profili

$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx}$. Ancora si definisce rugosità totale **R_t** la **distanza tra la cresta più alta e la valle più profonda** ossia la massima distanza picco valle, è inoltre possibile definire il **valore medio della massima distanza picco valle** che assume scrittura variabile a seconda della normativa di riferimento in particolare le norme ISO definiscono tale parametro come la somma degli

scostamenti relativi alle **5 creste più alte e delle 5 valli più profonde** diviso 5

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5}$$

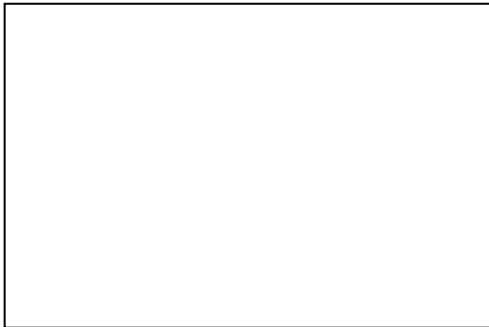
In relazione alle norme DIN tale valore si ottiene come valor medio della rugosità totale relativa ad ogni lunghezza di taglio ($L=5 \lambda$). Una definizione più completa del profilo prevede la stima mediante **elaborazione statistica** di ulteriori parametri quali la curva di densità delle ordinate la **curva di Abbott** così come parametri di asimmetria e di obliquità. Il valore di rugosità può essere ricavato sperimentalmente mediante rilievo del profilo che può essere effettuato con strumenti a contatto che prevedono l'utilizzo di un **tastatore** oppure con strumenti non a contatto di tipo ottico (scansione laser). Lo strumento a contatto più utilizzato è il **rugosi metro**. Il **rugosimetro** è costituito da uno **stilo** alla cui estremità sono posti un **tastatore** di forma conica o piramidale con raggio di raccordo in punta pari a 2,5 micrometri in diamante ed un pattino di raggio maggiore generalmente pari a 25 mm. La funzione del **pattino** è quella di scorrere sulla superficie in analisi in modo tale da ottenere il profilo di riferimento mentre il **tastatore** esamina le creste e le valli del profilo. Lo **stilo è mosso da un'unità motorizzata** (U.M) per una lunghezza complessiva data da tre tratti ossia una corsa di ingresso L_i una corsa di uscita L_u e una corsa di misura L pari a 5 volte la lunghezza d'onda di base λ . La definizione della lunghezza d'onda è rilevante in quando **lunghezze di misure eccessive** non consentono di separare gli errori di rugosità agli errori di forma e ondulazione, allo stesso modo lunghezze di **misura troppo ridotte** rendono l'analisi troppo sensibili alle singolarità. La lunghezza d'onda di base viene definita in relazione al processo di lavorazione e al valore atteso di rugosità le norme ISO

prevedono sei diversi valori per λ 0,08 0,8 e 8 0,25 2,5 e 25 (mm).

Il valore della lunghezza d'onda di base va definito in base al valore atteso di rugosità ed eventualmente corretto. Il **valore di λ** è utilizzato dal rugosi metro non solo per stabilire la lunghezza di misura ma anche per **regolare in sistema di filtraggio**, infatti

lo spostamento verticale del tastatore risulta in un segnale elettrico in tensione che viene opportunamente amplificato convertito da analogico a digitale (campionatura del segnale), e infine sottoposto ad opportuno filtraggio utilizzato per ricavare il profilo di riferimento ed evitare di conteggiare errori di ondulazione. Sono utilizzati **due sistemi di filtraggio: 2RC** (a resistenza e condensatore) **o Gaussiano**. Il **filtro 2 RC è un filtro passa alto** (solo segnali che superano un certo valore) **che taglia i segnali di ondulazione caratterizzati da bassa frequenza**. Il **filtro Gaussiano** invece sostituisce ad ogni punto acquisito un punto la cui ordinata è determinata dalla media pesata delle ordinate dei punti circostanti la dove il peso è definito da una funzione Gaussiana, in questo modo il filtro consente di ottenere direttamente il profilo di riferimento eventualmente coincidente con quello fornito dal pattino. Tutti i **segnali filtrati sono inviati all'unità di governo** che effettua il calcolo degli indici e manda in stampa i profili ottenuti. (la frequenza di taglio si sceglie in base a λ). Oltre alla misura sperimentale è tuttavia possibile in fase di pianificazione

del ciclo di lavorazione ottenere una stima teorica dei valori di rugosità, in particolare i modelli considerati esprimono i **valori di rugosità in funzione dell'avanzamento** considerando trascurabili gli altri contributi restituendo tuttavia una stima abbastanza attendibile per elevati valori delle velocità di taglio. Il calcolo teorico della rugosità può essere effettuato mediante semplici considerazioni geometriche, in particolare si distinguono due diversi casi **(caso 1) utensile non raccordato ;(caso 2) utensile raccordato** con raggio di raccordo “r” tra i taglienti . Con riferimento alla lavorazione per tornitura cilindrica esterna a cui tuttavia si possono riportare numerose altre



lavorazioni (fresatura frontale, limatura , piallatura ecc.) Nel **caso 1** è evidente come il profilo reale abbia forma triangolare con periodicità data dall'avanzamento. E' immediato verificare che la rugosità totale è data dall'altezza dei diversi triangoli ossia dal segmento **BD** può essere facilmente ricavata in funzione degli angoli di appostamento principale e secondario. In particolare nel



triangolo **ABC** risulta (**BD=ADtgX;** **BD=DCtgX'**) . Invertendo le relazioni otteniamo (**AD=BDcotgX';DC=BDcotgX'**); da cui sommando membro a membro risulta (**AD+DC)=BD(cotgX+cotgX')** in cui **AD+DC** è l'avanzamento, **BD** è la rugosità totale **$R_t=BD$** sostituendo ottengo:

$$R_t = \frac{a}{\cotg X + \cotg X'} \text{ (micrometri).}$$

Il calcolo teorico delle **rugosità media aritmetica** nel caso considerato può essere effettuato esprimendo **Ra**(rugosità media aritmetica) come rapporto **tra l'area sottesa tra il profilo reale e il profilo medio e la lunghezza di**



misura $R_a = \frac{A_{tot}}{L}$ dopo aver definito la posizione del profilo medio .È immediata la verifica che il profilo medio taglia esattamente a metà il profilo reale ossia ad una distanza dalle creste o dalle valli pari a **$R_t/2$** . La verifica può essere effettuata constatando l'uguaglianza dei triangoli **FGL** e **GHI** essendo che gli

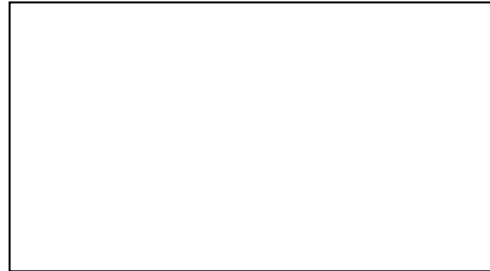
angoli in G uguali perché opposti al vertice e il lati **FL** e **HI uguale a $R_t/2$** per costruzione. Per motivi analoghi risultano uguali i triangoli **CDE** ed **EFL**. Considerando la periodicità del profilo è

possibile semplificare il calcolo considerando l'area sottesa in un unico passo e rapportando il

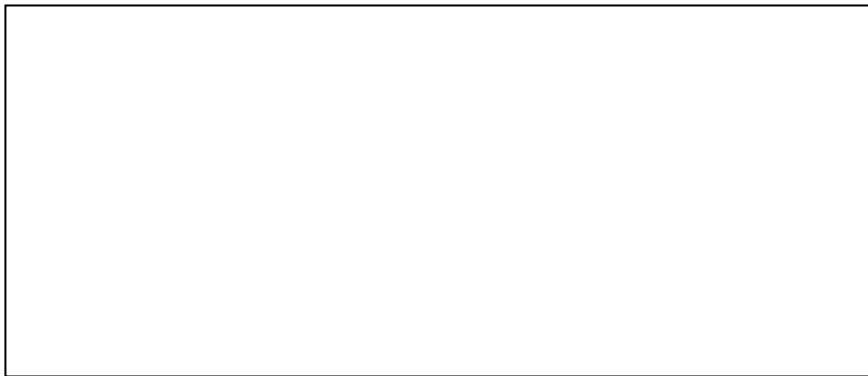
valore al valore del passo stesso ossia all'avanzamento $R_a = \frac{A_{tot}}{L} = \frac{Aa}{a} = \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot R_t = \frac{R_t}{4}$

Nel caso di **utensile raccordato con raggio di raccordo**

"r" una schematizzazione rigorosa prevede la considerazione dei diversi tratti dei taglienti dell'utensile non che la loro sovrapposizione per la determinazione del profilo reale. Un metodo più semplice che conduce allo stesso risultato consiste nell'assimilare il **profilo dell'utensile** ad un **segmento**



di parabola utilizzando questa schematizzazione il profilo reale sarà dato da tratti di parabola sfalsati di un tratto pari all'avanzamento **"a"**. È immediato constatare che il valore di rugosità



totale è definito assumendo un sistema di riferimento con **asse x** coincidente con il profilo ideale e **asse y** ortogonale ed uscente dal pezzo dall'ordinata del punto di intersezione tra due tratti contigui di parabola ossia ad una coordinata **x** pari a $\frac{a}{2}$

dall'origine. Nelle condizioni suddette l'equazione della parabola generica può essere scritta $y = Kx^2$ la dove la costante **k** si ricava dalla condizione di curvatura pari al raggio di raccordo **"r"**

nell'origine. Di conseguenza l'equazione **risulta** $\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} = \frac{1}{r}$; $2K = \frac{1}{r}$; $K = \frac{1}{2r}$; $y = \frac{x^2}{2r}$ e quindi $R_t = y \cdot \frac{a}{2} = \frac{a^2}{8r} \cdot 1000$ (micrometri).

Il valore di rugosità media aritmetica può essere considerato in prima approssimazione in accordo

con la relazione già trovata precedentemente ossia $R_a = \frac{R_t}{4} = \frac{a^2}{32r} \cdot 1000$ (*micrometri*). **Valori di r** da utilizzare sono preferibilmente **0,8mm e 1,2mm** da evitare i valori 0,4mm e 1,6mm(per problemi legati alla vibrazione).

Pianificazione del processo

Si definisce ciclo di lavorazione la sequenza ordinata delle operazioni da eseguire per trasformare un pezzo grezzo in un prodotto finito. La stesura del ciclo di lavorazione prende il nome di pianificazione del processo e può essere effettuata secondo **due diversi approcci: manuale ed automatico (CAPP)**. Allo stato attuale tuttavia la pianificazione automatica risulta praticabile solo in alcune situazioni a causa della difficoltà di codificare la conoscenza dell'analista in un linguaggio comprensibile all'elaboratore ed alla difficoltà di gestione dei supporti elettronici (la forma delle superfici è definita nelle rappresentazioni 3D, tuttavia tutte le prescrizioni sono contenute nelle tavole bidimensionali). Per questo motivo è parimenti diffusa la pianificazione manuale affidata ovviamente alla conoscenza ed all'esperienza dell'analista di produzione.

La **stesura ottimale del ciclo di lavorazione** rappresenta un fattore di importanza fondamentale per la competitività di un'azienda a causa del **notevole impatto su tempi, costi e qualità di produzione**. La pianificazione parte dall'analisi dei disegni di definizione e delle eventuali modifiche prevedendo quindi:

la definizione di processi e macchine;

posizionamenti del pezzo in macchina;

single lavorazioni (operazioni elementari);

utensili e parametri di taglio;

attrezzature standard o speciali;

strumenti e procedure di controllo;

stesura dei part-programm, nel caso di lavorazioni con macchine utensili a controllo numerico.

La pianificazione potrebbe portare inoltre allo sviluppo di diversi possibili cicli da selezionare mediante la valutazione di tempi e costi; è inoltre una procedura di carattere ricorsivo, essendo spesso necessario modificare una serie di scelte a causa di valutazioni successive.

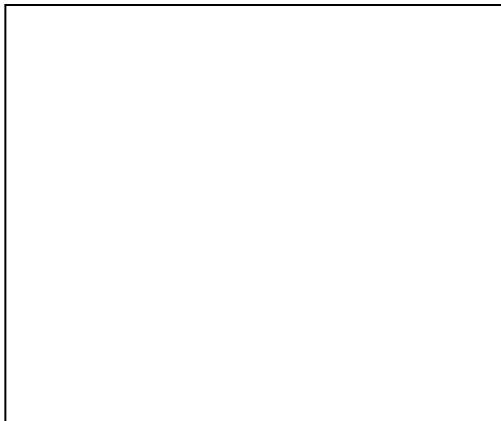
- Punto di partenza per la stesura del ciclo di lavorazione è l'analisi critica dei disegni di definizione e delle informazioni contenute nei disegni, oppure relative ad aspetti produttivi o impiantistici. L'analisi dei disegni è finalizzata ad evidenziare condizioni sfavorevoli eventualmente oggetto di modifica; in sostanza si verifica la rispondenza dei disegni ai principi del Design for Manufactory (progettazione per la lavorazione), in base ai quali la progettazione di un generico elemento dovrebbe essere eseguita semplificando quanto più possibile la fase realizzativa, ossia evitando forme e dimensioni sconvenienti e sollecitazioni eccessive sull'utensile e sul pezzo (evitare forature su superfici inclinate, fresature su spessori piccoli, spigoli vivi, eccessivi

posizionamenti del pezzo, fori ciechi a fondo piano, prevedere zone di scarico per l'utensile)→*vedi slide 4.*

- Vanno inoltre considerate una serie di informazioni che influenzano la scelta di processi, macchine, utensili e attrezzature, nonché sequenza delle operazioni e parametri di lavoro; tali informazioni sono relative alle dimensioni del pezzo, alle tolleranze imposte, ai valori ammessi di finitura superficiale, al materiale del pezzo, allo stato della superficie grezza, alla presenza eventuale di trattamenti termici, saldature o altre connessioni (tutte informazioni contenute nei disegni di definizione). Sono inoltre rilevanti le informazioni relative alla disponibilità ed alla disposizione dei macchinari, alla professionalità degli operatori, alla dimensione del lotto e al regime produttivo (economico o di massima produttività).
- In base ai disegni ed alle informazioni analizzate si procede alla definizione di fasi, sottofasi ed operazioni elementari relative alle superfici da analizzare (vedi slide 8):

1. in particolare si definisce **fase** l'insieme delle operazioni eseguite sullo stesso posto di lavoro a prescindere dal posizionamento e riposizionamento del pezzo (fase di tornitura, di fresatura, di controllo ecc.);
2. si definisce **sottofase** l'insieme delle operazioni eseguite sullo stesso posto di lavoro e con lo stesso posizionamento del pezzo (esempio una foratura con due posizionamenti);
3. infine si definisce **operazione elementare** la singola lavorazione finalizzata alla realizzazione di una determinata superficie (centratura, foratura, allargatura, svasatura sono tutte operazioni elementare della sottofase, e fase, di foratura).

- La pianificazione manuale del ciclo di lavorazione può essere effettuata **a partire dalla definizione delle diverse superfici da lavorare, assegnando ad ogni superficie un numero progressivo, definendo le caratteristiche geometriche delle superfici ed infine ipotizzando eventuali processi di lavorazione** → *vedi slide 10*.



Una volta schematizzate le diverse superfici ed ipotizzati i processi, si procede alla definizione di fasi e sottofasi in maniera tale da minimizzare gli spostamenti del pezzo tra i diversi posti di lavoro ed effettuare il maggior numero di lavorazioni utilizzando lo stesso posizionamento: la

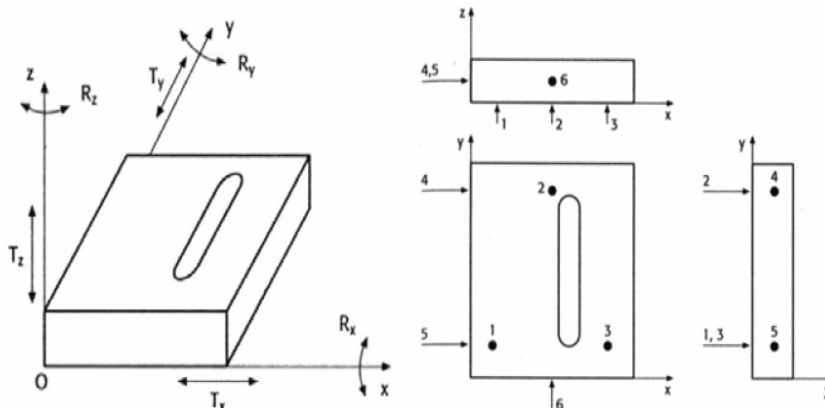
riduzione delle movimentazioni comporta **vantaggi legati alla riduzione dei tempi di lavorazione ed all'aumento della precisione**. In particolare la decisione relativa alle superfici da lavorare utilizzando lo stesso posizionamento è fortemente condizionata da eventuali prescrizioni geometriche. In linea di principio due superfici legate da tolleranze geometriche dovrebbero essere lavorate senza spostare il pezzo; qualora ciò non fosse possibile, si può comunque ottenere maggiore precisione utilizzando attrezzature idonee. Una volta raggruppate le diverse superfici nelle singole sottofasi, **si procede con la definizione della**

tipologia di operazione elementare da utilizzare per ogni superficie ed alla sequenza delle operazioni stesse; tale definizione può comportare eventualmente anche ad una ridefinizione di fasi e sottofasi.

La definizione della sequenza delle operazioni può essere effettuata sulla base di diverse considerazioni ed in primo luogo rispettando semplici regole di ovvietà (ad esempio la lavorazione dei fori è organizzata in una sequenza ben definita che prevede centratura, foratura, una o più allargature ed eventuali lavorazioni aggiuntive, così come la realizzazione di una cava a T prevede innanzitutto la fresatura della gola e quindi il completamento della lavorazione). La sequenza delle operazioni è condizionata inoltre da aspetti economici, tecnologici e dimensionali: in particolare le lavorazioni dovrebbero essere organizzate in maniera tale da ridurre i tempi di ciclo garantendo il rispetto delle diverse prescrizioni, da ridurre tempi e costi legati alle modalità di asportazione e di usura dell'utensile, ed infine da realizzare tutte le lavorazioni con quote in tolleranza. Andrebbero inoltre evitate condizioni di taglio svantaggiose (vedi slide 11).

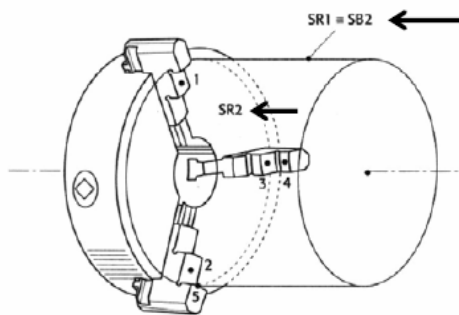
- Una volta definite fasi, sottofasi ed operazioni elementari, **si procede alla scelta ed eventualmente alla progettazione e realizzazione delle diverse attrezzature;** queste assolvono a tre diverse funzioni:
 1. riferimento del pezzo,
 2. bloccaggio del pezzo
 3. appoggio con riduzione delle deformazioni.

Le attrezzature possono essere classificate in attrezzature standard, ossia normalmente a corredo delle singole macchine utensili ed in attrezzature speciali progettate e realizzate ad hoc. In linea di principio **la scelta ove possibile dovrebbe sempre ricadere su attrezzature standard** (ad esempio punta e contropunta, piastraforma autocentrante, piastraforma a griffe indipendenti, brida e menabrida, denti trascinatori, cunette aperte e chiuse per lavorazioni di tornitura; morse, morsetti, blocchetti a V per lavorazioni di fresatura ecc. --> (vedi slides 14-15-16). **L'utilizzo di attrezzature speciali resta giustificato solo qualora comporti una netta riduzione dei tempi di posizionamento e quindi di lavorazione**, oppure qualora sia necessaria una maggiore precisione. È infine possibile ricorrere ad **attrezzature modulari** che consentono il riferimento ed il bloccaggio di pezzi differenti e sono caratterizzati da interfacce standard con la tavola portapezzo, per cui rendono possibile il montaggio del pezzo in ombra alla lavorazione del pezzo precedente. La funzione di ogni singola attrezzatura viene assolta mediante contatto o battuta con una o più superfici del pezzo; esse sono quindi definite **superfici di riferimento, superfici di bloccaggio, superfici di appoggio**; si definiscono inoltre **superfici di partenza** quelle del grezzo, utilizzate come riferimento per le prime lavorazioni. Generalmente è il fornitore del grezzo a creare delle opportune superfici di riferimento, e qualora ciò non fosse previsto, la prima operazione da prevedere in fase di stesura del ciclo è finalizzata all'ottenimento di superfici idonee. È inoltre opportuno che esse non presentino irregolarità o difetti di rilievo, ed è inoltre possibile prevedere sul pezzo elementi di riferimento aggiuntivi.



- Il riferimento del pezzo, ossia **l'individuazione delle superfici di riferimento** e la scelta delle attrezzature, **può essere effettuato**

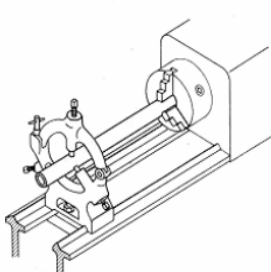
in base al principio del posizionamento isostatico o principio dei 6 punti. Tale principio si basa sulla considerazione che la posizione di un corpo nello spazio è univocamente descritta dai suoi 6 gradi di libertà (3 traslazioni e 3 rotazioni), di conseguenza per riferire il pezzo è sufficiente individuare 6 punti di battuta, ossia uno per ogni grado di libertà. Ovviamente **tali punti devono essere individuati in maniera tale che la loro posizione sia indipendente dalle altre:** nel caso di lavorazione di elementi prismatici, l'individuazione dei 6 punti può essere effettuata posizionandone 3 sulla superficie piana di base (assunta come piano xy), in modo tale da riferire la traslazione lungo z e le due rotazioni rispetto ad x ed y; altri 2 punti possono essere individuati su una delle superfici laterali, riferendo la rotazione rispetto a z ed una traslazione nel piano; infine il 6° punto può essere collocato su un'altra superficie laterale non parallela a quella precedente.



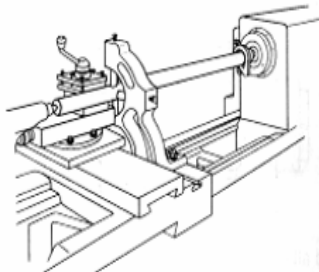
Nel caso di tornitura il riferimento più semplice può essere effettuato utilizzando la piattaforma autocentrante in modo tale da individuare 5 punti indipendenti: il 6° grado di libertà, ossia la rotazione intorno a z, non va riferito per ovvie ragioni; dei 5 punti suddetti, 3 sono materializzati dalla battuta della superficie piana del pezzo con le tre griffe, riferendo la traslazione su z e le rotazioni rispetto ad x ed y; infine gli ultimi 2 punti si ottengono dal contatto delle griffe con la superficie cilindrica esterna del pezzo, riferendo le

traslazioni lungo x ed y. La piattaforma autocentrante assolve anche alla funzione di bloccaggio del pezzo.

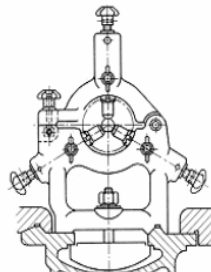
- In linea di principio le attrezzature di bloccaggio vanno scelte o progettate in maniera tale che esercitino una forza sul pezzo che impedisca l'allontanamento dalle attrezzature di riferimento. **Non è escluso che attrezzature e superfici di riferimento e di bloccaggio, così come di appoggio, coincidano.**
- La funzione delle attrezzature di appoggio è quella di scaricare le forze dovute al taglio riducendo la deformazione del pezzo: tipico esempio di attrezzatura di appoggio in operazioni di tornitura è la lunetta, che può essere di tipo aperto oppure chiuso,



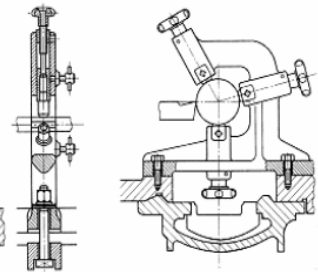
Lunetta
fissa



Lunetta
mobile



Lunetta di
tipo chiuso



Lunetta di
tipo aperto

e può inoltre lavorare in posizione fissa oppure solidale al carro; in particolare nel caso di lavorazione di travi snelle. La scelta delle attrezzature in relazione al riferimento va inoltre

fatta considerando le superfici di riferimento e quotatura: nel caso delle attrezzature di bloccaggio e di appoggio bisogna considerare l'analisi delle forze e delle deformazioni; in sostanza la validità di una specifica attrezzatura può essere verificata in relazione alle forze ed alle deformazioni conseguenti generate dall'asportazione secondo i parametri di taglio ipotizzati e nel rispetto delle tolleranze prescritte.

Mat. pezzo	Operazione	Mat. inserto
Acciaio al carbonio non legato	Superfinitura	P01-P10
	Finitura	P10-P20
	Sgrossatura leggera	P20-P30
	Sgrossatura	P30-P40
	Sgrossatura pesante	P40-P50
Acciaio inossidabile austenitico	Superfinitura	M10-M20

Ghisa malleabile perlitica	Superfinitura	K01-K10

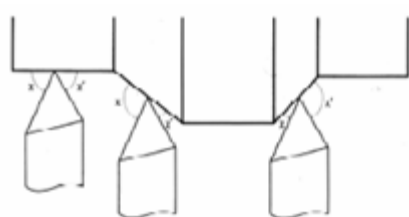
- La **scelta degli utensili** prevede la definizione della geometria del taglio, del materiale dell'utensile, nonché del portautensile da utilizzare; anche in questo caso è possibile utilizzare utensili standard o utensili speciali i cui disegni vanno allegati ai fogli di lavorazione. Nel caso di utensili standard, le caratteristiche di utensile e porta-utensile vanno codificate in base a quanto previsto dalle norme ISO e tale codice va riportato nei

fogli di fase. Il materiale dell'utensile va scelto in base al materiale in lavorazione, alla tecnologia di ottenimento del grezzo (allo stato della superficie da lavorare) ed in base alla tipologia di asportazione (sgrossatura pesante, normale, leggera o finitura). Tali indicazioni sono generalmente date dal fornitore di utensili, o comunque ben dettagliate nei cataloghi di utensileria (*vedi slide*).

La definizione della geometria di taglio prevede le caratteristiche geometriche dell'utensile, ossia forma, lunghezza e spessore, angolo di apertura tra i taglienti, raggio di raccordo, angoli di taglio e geometria del petto. La scelta dell'utensile risulta particolarmente critica nel caso di lavorazioni di tornitura; in altre lavorazioni tale scelta è semplificata, essendo le scelte condizionate in maniera sostanziale dalle dimensioni del pezzo e dal materiale in lavorazione. In tornitura una prima definizione della tipologia di utensile, ossia della forma dell'inserto, può essere effettuata in relazione al tipo di lavorazione (*vedi slide 19*). In dettaglio, in operazioni di sgrossatura, tale scelta può essere effettuata in base al **criterio di massima robustezza dell'utensile**, secondo cui bisognerebbe definire l'angolo di apertura

tra i taglienti come il massimo possibile, tenendo conto degli angoli standard utilizzati. Il massimo angolo di apertura **può essere ricavato in maniera semplice in relazione al profilo da realizzare durante l'operazione considerata e incrementando tale profilo di almeno 3° in corrispondenza della registrazione principale e secondaria**.

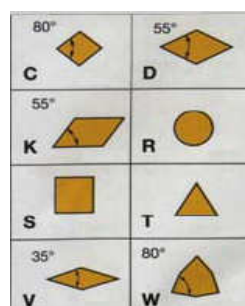
Una volta stabilito il massimo angolo di apertura viene scelta la **forma dell'inserto**: le norme ISO prevedono diverse forme standardizzate identificate da precise lettere, ossia **quadrata (S), romboidale con angolo di (C-D-V), rotonda (R), triangolare (T), losanga (K)**: ad ogni forma corrisponde numero di taglienti utilizzabili.



$$\chi \geq 3^\circ$$

$$\chi' \geq 3^\circ$$

apertura 80°-55° e 35° **trigonale (W)**, oppure a ovviamente un certo



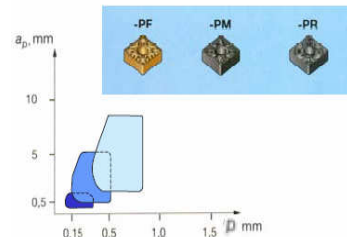
La **lunghezza** del

tagliente e lo spessore dell'inserto sono

scelte in relazione alla massima profondità di passata prevista, tenendo conto che maggiori dimensioni implicano costi maggiori. Generalmente basta definire la lunghezza, essendo lo spessore ad essa proporzionale.

La scelta del **raggio di raccordo** può essere effettuata in relazione ai valori di rugosità prescritti ed in fase di sgrossatura in maniera tale da evitare instabilità di lavorazione. Gli angoli di taglio sono condizionati dalla tipologia di materiale dell'inserto e dal materiale in lavorazione.

Infine la scelta della **geometria del petto** è fortemente condizionata da aspetti legati al controllo del truciolo, ossia deve essere tale da frammentare continuamente il truciolo prodotto: per tale scelta ci si può affidare ai diagrammi di stabilità forniti dal costruttore utensili, su cui sono evidenziate le zone di buona lavorazione.

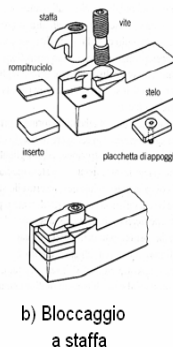


- La scelta del portautensile va effettuata in maniera tale da garantire l'accessibilità a tutte le superfici da lavorare, evitando eccessive deformazioni dello stelo ed impartendo gli angoli di registrazione desiderati. Inoltre si deve prevedere l'opportuna definizione del sistema di bloccaggio dell'inserto; tale bloccaggio era inizialmente eseguito mediante saldobrasatura, con l'inconveniente però di tempi eccessivi di sostituzione utensile; ora si agisce facilitando la sostituzione dell'inserto ed evitando sollecitazioni eccessive all'inserto stesso. Nella pratica si ricorre a 4 sistemi di bloccaggio:

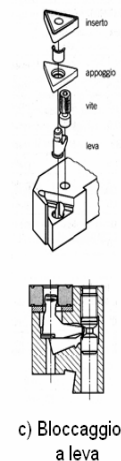
1. Il **bloccaggio a vite** prevede l'utilizzo di un inserto forato con conseguente riduzione della sua sezione resistente; tale sistema risulta inoltre svantaggioso in quanto la sollecitazione di compressione indotta dalla vite si somma alla sollecitazione dovuta al taglio. In compenso tale sistema consente rapide sostituzioni.



2. Il **bloccaggio a staffa** consente di utilizzare inserti pieni; tuttavia anche in questo caso si scarica sull'utensile una sollecitazione di compressione.



3. Il **bloccaggio a leva** è anch'esso basato sull'inserto di tipo forato: all'interno del foro agisce un'apposita leva che ferma l'utensile in posizione. Rispetto al bloccaggio a vite si evita la sollecitazione di compressione concorde con quella indotta dal taglio.



4. Infine il **bloccaggio con scanalatura prismatica** prevede l'utilizzo di un'opportuna interfaccia tra portautensile ed inserto e consente sostituzioni molto rapide a fronte però di un costo addizionale dell'utensileria.



- Una volta definiti utensili ed attrezzature si procede alla corretta **definizione dei parametri di taglio**: per questa fase non è escluso che sia necessario rivedere delle

scelte già effettuate. La scelta dei parametri di taglio, in relazione alla procedura da seguire, è fortemente condizionata dalla numerosità del lotto e dal regime produttivo. In particolare nel caso di piccole produzioni o lavori di attrezzeria conviene rifarsi alle indicazioni del fornitore utensili o ai dati contenuti nei manuali. Nel caso di produzioni di grossa serie realizzate su linee dedicate (sistemi flow-shop) può essere rilevante procedere ad una definizione ottimizzata dei parametri di taglio. Tale definizione in particolare è eseguita dando i parametri nel seguente ordine: profondità di passata, quindi avanzamento ed infine velocità di taglio. L'ottimizzazione può essere eseguita in relazione alle singole variabili decisionali e ad uno specifico criterio definito dal regime produttivo (generalmente di massima economia o di massima produttività).

- A valle della scelta eventualmente ottimizzata dei parametri di taglio, vanno **definite le procedure e gli strumenti di controllo** in relazione alle quote funzionali ed alla quotatura di fabbricazione; anche in questo caso è possibile ricorrere a strumenti standard come calibri e comparatori o strumenti speciali progettati ad hoc ed i cui disegni vanno allegati ai fogli di lavorazione. Un'ulteriore possibilità è data dall'utilizzo di macchine di misura a controllo numerico, ossia macchine di misura coordinate, in cui i rilievi dimensionali e di forma sono effettuati mediante acquisizione a contatto o non a contatto delle coordinate del pezzo.

Tempi e costi di lavorazione

- La valutazione di un determinato ciclo di lavorazione si basa sulla stima di tempi e costi di lavorazione: in particolare i tempi di lavorazione possono essere suddivisi in:
 1. **tempi attivi**, durante i quali si ha un movimento controllato dell'utensile in relazione ai parametri di taglio definiti ed effettiva asportazione di truciolo e sono stimabili in maniera diretta in relazione alle lunghezze di lavorazione ed alla velocità di avanzamento, ossia

$$t_l = \frac{L}{v_a}$$
 2. **tempi passivi** in cui non si ha asportazione di truciolo, ossia montaggio e smontaggio del pezzo, movimenti dell'utensile in rapido (appostamento ed allontanamento), sostituzione utensile.
 3. **tempi di preparazione**, che considerano tutte le aliquote di preparazione relative al passaggio della macchina ed anche all'interpretazione dei fogli di lavorazione da parte dell'operatore.

Auxiliari - Attrezzi	Azione	Tempo standard (min)
Piattaforma autocentrante	Montare	0,6
	Smontare	0,6
	Regolare apertura	0,1
Piattaforma a 4 morsetti indipendenti	Montare	2,1
	Smontare	2,1
	Regolare 1 morsetto	0,3
Piattaforma a «plateau»	Montare	0,9
	Smontare	0,9
	Montare 1 staffa + 1 bullone	0,9
	Montare contrappeso	1,1
Menabrida	Montare	0,4
	Smontare	0,4
Contropunta-Punta	Montare nel mandrino	0,5
	Montare sulla controtesta	0,4
Lunetta fissa	Montare	0,5
	Smontare	0,5
	Regolare	1,2
Lunetta mobile	Montare	0,6
	Smontare	0,6
	Regolare	0,9

Il calcolo dei tempi passivi e dei tempi di preparazione può essere effettuato in due diversi modi:

1. **Rilevamento diretto** (cronometrando le singole operazioni);
2. Utilizzando le **tecniche di misura di tempi e metodi** (in sostanza ogni operazione viene scomposta in una serie di operazioni elementari di durata nota e tabellata: la somma delle singole durate restituisce la durata di ogni operazione).

- Il calcolo dei costi di lavorazione prevede l'opportuna considerazione di diverse **voci di costo**, quali ad esempio quello del grezzo (indipendente dal ciclo di lavorazione), quello del posto di lavoro (imputabile alla manodopera, alle quote di ammortamento ed alle spese generali di consumo) ed infine il costo dell'utensileria. La formulazione del costo deve inoltre tenere in considerazione eventuali tempi di attesa e va definita in modo particolare in relazione alla singola lavorazione.

Fogli di ciclo e di fase

Le scelte finora eseguite vanno infine riportate nei fogli di lavorazione che si distinguono in fogli di ciclo e fogli di fase e che saranno utilizzati dall'operatore per la corretta esecuzione delle lavorazioni. La differenza sostanziale tra i fogli di ciclo ed i fogli di fase è relativa al livello di dettaglio delle informazioni contenute: in particolare le informazioni più grossolane saranno contenute nei fogli di ciclo, più dettagliate in quelli di fase.

UNIV. DISEGNIATORI DI PISA		Ciclo di lavorazione elemento (MATE. N° 1)		REFERIMENTI		Compil.		Data		Foglio	
		SCATOLA DI REGOLAZIONE		1 Dis. N. 0.1.1.1 2 Dis. N. 0.1.1.1 3 Dis. N. 0.1.1.1		Control.				1 di 2	
						Visto					
DESCRIZIONE SUPERFICI		FASI		SCHEZZO DI LAVORAZIONE		COMP. TEMPI		Superficie di riferimento (il processo di partenza)		NOTE	
Sec. C-C		1. SCATOLATURA									
		2. SCATOLATURA									
		3. SCATOLATURA									
		4. SCATOLATURA									
		5. SCATOLATURA									
		6. SCATOLATURA									
		7. SCATOLATURA									
		8. SCATOLATURA									
		9. SCATOLATURA									
		10. SCATOLATURA									
		11. SCATOLATURA									
		12. SCATOLATURA									
		13. SCATOLATURA									
		14. SCATOLATURA									
		15. SCATOLATURA									
		16. SCATOLATURA									
		17. SCATOLATURA									
		18. SCATOLATURA									
		19. SCATOLATURA									
		20. SCATOLATURA									
		21. SCATOLATURA									
		22. SCATOLATURA									
		23. SCATOLATURA									
		24. SCATOLATURA									
		25. SCATOLATURA									
		26. SCATOLATURA									
		27. SCATOLATURA									
		28. SCATOLATURA									
		29. SCATOLATURA									
		30. SCATOLATURA									
		31. SCATOLATURA									
		32. SCATOLATURA									
		33. SCATOLATURA									
		34. SCATOLATURA									
		35. SCATOLATURA									
		36. SCATOLATURA									
		37. SCATOLATURA									
		38. SCATOLATURA									
		39. SCATOLATURA									
		40. SCATOLATURA									
		41. SCATOLATURA									
		42. SCATOLATURA									
		43. SCATOLATURA									
		44. SCATOLATURA									
		45. SCATOLATURA									
		46. SCATOLATURA									
		47. SCATOLATURA									
		48. SCATOLATURA									
		49. SCATOLATURA									
		50. SCATOLATURA									
		51. SCATOLATURA									
		52. SCATOLATURA									
		53. SCATOLATURA									
		54. SCATOLATURA									
		55. SCATOLATURA									
		56. SCATOLATURA									
		57. SCATOLATURA									
		58. SCATOLATURA									
		59. SCATOLATURA									
		60. SCATOLATURA									
		61. SCATOLATURA									
		62. SCATOLATURA									
		63. SCATOLATURA									
		64. SCATOLATURA									
		65. SCATOLATURA									
		66. SCATOLATURA									
		67. SCATOLATURA									
		68. SCATOLATURA									
		69. SCATOLATURA									
		70. SCATOLATURA									
		71. SCATOLATURA									
		72. SCATOLATURA									
		73. SCATOLATURA									
		74. SCATOLATURA									
		75. SCATOLATURA									
		76. SCATOLATURA									
		77. SCATOLATURA									
		78. SCATOLATURA									
		79. SCATOLATURA									
		80. SCATOLATURA									
		81. SCATOLATURA									
		82. SCATOLATURA									
		83. SCATOLATURA									
		84. SCATOLATURA									
		85. SCATOLATURA									
		86. SCATOLATURA									
		87. SCATOLATURA									
		88. SCATOLATURA									
		89. SCATOLATURA									
		90. SCATOLATURA									
		91. SCATOLATURA									
		92. SCATOLATURA									
		93. SCATOLATURA									
		94. SCATOLATURA									
		95. SCATOLATURA									
		96. SCATOLATURA									
		97. SCATOLATURA									
		98. SCATOLATURA									
		99. SCATOLATURA									
		100. SCATOLATURA									
		101. SCATOLATURA									
		102. SCATOLATURA									
		103. SCATOLATURA									
		104. SCATOLATURA									
		105. SCATOLATURA									
		106. SCATOLATURA									
		107. SCATOLATURA									
		108. SCATOLATURA									
		109. SCATOLATURA									
		110. SCATOLATURA									
		111. SCATOLATURA									
		112. SCATOLATURA									
		113. SCATOLATURA									
		114. SCATOLATURA									
		115. SCATOLATURA									
		116. SCATOLATURA									
		117. SCATOLATURA									
		118. SCATOLATURA									
		119. SCATOLATURA									
		120. SCATOLATURA									
		121. SCATOLATURA									
		122. SCATOLATURA									
		123. SCATOLATURA									
		124. SCATOLATURA									
		125. SCATOLATURA									
		126. SCATOLATURA									
		127. SCATOLATURA									
		128. SCATOLATURA									
		129. SCATOLATURA									
		130. SCATOLATURA									
		131. SCATOLATURA									
		132. SCATOLATURA									
		133. SCATOLATURA									
		134. SCATOLATURA									
		135. SCATOLATURA									
		136. SCATOLATURA									
		137. SCATOLATURA									
		138. SCATOLATURA									
		139. SCATOLATURA									
		140. SCATOLATURA									
		141. SCATOLATURA									
		142. SCATOLATURA									
		143. SCATOLATURA									
		144. SCATOLATURA									
		145. SCATOLATURA									
		146. SCATOLATURA									
		147. SCATOLATURA									
		148. SCATOLATURA									
		149. SCATOLATURA									
		150. SCATOLATURA									
		151. SCATOLATURA									
		152. SCATOLATURA									
		153. SCATOLATURA									
		154. SCATOLATURA									
		155. SCATOLATURA									
		156. SCATOLATURA									
		157. SCATOLATURA									
		158. SCATOLATURA									
		159. SCATOLATURA									
		160. SCATOLATURA									
		161. SCATOLATURA									
		162. SCATOLATURA									
		163. SCATOLATURA									
		164. SCATOLATURA									
		165. SCATOLATURA									
		166. SCATOLATURA									
		167. SCATOLATURA									
		168. SCATOLATURA									
		169. SCATOLATURA									
		170. SCATOLATURA									
		171. SCATOLATURA									
		172. SCATOLATURA									
		173. SCATOLATURA									
		174. SCATOLATURA									
		175. SCATOLATURA									
		176. SCATOLATURA									
		177. SCATOLATURA									
		178. SCATOLATURA									
		179. SCATOLATURA									
		180. SCATOLATURA									
		181. SCATOLATURA									
		182. SCATOLATURA									
		183. SCATOLATURA									
		184. SCATOLATURA									
		185. SCATOLATURA									
		186. SCATOLATURA									
		187. SCATOLATURA									
		188. SCATOLATURA									
		189. SCATOLATURA									
		190. SCATOLATURA									
		191. SCATOLATURA									
		192. SCATOLATURA									
		193. SCATOLATURA									
		194. SCATOLATURA									
		195. SCATOLATURA									
		196. SCATOLATURA									
		197. SCATOLATURA									
		198. SCATOLATURA									
		199. SCATOLATURA									
		200. SCATOLATURA									
		201. SCATOLATURA									
		202. SCATOLATURA									
		203. SCATOLATURA									
		204. SCATOLATURA									
		205. SCATOLATURA									
		206. SCATOLATURA									
		207. SCATOLATURA									
		208. SCATOLATURA									
		209. SCATOLATURA									
		210. SCATOLATURA									
		211. SCATOLATURA									
		212. SCATOLATURA									
		213. SCATOLATURA									
		214. SCATOLATURA									
		215. SCATOLATURA									
		216. SCATOLATURA									
		217. SCATOLATURA									
		218. SCATOLATURA									
		219. SCATOLATURA									
		220. SCATOLATURA									
		2									

I **fogli di fase** contengono informazioni molto più dettagliate, ossia oltre all'indicazione di fase e sottofase si riporta lo schizzo di lavorazione relativo ad ogni posizionamento del pezzo (sottofase), rappresentando schematicamente la posizione e la forma dell'utensile. A seguire si riporta una descrizione estremamente dettagliata di ogni operazione elementare con specifica della codifica dell'utensile, delle attrezzature e dei sistemi di controllo adoperati, ed infine tutti i parametri di lavorazione (velocità di taglio, avanzamento, profondità di passata, numero di passate, potenza nominale ed assorbita, rendimento ecc.).

UNIV. DEGLI STUDI DI PERA		Fasi di lavorazione elemento (MATER. N° 1)		RIFERIMENTI		Compil.		Data		Pagina																			
		SCAROLA DI REGOLAZIONE		* DIN 91 43.1, 1 ** Distanza base N° * Marcatura N°		Control. Vale				7 di 8																			
Materiale		C30 UNI 8467		Tipo		GETTO		Caratteristiche		Rva = 200 N/mm ² = Dimensione																			
Fase		L. Tagli		SCHIZZO DI LAVORAZIONE		n°		OPERAZIONE		Utensile		Attrezzature		Controllo		TAVOLO		NOTE											
																V _{max} (m/min)		V _{min} (m/min)		V _{media} (m/min)		f (mm/rev)		a _p (mm)		R _{max} (mm)			
30		B				1		IN AUTOCENTRANTE CON INDE- SETTI DOPO SU O DI SPANARE ANCORA (1) A 545 (C) CELLARE		PC10012101 (1) C10012101 (1)		Piastrina accidentale con insetti dici		Lubrifi- canti a secco		3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						2		QUADRARE LA (1) A DI SA PER UNA LUNGHEZZA DI 40 PER PRE- SA ALICENTRANTE		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						3		IN AUTOCENTRANTE CON INDE- SETTI DOPO SU O DI SPANARE ANCORA (1)		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						4		SPANARE LA FACCE (1) E QUADRARE LA (1) A 545 (C)		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						5		RICORRERE IL FORO (1) A DI SA		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						6		QUADRARE IL PEZZO IN INDESETTI DOPO SU O DI SPANARE LA (1) E SPANARE LA (1)		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
30		B				1		QUADRARE IL PEZZO IN INDESETTI DOPO SU O DI SPANARE LA (1) E SPANARE LA (1)		PC10012101 (1) C10012101 (1)		Piastrina accidentale con insetti dici		Lubrifi- canti a secco		3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						2		SPANARE LA FACCE (1) E QUADRARE LA (1) A 545 (C)		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						3		RICORRERE IL FORO (1) A DI SA		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						4		QUADRARE IL PEZZO IN INDESETTI DOPO SU O DI SPANARE LA (1) E SPANARE LA (1)		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						5		RICORRERE IL FORO (1) A DI SA		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						6		QUADRARE IL PEZZO IN INDESETTI DOPO SU O DI SPANARE LA (1) E SPANARE LA (1)		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
30		B				1		GIRARE IL PEZZO IN INDESETTI DOPO SU O DI SA E ALZARE LA (1) E SPANARE LA (1)		PC10012101 (1) C10012101 (1)		Piastrina accidentale con insetti dici		Lubrifi- canti a secco		3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						2		FINIRE LA FACCE (1)		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			
						3		ALZARE LA (1) DI 20 ± 0.1		PC10012101 (1) C10012101 (1)						3		1.00		70		0.02		0.5		0.7			

Ottimizzazione

Si definisce ottimizzazione la serie di attività decisionali che portano alla formulazione di una funzione obiettivo, semplice o complessa, da minimizzare o massimizzare eventualmente in presenza di vincoli. Prima operazione da eseguire in una procedura di ottimizzazione è la valutazione della sua opportunità, ossia del rapporto costi-benefici. Si procede quindi all'individuazione delle variabili decisionali significative, ossia quelle caratterizzate da un'effettiva incidenza sul valore della funzione obiettivo. In particolare, in relazione alle lavorazioni per asportazione di truciolo, le procedure di ottimizzazione sono finalizzate alla definizione dei parametri di taglio nel caso di lavorazione di linea di grossi volumi di produzione e organizzate su più turni, generalmente basate sull'utilizzo di macchine utensili a controllo numerico. In altri casi, ossia per lavorazioni di piccoli lotti, organizzate per reparti di produzione, la definizione ottimizzata dei parametri di taglio non comporta benefici significativi, essendo il tempo di effettiva asportazione una piccolissima percentuale del totale e risultando più conveniente una gestione ottimizzata dei flussi produttivi.

La formulazione della funzione obiettivo consiste nell'elaborazione di un modello matematico relativo al processo in esame, in relazione ad uno specifico criterio di ottimizzazione. Nel caso di ottimizzazione dei parametri di taglio si considerano aspetti legati alla riduzione dei tempi o dei costi di lavorazione, che risultano nei criteri di massima produttività e massima economia. Il **criterio di massima produttività** è basato sulla minimizzazione della funzione obiettivo tempo unitario di produzione, ossia tempo imputabile alla realizzazione di un singolo pezzo. Il **criterio di massima economia** si basa sulla minimizzazione della funzione obiettivo costo unitario di produzione, ossia costo imputabile alla realizzazione del singolo pezzo. La scrittura delle funzioni suddette assume forme particolari in relazione alla tipologia di lavorazione ed alle aliquote di tempi e costi da considerare. Regolarmente una generica lavorazione prevede la visita di diverse

macchine utensili secondo una **procedura multistadio**: su ogni macchina l'asportazione è generalmente eseguita togliendo il sovrametallo in più passate (**lavorazione multipasso**) ed ogni singola passata di profondità fissata prende il nome di **lavorazione monopasso**. Andando da lavorazioni monopasso a multistadio si ha un ovvio aumento del numero di variabili decisionali e della complessità del problema:

nel caso di lavorazione monopasso le uniche due variabili sono avanzamento e velocità di taglio; nelle lavorazioni multipasso bisogna considerare il numero di passate e profondità di ogni singola passata;

infine nel caso di lavorazione multistadio la scrittura delle funzioni obiettivo varia a seconda se la macchina sia o meno collo di bottiglia, in quanto le macchine non collo di bottiglia sono caratterizzate da tempi di attesa che comportano da un lato una riduzione dei costi dovuta ai consumi ridotti, dall'altro l'opportunità di riparare i parametri di taglio muovendosi verso condizioni di maggiore economia evitando però la creazione di un nuovo collo di bottiglia. Data la complessità delle ottimizzazioni multistadio e multipasso, si preferisce trattare questi problemi come somma di procedure monopasso in cui si rispetta sempre la regola di definire prima la profondità di passata, quindi l'avanzamento ed infine la velocità di taglio.

Ottimizzazione Monopasso

1) Criterio di massima produttività (min t_1 tempo di taglio unitario)

Nel caso dell'ottimizzazione monopasso della sola velocità di taglio, ossia qualora siano già definiti profondità di passata e avanzamento, bisogna innanzitutto esplicitare in funzione della variabile decisionale la funzione obiettivo. Assumendo il criterio di massima produttività, ossia operando in regime produttivo, la funzione obiettivo sarà data dalla somma delle aliquote dei tempi di preparazione, dei tempi attivi e dei tempi passivi relative al singolo pezzo. Definita N_l la **numerosità del lotto**, la fase produttiva può essere schematizzata come segue:

- In base a tale schematizzazione il tempo di taglio t_1 imputabile al singolo pezzo sarà pari alla somma del tempo di attrezzaggio diviso la numerosità N_l del lotto, dei vari tempi relativi al ciclo del singolo pezzo ed infine del tempo di cambio utensile diviso il **numero N_u di pezzi lavorabili col singolo tagliente** (non utensile perché esso può per esempio essere

girato mostrando altri taglienti)→
$$t_1 = \frac{t_{att}}{N_l} + t_{mp} + t_{au} + t_l + t_{co} + t_{sp} + \frac{t_{cu}}{N_u}.$$

- È evidente che in questa scrittura solo 2 elementi dipendono dai parametri di taglio; ossia il tempo di lavorazione t_l e l'aliquota relativa al cambio utensile, per cui è possibile riscrivere la relazione dei tempi unitari accorpendo le aliquote indipendenti in un unico termine t_p ; di

conseguenza risulta
$$t_1 = t_p + t_l + \frac{t_{cu}}{N_u}.$$

- Per valutare il valore ottimo della velocità di taglio bisogna innanzitutto riscrivere i termini dipendenti in forma esplicita: in particolare è immediato verificare come il tempo di lavorazione sia inversamente proporzionale alla velocità di taglio secondo una costante λ . Con riferimento ad una lavorazione di tornitura cilindrica esterna (ma con possibilità di generalizzare) è possibile esprimere il tempo di lavorazione come il rapporto tra la distanza coperta dall'utensile a velocità controllata e la velocità di avanzamento,

$$t_l = \frac{L}{v_a} = \frac{L}{na} = \frac{\pi D l}{v_t a} = \frac{\lambda}{v_t}$$

ossia In maniera analoga è possibile ricavare la relazione suddetta dalla definizione di tasso di asportazione di materiale →

$$MRR = \frac{Vol}{t_l} = K v_t a P \xrightarrow{\text{da cui}} t_l = \frac{Vol}{K v_t a P}$$

- La dipendenza dell'ultimo termine ($\frac{t_{cu}}{N_u}$) dalla velocità di taglio è conseguenza dell'influenza di tale parametro sull'usura e sulla durata del tagliente: detta T la durata del tagliente e assumendo in prima approssimazione che le extracorse siano trascurabili, e quindi il tempo

di lavorazione coincida con il tempo di effettiva asportazione, risulta $N_u = \frac{T}{t_l}$, laddove il termine T può essere esplicitato considerando una generica legge di durata come ad esempio la legge di Taylor, che nel caso specifico può essere scritta in maniera semplificata: $v_t T^n = V_1$. In caso di ottimizzazione combinata bisognerà ricorrere alla scrittura estesa e da cui comunque dipende l'equazione semplificata:

$$v_t T^n a^m P^r = V_1 \rightarrow v_t T^n = \left(\frac{V_1}{a^m P^r} \right) \frac{1}{V_1} \quad T = \frac{V_1^{\frac{1}{n}}}{v_t^{\frac{1}{n}}}$$

Dalla legge di Taylor risulta

- Sostituendo quindi sia T che t_l , N_u può essere riscritto così: $\frac{1}{N_u} = \frac{\lambda}{V_1} v_t^{\left(\frac{1}{n}-1\right)}$;

andando a sostituire i termini ricavati si risale alla scrittura esplicita della funzione obiettivo tempi unitari, che risulta data dalla somma di un termine costante t_p (indipendente dalla velocità di taglio) ed un termine decrescente con la

$$t_1 = t_p + \frac{\lambda}{v_t} + t_{cu} \frac{\lambda}{V_1^{\frac{1}{n}}} v_t^{\left(\frac{1}{n}-1\right)}$$

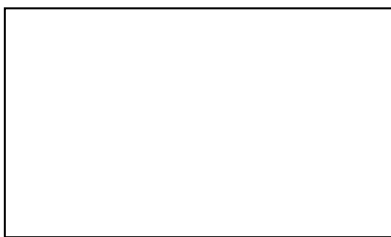
velocità:

Diagrammando in funzione della velocità di taglio i tre termini e quindi la funzione t_1 , è possibile evidenziare **l'esistenza di un valore di minimo definito in corrispondenza della velocità di massima produttività V_p** . Questa cifra può essere facilmente ricavata annullando la derivata dei tempi unitari rispetto alla velocità di taglio. In particolare risulta

$$\frac{\partial t_1}{\partial v_t} = \frac{\partial t_p}{\partial v_t} + \frac{\partial \left(\frac{\lambda}{v_t} \right)}{\partial v_t} + \frac{\partial}{\partial v_t} \left[t_{cu} \frac{\lambda}{V_1^{\frac{1}{n}}} v_t^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} \right] = 0$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial v_t} = -\lambda v_t^{-2} + t_{cu} \frac{\lambda}{V_1^{(\frac{1}{n})}} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) v_t^{(\frac{1}{n}-2)} = 0$$

$$-\lambda v_t^{-2} \left[1 - t_{cu} \frac{\lambda}{V_1^{(\frac{1}{n})}} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) v_t^{(\frac{1}{n})} \right] = 0 \Rightarrow v_t^{(\frac{1}{n})} = \frac{V_1^{(\frac{1}{n})}}{t_{cu} \left(\frac{1}{n} - 1 \right)} \stackrel{ho}{=} V_P = \frac{V_1}{\left[t_{cu} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]^n}$$



Nel caso in cui le extracorse non fossero trascurabili rispetto alla lunghezza di lavorazione, il tempo di effettiva asportazione t_a sarà

$$\begin{cases} t_l = \frac{L'}{v_a} = \frac{\lambda'}{v_t} \\ N_u = \frac{T}{t_a} \end{cases}$$

ovviamente minore del tempo di lavorazione t_l , quindi di conseguenza bisognerà riscrivere la funzione t_1 in maniera

$$t_1 = t_p + \frac{\lambda'}{v_t} + t_{cu} \frac{\lambda}{V_1^{(\frac{1}{n})}} v_t^{(\frac{1}{n}-1)}$$

opportuna: : anche in questo caso la velocità di massima produttività può essere ottenuta imponendo l'annullamento della derivata, avendo a valle

$$V_P = \left(\frac{\lambda'}{\lambda} \right)^n \frac{V_1}{\left[t_{cu} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]^n}$$

dei calcoli però un fattore moltiplicativo:

2) Criterio di massima economia (min c_1 costo unitario di produzione)

Assumendo regime e criterio di massima economia, la funzione obiettivo da minimizzare è data dai costi unitari di produzione, ossia dalla somma del costo del grezzo, del costo del posto di lavoro e del costo dell'utensileria; analiticamente risulta:

$$c_1 = c_g + c_0 t_1 + \frac{c_u}{N_u}$$

dove $\begin{cases} c_g & \text{costo del grezzo} \\ c_0 & \text{costo al minuto del posto di lavoro e quindi considerato in relazione al tempo} \\ c_u & \text{costo del singolo tagliente} \end{cases}$, da cui esplicitando

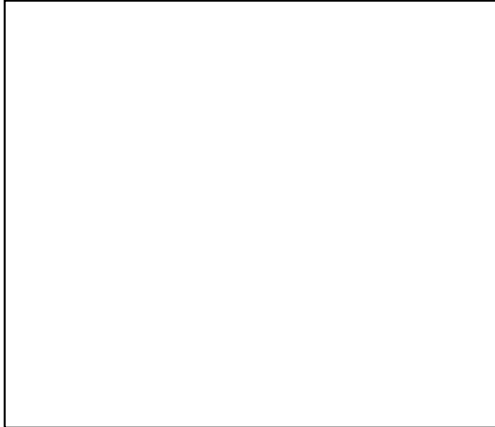
t_1 come nel caso precedente $\left(t_1 = t_p + t_l + \frac{t_{cu}}{N_u} \right)$, avendo già raggruppato i termini (t_p) indipendenti dalla velocità di taglio, si ottiene:

$$c_1 = c_g + c_0 t_p + c_0 t_l + c_0 \frac{t_{cu}}{N_u} + \frac{c_u}{N_u}$$

- Raggruppo anche i primi due termini di costo (passivi), poiché sono indipendenti dalla v_t , ed esplicito come fatto prima i termini t_l e N_u :

$$c_1 = c_p + c_0 t_l + c_0 \frac{t_{cu}}{N_u} + \frac{c_u}{N_u} = c_p + c_0 \frac{\lambda}{v_t} + \frac{c_0}{N_u} \left(t_{cu} + \frac{c_u}{c_0} \right) =$$

$$= c_p + c_0 \frac{\lambda}{v_t} + c_0 \frac{\lambda}{V_1^{\left(\frac{\lambda}{n}\right)}} \left(t_{cu} + \frac{c_u}{c_0} \right) v_t^{\left(\frac{\lambda}{n}-1\right)}$$



Anche in questo caso, diagrammando i costi in funzione della velocità di taglio, è **possibile evidenziare l'esistenza di** un termine costante, uno decrescente ed uno crescente con v , ed inoltre **un minimo della funzione di costo in corrispondenza della velocità di massima economia V_e .**

- Nella relazione precedente il termine c_0 , espresso in €/min, è dato dalla somma di 3 contributi: manodopera, ammortamento e spese generali, in cui i primi due sono facili da avere. Il calcolo di C_0 è semplificato considerando l'incidenza delle spese generali in percentuale rispetto alla somma di ammortamento e manodopera, ossia analiticamente:

$$c_0 = c_{amm} + c_{man} + c_{s.g.} \approx c_{amm} + c_{man} + K(c_{amm} + c_{man}) = (1 + K)(c_{amm} + c_{man}).$$

- Il calcolo del costo per l'utensileria va particolarizzato in relazione alla tipologia di utensile:

- in caso di **acciaio HSS**: $c_u = \frac{c_{au} + r c_r - c_{uu}}{(1 + r)}$, dove

c_{au} è il costo di affilatura dell'utensile;

r è il numero di riaffilature;

c_r è il costo di riaffilatura;

c_{uu} il valore residuo dell'utensile usurato (generalmente trascurabile);

$(1+r)$ è il numero complessivo di taglienti.

- Nel caso di **utensile ad inserti**: $c_u = \frac{c_{au}}{n_t} + \frac{c_{ap}}{n_{t,p}}$ (secondo termine trascurabile), dove

c_{au} è il costo caratteristico dell'inserto;

n_t è il numero di taglienti;

c_{ap} è il costo d'acquisto del portautensile;

$n_{t,p}$ è il numero di taglienti utilizzabili prima del degrado dell'utensile.

- Il criterio di massima economia può essere ricavato in maniera analoga a quello di massima produttività imponendo l'allungamento della funzione obiettivo rispetto alla velocità di taglio, ossia analiticamente

$$\frac{\partial c_1}{\partial v_t} = 0 \stackrel{\text{si ha}}{\implies} \frac{\partial c_p}{\partial v_t} + \frac{\partial \left(\frac{c_0 \lambda}{v_t} \right)}{\partial v_t} + \frac{\partial}{\partial v_t} \left[\frac{c_0 \lambda}{V_1^{(1/n)}} \left(t_{cu} + \frac{c_u}{c_0} \right) v_t^{(1/n-1)} \right] = 0 ;$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial v_t} = -c_0 \lambda v_t^{-2} + \frac{c_0 \lambda}{V_1^{(1/n)}} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(t_{cu} + \frac{c_u}{c_0} \right) v_t^{(1/n-2)} = 0 ;$$

$$-c_0 \lambda v_t^{-2} \left[1 - \frac{1}{V_1^{(1/n)}} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(t_{cu} + \frac{c_u}{c_0} \right) v_t^{(1/n)} \right] = 0 ;$$

$$v_t^{(1/n)} = \frac{V_1^{(1/n)}}{\left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(t_{cu} + \frac{c_u}{c_0} \right)} \stackrel{\text{ottengo}}{=} V_e = \frac{V_1}{\left[\left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(t_{cu} + \frac{c_u}{c_0} \right) \right]^n}$$

Anche nel caso di massima economia, qualora le extracorse non siano trascurabili è possibile risalire a V_e considerando il fattore correttivo uscente dalla derivata $\left(\frac{\lambda'}{\lambda} \right)$, ossia:

$$V_e = \left(\frac{\lambda'}{\lambda} \right)^n \frac{V_1}{\left[\left(t_{cu} + \frac{c_u}{c_0} \right) \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]^n} .$$

- Le due velocità di massima economia e massima produttività definiscono la cosiddetta **zona di massima efficienza della lavorazione**, evidenziabile graficamente diagrammando le funzioni t_1 e c_1 rispetto a v_t . Tale zona si definisce di massima efficienza in quanto **per velocità comprese tra V_e e V_p ad un aumento dei costi corrisponde sempre una riduzione dei tempi e viceversa**. Da ciò si ricava che la velocità di taglio, qualora non siano disponibili sulla macchina regimi di rotazione corrispondenti a V_e o V_p , va comunque scelta nella zona di massima efficienza.

Tali considerazioni, anche se formulate in ipotesi di tornitura cilindrica esterna,

restano comunque valide per le altre lavorazioni a meno delle dovute esplicitazioni dei termini.

Una volta **definita la velocità di taglio** in base ai criteri di **massima economia** o **massima produttività** o comunque nella **zona di massima efficienza** è possibile risalire tramite la **legge di Taylor** alla **durata del tagliente "T"** e al **numero di pezzi N_u lavorabili con il singolo tagliente**. In base ai valori numerici ricavati si va infine a pianificare la lavorazione apportando eventuali correzioni alla **$[V]$ t^* (velocità di taglio)** e decidendo le strategie di sostituzione utensile (ad esempio se $N_u = 2.05$ si potrebbe valutare l'opportunità di sostituire l'utensile al termine della lavorazione del secondo pezzo il che nel caso di utilizzo di macchina utensile a controllo numerico consentirebbe di effettuare la sostituzione in ombra allo smontaggio e rimontaggio del pezzo, in questo caso $t_1 = t_p + t_l$. A valle di ogni modifica si valuta il risultato ottenuto dalla stima delle funzioni t_1 e c_1 .

Nel caso di **ottimizzazione combinata di lavorazioni monopasso** le **variabili decisionali** sono **l'avanzamento e la velocità di taglio** per cui le funzioni obiettivo vanno esplicitate in funzione di **"a"** e **" V_t "**, in particolare si dimostra che il tempo di lavorazione è funzione inversa tramite una

costante λ' del prodotto $a \cdot V_t$ ($t_l = \frac{\lambda'}{v a} = \frac{L}{v a} = \frac{L}{n a} = \frac{L \pi D}{V_t a} = \frac{L'}{V_t a}$). Inoltre la stima della durata dell'utensile può essere effettuata considerando la **legge di Taylor generalizzata** ossia

($v T^n a^m p^r = v_1^*$) che può essere rimaneggiata nel modo seguente

($v^{\frac{1}{n}} T a^{\frac{m}{n}} p^{\frac{r}{n}} = v_1^{\frac{1}{n}}$; $T v^{\alpha} a^{\beta} p^{\gamma} = K$; $T v^{\alpha} a^{\beta} = \frac{K}{p^{\gamma}} = K'$; $T = \frac{K'}{v^{\alpha} a^{\beta}}$), da cui si ricava la **durata T**.

La definizione di **valori di ottimo** qual'ora esistesse dovrebbe essere data dalla risoluzione di uno

$$\begin{cases} \frac{\partial t_1}{\partial v} = 0 \\ \frac{\partial t_1}{\partial a} = 0 \end{cases} ; \begin{cases} \frac{\partial tc_1}{\partial v} = 0 \\ \frac{\partial tc_1}{\partial a} = 0 \end{cases}$$

dei **due sistemi di annullamento delle derivate** ($\begin{cases} \frac{\partial t_1}{\partial v} = 0 \\ \frac{\partial t_1}{\partial a} = 0 \end{cases}$). Si dimostra che in entrambi i casi si **ottiene l'annullamento delle derivate** solo nel caso in cui **"α=β" tuttavia tale condizione non è mai verificata nella pratica** essendo **la velocità di taglio più influente rispetto all'avanzamento sull'usura dell'utensile (praticamente α>β sempre)**. Data la risoluzione del sistema tuttavia si evince che i tempi o i costi decrescono per **"α" tendente all'infinito** e **"V_t"**

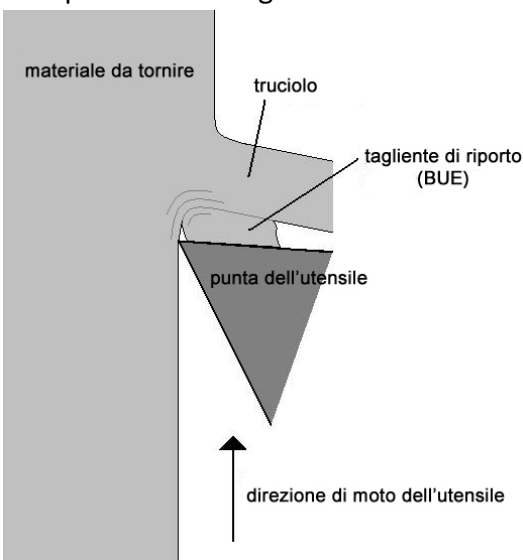
tendente a zero ($\alpha \rightarrow \infty ; V_{t1} \rightarrow 0$), da cui si ricava la **regola fondamentale di assumere innanzitutto il massimo valore della "p" (profondità di passata), quindi il massimo possibile di**

"α" ed infine definire la velocità di taglio "V_t" ($p \rightarrow \alpha \rightarrow V_t$). Dal punto di vista pratico la definizione di avanzamento e velocità di taglio parte dalla considerazione iniziale dei **vincoli di lavorazione** (forza, potenza, temperatura, tagliente di riporto, vibrazioni, macchina utensile, finitura superficiale ecc.), in base ai vincoli considerati è possibile diagrammare su un grafico doppio logaritmico (**log "α" ; log "V_t"**) i valori corrispondenti ai vincoli definiti a **partire dai vincoli ortogonali** (retta parallela a "α" o a "V_t").

Diagrammando le **curve isocrono o isocosto** sul grafico, si ottiene un profilo come illustrato nel grafico in cui i **valori minori si hanno al crescere dell'avanzamento e al ridursi della velocità di taglio** per cui è **opportuno assumere l'avanzamento massimo consentito** (ossia il minimo dei limiti superiori). Una volta **definito l'avanzamento, la velocità di taglio può essere ricavata** tramite le relazioni già viste per **V_e** e **V_p**. L'ultima cosa da effettuare è **la verifica sui vincoli obliqui (ad esempio la potenza $P_m = F_t V_t$)** qual'ora questi vincoli non fossero soddisfatti si definiscono **"α"** e **"V_t"** sempre in base al criterio di assumere il massimo avanzamento definendo quindi la velocità in base alla condizione limite imposta dal vincolo.

LIMITI TRA LE RETTE "A" E "B" DEL GRAFICO (rette parallele ad "α")

A) Il tagliente di riporto (limite inferiore della velocità di taglio) è un cappuccio formato da strati di materiale in lavorazione sovrapposti, depositati in prossimità del tagliente dell'**utensile** durante un'operazione di taglio dei metalli. Durante il taglio dei metalli, e quindi anche nel processo di



tornitura, sull'utensile si possono accumulare strati di materiale, a causa delle elevate pressioni e temperature che si vengono a creare tra il **truciolo** e il petto dell'utensile. Piccole particelle metalliche che si saldano al petto dell'utensile. Si forma così un caratteristico cappuccio chiamato tagliente di riporto. Si crea con condizioni di **velocità di taglio** basse e medie, quando il materiale tende ad **incrudirsi**. Si forma sia con truciolo continuo che discontinuo. La formazione del tagliente di riporto comporta anche un vantaggio: protegge il tagliente e il petto dell'utensile, il che comporta un aumento della loro durata. Ciononostante tale vantaggio è spesso relativo, perché il tagliente di riporto si stacca e

si riforma continuamente nel corso di una lavorazione. La formazione del tagliente di riporto si evita impiegando nelle operazioni di taglio degli appropriati oli e lavorando a una velocità di taglio superiore a un certo limite.

B) Il limite superiore della velocità di taglio è imposto dai limiti della macchina.

LIMITI TRA LE RETTE "C" E "D" DEL GRAFICO (rette parallele all'asse delle V_t)

C) Il limite inferiore dell'avanzamento, (valore minimo dell'avanzamento) è un parametro legato ai limiti della macchina (poiché non può scendere oltre un certo valore).

D) Il limite superiore dell'avanzamento, (valore massimo dell'avanzamento), è il parametro oltre al quale avremmo una qualità superficiale del pezzo molto scarsa che non ci fa rispettare i valori della rugosità aritmetica R_a .

E) Questa retta posta a destra di "D" è un limite causato dalla troppo elevata forza di taglio F_t causata da un avanzamento molto grande.

MACCHINE A CONTROLLO NUMERICO

1) Tradizionale

2) Comando

3) Comando numerico

4) C.N.C.

5) D.N.C.

Lo sviluppo delle macchine utensili e delle lavorazioni per asportazione e non solo è stato focalizzato negli ultimi anni su due aspetti fondamentali in primo luogo lo sviluppo di nuovi materiali per utensili in grado di lavorare un'ampia gamma di materiali e di resistere a condizioni di taglio sempre più spinte dall'altro alla progressiva automazione delle macchine utensili. La dove per automazione si intende le tecniche ed i metodi finalizzati alla riduzione o alla sostituzione dell'intervento umano nelle varie fasi di lavorazione. Conseguenza diretta di una spinta automazione è l'aumento di sicurezza in quanto l'operatore non deve più effettuare la lavorazione bensì programmare la macchina e presidiare la lavorazione. Aumento di qualità dovuto alla maggiore precisione e ripetibilità delle macchine rispetto all'operatore umano (le macchine non sono soggette a curve di rendimento giornaliere), alla riduzione dei tempi e all'aumento della produttività. Tra i vari scopi dell'automazione ci sono oltre all'eliminazione dell'intervento umano nella fase attiva passiva e di controllo la combinazione delle diverse lavorazioni effettuabili su un'unica macchina senza smontaggio o riposizionamento del pezzo (tale opportunità va estesa anche alle fasi di controllo con notevole riduzione dei tempi passivi) e degli errori dovuti a riposizionamento effettuazione di diverse operazioni in contemporanea grazie all'utilizzo di macchine pluri mandrino ed infine integrazione delle diverse lavorazioni grazie all'utilizzo di sistemi di manipolazione dei pezzi e trasporto tra le varie stazioni. I primi esempi di automazione delle macchine utensili sono stati caratterizzati da una notevole rigidità ossia da una stretta connessione tra i sistemi utilizzati e le geometrie del pezzo da realizzare tipici esempi di automazione rigida delle macchine utensili sono i torni automatici e i torni a copiare. Nel primo caso il movimento relativo utensile pezzo veniva impartito sfruttando dei cinematismi basati sull'utilizzo di camme di profilo opportuno ovviamente per ogni diversa geometria si rendeva

necessaria la progettazione e la realizzazione di un diverso cinematismo. Nei torni a copiare il movimento dell'utensile veniva impartito utilizzando il movimento di un tastatore solidale all'utensile vincolato a scorrere su una guida opportuna specifica per il profilo da realizzare. Limiti fondamentali di queste strategie di automazione sono ovviamente la scarsissima flessibilità. Lo sviluppo notevole delle strategie di automazione è stata diretta conseguenza dello sviluppo delle tecnologie elettroniche ed informatiche la cui applicazione alle macchine utensili ha portato alla messa a punto di macchine utensili a controllo numerico sempre più evolute con il termine controllo numerico si intendono la tecnologia e i metodi utilizzati per comandare le diverse operazioni e controllare ed eventualmente correggere l'esito delle stesse. Da questo punto di vista le macchine utensili possono essere classificate in una scala che parte dalle macchine tradizionali ed arriva al controllo numerico diretto in particolare utilizzando una macchina tradizionale tutte le operazioni sono delegate all'operatore ossia il montaggio del pezzo il montaggio dell'utensile l'impostazione dei parametri di taglio l'esecuzione e il controllo delle diverse operazioni il cambio utensile, lo smontaggio del pezzo e il trasporto alla stazione successiva. Man mano che si procede con le tecniche di automazione le operazioni suddette passano dall'operatore alla macchina le macchine a comando numerico sono in grado di impartire alla macchina alcune fasi di lavorazione relativamente alla definizione dei parametri di taglio ai percorsi utensile e alla gestione di alcuni azionamenti mediante lettura ed interpretazione delle istruzioni contenute nel part program (fig1) tali istruzioni sono convertite in impulsi che il governo invia a diversi azionamenti. Limite fondamentale di tali macchine non è che causa del loro inutilizzo è l'assoluta mancanza di un controllo sulle diverse operazioni. Le macchine utensili a controllo numerico si differenziano dalle precedenti per la presenza di strategie di controllo e di correzione basate sul confronto effettuato tramite comparatori tra i valori comandati e i valori effettivamente raggiunti e misurati tale opportunità è resa possibile grazie all'utilizzo di specifici trasduttori o sensori di tipo diretto o indiretto in grado di acquisire o misurare determinate grandezze (posizione velocità accelerazioni temperatura e così via che vengono poi convertiti in segnali elettrici utilizzati dai comparatori. In definitiva i segnali inviati ai diversi azionamenti sono sempre dati dalla combinazione di un'informazione proveniente dal part program (fig 2) ed un errore rilevato dal comparatore. Ulteriore evoluzione è data dalle macchine a controllo numerico computerizzato costituite da una macchina utensile a controllo numerico dotata di un calcolatore in grado di eseguire precise scelte. Differenza sostanziale tra C.N. e C.N.C. è legata alle potenzialità delle diverse macchine in relazione alla gestione delle lavorazioni. Nel primo caso la macchina è in grado di eseguire in maniera controllata le diverse istruzioni codificate nel part program senza avere tuttavia capacità decisionali. Le macchine C.N.C. sono in grado di effettuare la gestione della vita utensile e dell'utensileria in generale. Infine nel caso di macchine utensili a controllo numerico diretto o distribuito si allarga notevolmente l'ottica di azione del controllo che passa dalla singola macchina (D.N.C.) all'intero reparto di produzione (fig3) un sistema del genere è basato sull'utilizzo di un server centrale collegato in rete con le diverse macchine operatrici a controllo numerico computerizzato in particolare il server gestisce una serie di informazioni provenienti dalle macchine utensili oppure dirette ad esse. Tra le informazioni in ingresso (macchina server) vi sono lo stato della lavorazione informazioni relative ai tempi segnali di attesa pezzo segnali di guasto e così via, in direzione contraria viaggiano i Part Program.

In relazione alla tipologia di lavorazione eseguibili le MUCN possono essere distinte in macchine monoscopo e multiscopo in particolare le prime sono date dall'applicazione della tecnologia del controllo numerico a macchine utensili che si differiscono da quelle tradizionali per una serie di accorgimenti costruttivi e componenti specifici le macchine multiscopo ossia i centri di tornitura e i centri di lavoro sono caratterizzati dalla combinazione di lavorazioni di differenti tipologie nello stesso spazio di lavoro. Grazie all'utilizzo del numero elevato di assi controllati e la presenza di

diversi mandrini e di utensili motorizzati in torretta i centri di lavoro sono ottenuti sostanzialmente dalla combinazione di macchine quale fresatrice alesatrice e trapano. I centri di tornitura sono caratterizzati generalmente dalla presenza di diversi mandrini e di sistemi automatizzati per lo smontaggio del pezzo e il montaggio con diverso posizionamento su un mandrino differente le torrette porta utensili le torrette porta utensili inoltre sono dotate di opportuni motori che rendono possibile la lavorazione di fresatura o di foratura. Da un punto di vista costruttivo le macchine utensili a controllo numerico differiscono sostanzialmente dalle macchine tradizionali sia per le maggiori prestazioni richieste sia per aspetti connessi alla sicurezza dell'operatore sia all'autonomia della lavorazione (convogliatori di truciolo, dispositivi di cambio utensile, sistemi di manipolazione dei pezzi). Tali macchine prevedono la chiusura dello spazio di lavoro tramite apposite lamiere dotate di porte a scorrimento per l'apertura e la movimentazione dei pezzi con finestre in plexiglas per il controllo della lavorazione. La struttura portante delle macchine utensili è realizzata generalmente di ghisa o in acciaio, in particolare realizzazioni in ghisa sono ottenute mediante processi di fonderia sfruttando la notevole colabilità di questo materiale sottoponendole quindi ad un trattamento di distensione finalizzato all'eliminazione delle tensioni residue dovute al raffreddamento. Vantaggio fondamentale delle strutture in ghisa è la notevole rigidità dinamica dovuto allo smorzamento interno delle vibrazioni ottenuto grazie alla presenza di grafite modulare o lamellare all'interno del materiale. La durezza ottenuta tuttavia non consente di ricavare le guide degli assi dalla struttura stessa tali elementi sono realizzati in acciaio e quindi riportati meccanicamente sulla struttura di base. Struttura in acciaio sono generalmente ottenute mediante processi di saldatura in questo caso l'assenza di smorzamento interno rende necessaria un'accurata analisi dinamica della macchina. Anche le strutture saldate vengono sottoposte per motivi analoghi a trattamenti di distensione collegando infine meccanicamente le guide in acciaio temprato.

Nel caso di macchine utensili è richiesta una notevole precisione ed una serie di accorgimenti particolari relativamente alla realizzazione delle guide in quanto da tali elementi dipende la precisione della macchina stessa. In linea di principio le guide devono possedere elevata durezza in modo tale da non deformarsi a causa della compressione localizzata e presentare un basso coefficiente d'attrito con scarsa dipendenza dalla velocità di movimentazione degli assi. In particolare le diverse direzioni di movimentazione prendono il nome di **assi controllati (slide mani)** indicati con **X Y e Z** quelli di traslazione principali con asse Z coincidente con l'asse del mandrino e orientato in maniera tale da allontanarsi dal pezzo in lavorazione. Gli assi **A B C** sono gli assi di rotazione principali rispettivamente a gli assi X Y e Z infine nelle eventuali traslazioni secondarie sono definite da **U V e W**. Nelle macchine utensili a controllo numerico le guide a strisciamento sono sostituite da sistemi differenti in maniera tale da evitare i fenomeni di Stick Slip ossia il movimento a scatti tipico dei moti relativi a bassa velocità. La prima soluzione consiste nel rivestire le guide metalliche con materiale plastico caratterizzato da elevata resistenza a compressione dilatazione termica paragonabile a quella dell'acciaio e coefficiente d'attrito pressoché costante in alternativa è possibile sostituire l'attrito radente con attrito di tipo volvente utilizzando guide a rulli o a sfere, oppure ricorre alle guide a sostentamento idrostatico in cui tra gli organi in movimento è posto un fluido a tenuta in maniera tale per eliminare completamente i fenomeni d'attrito. Altra differenza fondamentale rispetto alle macchine tradizionali è relativa ai sistemi utilizzati per la conversione del moto di rotazione impartito dai motori in moto di traslazione della tavola portapezzo o porta utensile. I sistemi tradizionali a rocchetto e dentiera o barra scanalata sono sostituiti da viti a ricircolazione di sfere caratterizzate dall'interposizione tra i filetti di vite e madrevite di sfere metalliche di elevata precisione. Vantaggi di questi sistemi sono l'elevato rendimento con minore richiesta di coppia a parità di rotazione con conseguente aumento della vita utile. Giochi estremamente ridotti eventualmente nulli utilizzando

precarico, possibilità di ricorrere a sensori di tipo indiretto anziché diretto con conseguente risparmio sulla componentistica. La realizzazione dei mandrini prevede l'impiego di acciai speciali alto resistenziali e di cuscinetti reggi spinta di elevata precisione, vantaggio fondamentale delle macchine utensili a controllo numerico è dovuto alla notevole flessibilità ossia alla possibilità di modificare facilmente la geometria dei pezzi da realizzare tale flessibilità è dovuta a due aspetti fondamentali in primo luogo alla programmabilità delle macchine che consente con semplici modifiche del part program di variare lavorazioni e percorso utensile, in secondo luogo alla disponibilità di un elevato numero di utensili a magazzino l'interfaccia tra lo specifico utensile e il mandrino è realizzata utilizzando porta utensili di forma e dimensioni ovviamente standardizzate in generale il porta utensile è costituito da due diverse parti separate da una flangia che presenta due scanalature una circonferenziale utilizzata per l'afferraggio da parte del dispositivo scambiatore e la successiva sostituzione dell'utensile e una assiale utilizzata dal dente di trascinamento per la trasmissione della coppia dal mandrino al porta utensile. La parte del portautensile in cui va alloggiato l'utensile vero e proprio presenta caratteristiche e geometria variabile in base allo specifico utensile da alloggiare, mentre la parte opposta ossia quella che entra nel mandrino ha forma troncoconica e può essere realizzata secondo due diversi costruttivi corrispondenti al portautensile ISO oppure HSK. Il portautensile ISO presenta una zona troncoconica piena al termine della quale è posto il codolo a fungo che viene afferrato da una pinza posta internamente la mandrina in modo tale da ottenere il bloccaggio del portautensile nella sua posizione di riferimento in questo caso sia il riferimento assiale che il riferimento radiale dell'utensile sono definiti dal contatto tra la superficie troncoconica del portautensile e la superficie interna del mandrino. Il portautensile HSK presenta una forma cava all'interno della quale effettua la sua azione il dispositivo di bloccaggio. A differenza del caso precedente solo il riferimento radiale è definito dalla superficie troncoconica in quanto quello assiale è definito a contatto con la superficie piana del prolungamento della flangia. Tra i due il portautensile HSK risulta preferibile per lavorazioni ad alta o altissima velocità alle quali si ha per effetto della forza centrifuga l'espansione del mandrino per le sue caratteristiche costruttive ossia per la geometria piena il portautensile ISO presenta scarsa adattabilità alla deformazione suddetta con conseguente perdita della battuta della superficie troncoconica ed di entrambi i riferimenti. Il portautensile HSK grazie alla geometria cava presenta maggiore adattabilità all'espansione e in ogni caso riesce a conservare il riferimento assiale grazie al contatto tra le superfici piane. Prima di essere alloggiate nelle diverse postazioni del magazzino utensile gli utensili sono sottoposti ad una fase di presetting che consiste nell'acquisizione delle caratteristiche geometriche e dimensionali fondamentali tale operazione è eseguita su una macchina specifica che prende il nome di Tool Room le informazioni sono trasmesse alla macchina secondo diverse modalità connesse anche allo specifico meccanismo di chiamata dell'utensile in particolare è possibile procedere all'immissione manuale delle informazioni di rilievo da parte dell'operatore anche se tale pratica è sconsigliata per l'elevata probabilità di errore, la seconda possibilità consiste nel codificare le informazioni in codici a barre riportati su etichette poste sul portautensile oppure utilizzando chip magnetici ovviamente in questi casi è necessaria la presenza di dispositivi di lettura ottica o magnetica sulla macchina utensile. La trasmissione delle informazioni qual'ora possibile può essere effettuata mediante collegamento in rete tra la Tool Room e la macchina utensile. La definizione dei correttori ossia delle informazioni geometriche e dimensionali ha due finalità in primo luogo consente alla macchina di relazionale lo 0 zero dell'utensile ossia il punto comandato in base al quale viene effettuata la programmazione dei percorsi con lo zero del mandrino e della torretta a cui sono associati i trasduttori per il controllo in secondo luogo in base ai correttori definiti è possibile programmare i percorsi utensile lavorando con compensazione utensile (G41 o G42), ossia definendo i percorsi in base ai profili da realizzare e non in relazione alla posizione effettiva

dello zero utensile utilizzando le informazioni fornite l'unità di governo andrà ad elaborare percorsi relativi allo zero utensile. La chiamata dell'utensile a magazzino specificata nel part programm tramite l'istruzione T seguita da una serie di cifre che specificano il numero del magazzino l'utensile da prelevare ed infine la cella di memoria in cui sono registrati i correttori può essere interpretata dalla macchina in tre diversi modi nel caso di chiamata a stazione codificata l'utensile è portato in posizione di cambio sarà quello contenuto nella stazione specificata dall'istruzione T ad esempio la numero 3 nel caso di codifica T03 in sostanza si specifica il numero della stazione avendo cura che vi sia contenuto l'utensile desiderato nel caso di chiamata ad utensile codificato la chiamata è relativa al codice contenuto sull'etichetta con il chip magnetico fissato al portautensile per cui il magazzino inizia a muoversi finché il dispositivo di lettura non segnala il posizionamento dell'utensile codificato in posizione di cambio infine nel caso di cambio ad utensile programmato la gestione delle sostituzioni è basata da una tabella di corrispondenze compilata all'atto dell'inserimento degli utensili a magazzino in questo caso le cifre che seguono la lettera T sono relative all'utensile e tramite alla tabella si risale alla stazione a magazzino che viene portata alla posizione di cambio. Per ogni sostituzione la tabella di corrispondenze viene aggiornata in maniera automatica. I magazzini più diffusi sono di tre tipologie a tamburo o revolver a rastrelliera oppure a catena, caratteristiche fondamentali dei magazzini sono la capacità ossia il numero massimo di utensili contenibile la modularità ossia la possibilità di espandere il magazzino la tipologia di ricerca preferibilmente bidirezionale e la gestione degli utensili ossia la possibilità di aggiornare automaticamente la tabella di corrispondenze. Il tempo di cambio utensile che per alcune macchine è dell'ordine di 2 3 secondi e dispositivo scambiatore utilizzato. Il sistema di cambio più utilizzato è il braccio scambiatore costituito da un dispositivo dotato di due pinze in posizione opposta ed è caratterizzato da movimenti secondo diversi gradi di libertà.

Differenza sostanziale tra comando e controllo numerico è dovuta alla presenza di sensori o trasduttori e comparatori in particolare nel caso di controllo numerico il segnale inviato al singolo azionamento è il risultato di un segnale comandato dal part programm e un segnale derivante da eventuali errori. I trasduttori utilizzati sulle macchine di utensile a controllo numerico possono essere utilizzati in relazione alla grandezza misurata ad esempio posizione (potenziometri, encoder, righe ottiche, inductosyn o resolver), velocità (dinamo tachimetrica), accelerazione (accelerometri), temperatura e così via. Altra estensione è effettuabile alla tipologia di segnale che sarà continuo per trasduttori analogici discreto per trasduttori digitali. Inoltre in relazione alla dipendenza dalla grandezza da misurare e il segnale elettrico generato i trasduttori possono essere distinti in trasduttori diretti ed indiretti, nel primo caso il segnale elettrico generato dal trasduttore è direttamente correlato alla grandezza da misurare, nel secondo caso bisogna applicare un'ulteriore conversione. Relativamente ai sensori di posizione è possibile effettuare ulteriori distinzioni in lineare e rotativo con ovvio significato e di assoluto ed incrementale. Un sensore di tipo assoluto è in grado di fornire con un errore dato dalla precisione della macchina la coordinata esatta occupata dall'organo in movimento lungo l'asse controllato. Un sensore incrementale è in grado di valutare unicamente gli spostamenti per cui per risalire alle coordinate bisogna effettuare l'azzeramento degli assi all'accensione della macchina. Il potenziometro è stato uno dei primi trasduttori di posizione utilizzato su macchine utensili a controllo numerico è costituito da un filo conduttore di sezione costante S e lunghezza L pari alla lunghezza dell'asse da controllare fissato sull'asse stesso tramite un supporto isolante. Agli estremi del conduttore si applica una opportuna tensione V e di conseguenza la corrente circolante nel filo conduttore può essere ricavata dalla legge Ohm ossia $V=RI$. In corrispondenza degli organi di movimento è posto un cursore solidale all'organo stesso che preleva dal conduttore una differenza di potenziale V_c misurata da un mini voltmetro (figura potenziometro). In particolare risulta $V_c=R_cI$ dove R_c è la resistenza del tratto tra lo 0 zero e la posizione del cursore. Rapportando le due leggi di Ohm risulta

$V_c/V = R_{ci}/R_i = R_c/R = L_c/L$ $L_c = V_c/V * L$. All'atto pratico un sistema del genere ha una precisione fortemente dipendente dalla precisione del millivoltemetro ed un errore commesso di circa 5% della lunghezza dell'asse controllato, una precisione maggiore può essere ottenuta utilizzando degli avvolgimenti a greca in maniera tale da aumentare la lunghezza del conduttore a parità di lunghezza dell'asse controllato, l'errore in questo caso è dell'ordine dello 0,5% e comunque non accettabile. (non più utilizzati sensore diretto perché tensione direttamente proporzionale alla posizione). Una precisione maggiore può essere ottenuta utilizzando sensori ottici quali le righe ottiche e i encoder le righe ottiche sono costituite da un regolo in acciaio fissato dall'asse da controllare sul quale è foto inciso un reticolo in oro in maniera tale da avere un alternanza di bande opache e riflettenti in opposizione al reticolo e solidali all'organo in movimento sono posti una sorgente luminosa un condensatore che la funzione di raddrizzare il fascio un reticolo di lettura in vetro su cui sono riportate bande opache e trasparenti con passo uguale a quello del reticolo in oro ed infine dei gruppi di celle fotovoltaiche. Durante lo spostamento lungo l'asse varia in base alla relazione relativa la quantità di luce trasmessa dal reticolo di lettura riflessa dal reticolo in oro ritrasmessa dal reticolo di lettura ed infine raccolta dalle celle fotovoltaiche. Il segnale in uscita avrà andamento sinusoidale e può essere facilmente digitalizzato utilizzando rilevatori di soglia e convertitori di impulsi. In particolare il verso dello spostamento può essere determinato confrontando le variazioni di segnale provenienti da due gruppi di celle fotovoltaiche distanziate di un numero intero di passi più un quarto di passo (sistema diretto ed assoluto poiché c'è un reticolo di riferimento) Un sensore di questo tipo nella versione suddetta ha funzionamento incrementale tuttavia è possibile ottenere una misura assoluta affiancando al reticolo in oro un reticolo di riferimento in base al quale è possibile risalire alle coordinate o in alternativa utilizzare diversi reticoli affiancati caratterizzati da passo variabile ed effettuare una lettura in corrispondenza di ogni reticolo (figura bianco nera). Con riferimento allo schema definito A fotodiodo principale e B secondario ed inoltre associando valore unitario in corrispondenza di una banda riflettente e valore nullo in corrispondenza di una opaca ed indicando con + (segno più) il passaggio 0, 1 e con il segno meno (–) il passaggio inverso, si ha che è possibile conoscere il verso di spostamento in base alla concordanza o discordanza dei segni ottenuti dagli spostamenti dei due fotodiodi (prima il principale). Ad esempio nel caso di spostamento verso destra il fotodiodo A passa da 1 a 0 registrando un meno – il fotodiodo B passa da 1 a 0 registrando un altro meno –, quindi lo spostamento verso destra è associato alla concordanza dei due segni. Nel caso di spostamento verso sinistra A registra un + B un segno – quindi la discordanza è indice di uno spostamento verso sinistra (tutto in relazione allo schema riportato).

Il meccanismo di funzionamento del Encoder è sostanzialmente simile a quello delle righe ottiche in questo caso il reticolo in oro e il regolo in acciaio sono sostituiti da un disco di materiale plastico su cui sono riportate una serie di feritoie con direzione radiale in modo tale da ottenere un alternanza di bande vuote trasmettenti e di bande piene opache. In posizione contrapposta rispetto al disco sono posti da un lato sorgente luminosa e condensatore dall'altro i fotodiodi. Un sistema del genere risulta incrementare sia all'interno di un giro sia per numero di giri tuttavia con metodi analoghi a i precedenti è possibile ottenere un trasduttore assoluto ciclico. L'encoder è un sensore diretto per misure angolari indiretto per misure lineari e va calettato sull'asse del motore che movimento il singolo asse controllato. Inductosyn è un sensore di tipo lineare diretto costituito da due diversi elementi, una scala costituita da un filo conduttore con avvolgimento a greca e passo pari a 2 mm fissato tramite un supporto isolante lungo l'asse da controllare e lo slider solidale all'organo in movimento è costituito da 2 avvolgimenti a greca geometricamente simili a quello della scala e poste ad una distanza pari ad un numero intero di passi più un quarto di passo in maniera tale da risalire al verso dello spostamento. Durante il funzionamento del sistema i due circuiti dello slider sono alimentati con una tensione di pari frequenza non in fase tra

di loro, per induzione sul circuito della scala si ottiene una tensione variabile in relazione al coefficiente di accoppiamento tra slider e scala dipendente dalla posizione relativa dei due elementi, dalla misura della tensione indotta sulla scala e del suo sfasamento si risale all'entità e al verso dello spostamento. La precisione di tale sistema è dell'ordine di pochi micron, un sensore del genere è ovviamente incrementale tuttavia una versione assoluta può essere ottenuta utilizzando sistemi di lettura ottica induttiva o capacitiva.

Il resolver ha una struttura simile ad un trasformatore rotante con coefficiente di accoppiamento tra statore e rotore variabile in funzione della coordinata angolare, quindi alimentando con una opportuna tensione i circuiti del rotore sarà indotta una tensione variabile sui circuiti dello statore. Dalla misura della tensione indotta è quindi possibile risalire alla rotazione dell'asse. Misure di velocità possono essere effettuate in maniera diretta o indiretta in questo ultimo caso si applica una semplice derivazione degli spostamenti. Misure dirette possono essere ottenute utilizzando una dinamo tachimetrica realizzata con materiali ferromagnetici speciali e calettata sull'asse di rotazione in maniera tale da generare una tensione proporzionale alla velocità angolare. Unità di governo delle macchine utensile è sostanzialmente simile ad un comune calcolatore, la cui differenza è per la presenza di tre schede fondamentali ossia la scheda microprocessore che ha la funzione di gestire le memorie ram e l'interfaccia operatore (monitor e tastiera) in maniera tale da consentire l'acquisizione e la lettura del part program; la scheda master dotata di notevoli capacità di calcolo è responsabile delle operazioni di interpolazione di controllo ed eventuale correzione o interpolazioni controllo ed eventuale correzione, la scheda input output gestisce i segnali che provengono dai sensori velocità posizione temperatura ecc., ed i segnali diretti agli azionamenti. Con il termine interpolazione si intende il calcolo di tutte le posizioni controllabili dalla macchina in base alla sua risoluzione durante uno spostamento nonché la scomposizione delle velocità lungo i vari assi in maniera tale da percorrere la traiettoria comandata. In particolare tali velocità devono avere risultante sempre tangente alla traiettoria comandata per rispettare la

conservazione del modulo ($F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$) tale relazione può essere soddisfatta solo in maniera approssimativa e di conseguenza la scheda master elabora le specifiche correzione dell'errore di deriva. Nel caso di correzione di obiettivo la scheda master rilevando un punto fuori controllo ricalcola le posizioni intermedie in modo tale da puntare all'obiettivo comandato. Nel caso di correzione a traiettoria le posizioni intermedie e la scomposizione della velocità sono effettuate in maniera tale da riportarsi sulla traiettoria originale nel minor tempo possibile (figura del grafico). Notevole flessibilità nelle macchine utensile a controllo numerico è dovuto sia all'ampia gamma di utensili disponibili a magazzino sia alla possibilità di variare i percorsi utensile mediante semplici modifiche al part program. Il part program è un codice alfa numerico scritto in un linguaggio comprensibile alla macchina in cui sono codificate informazioni geometriche informazioni di movimentazione ed informazioni tecnologiche ed ausiliare. Le singole righe che costituiscono il part program prendono il nome di blocchi ogni blocco costituito da una serie di istruzioni dette parole, definite da una lettera di indirizzo seguita da uno o più gruppi di cifre le prime macchine utensile a controllo numerico ricevevano il part program tramite opportuni fogli perforati poi da floppy, a loro volta sostituiti da collegamento in rete o periferiche Usb. La programmazione delle macchine utensili a controllo numerico può essere eseguita attraverso 3 approcci: **1 la programmazione manuale** effettuata direttamente dall'operatore che scrive il part program in un linguaggio comprensibile al controllo tale approccio richiede ovviamente la conoscenza del codice da parte del programmatore tuttavia risulta vantaggiosa per semplici geometrie programmate eventualmente a bordo macchina. All'inizio dello sviluppo della tecnologia del controllo numerico si è avuta la vasta diffusione di codici estremamente diversi, in seguito l'esigenza di standardizzazione hanno portato alla definizione dello standard Iso6983 in cui sono

definite le funzioni principali interpretate univocamente dai diversi controlli tuttavia è lasciata facoltà al costruttore di macchine utensili di definire funzioni specifiche in maniera tale da valorizzare le potenzialità della macchina. **2 La programmazione interattiva o conversazionale** non richiede una conoscenza approfondita del codice da parte del programmatore, che si limita a rispondere ad una serie di quesiti visualizzati sul monitor a corredo della macchina utensile. Tali quesiti sono relativi all'utensile da selezionare alle traiettorie da percorrere ai punti da raggiungere e dai parametri di lavoro, in base alle risposte fornite dal programmatore il software sviluppa in automatico il part program.

3 La programmazione automatica è basata sui linguaggi APT o su programmi di tipo CAD/CAM. I linguaggi ATP prevedono una codifica della lavorazione basata su una sintassi più comprensibile all'operatore, nel codice ATP sono specificate informazioni geometriche di movimento e tecnologiche di carattere generale ossia non specifiche per il singolo controllo. Il file ATP viene elaborato nel cutter location file (cl file), tale file viene tradotto da un post processor in un part program eseguibile dallo specifico controllo. Nel caso di programmazione cad cam la generazione dei percorsi utensile non è più affidata al programmatore ma eseguita in automatico dal programma in base alle indicazioni fornite. Tale programmazione è effettuata in un ambiente molto simile a quello di un cad e prevede la definizione della geometria del prodotto finito non che del grezzo di partenza. Dopo di che il programmatore definisce utilizzando le opportune icone la tipologia di lavorazione (ad esempio sgrossatura spianatura lavorazione di tasche foratura e così via), gli utensili da utilizzare i parametri di taglio e le strategie di lavorazione. In base a queste indicazioni il programma calcola in automatico i percorsi utensili generando in seguito i codici APT e il codice G relativo alla lavorazione. La stesura manuale del part program secondo lo standard iso 6983 prevede la codifica delle lavorazioni utilizzando tre classi principali di funzioni le funzioni G ossia generali o preparatorie impostano lo specifico modo di lavoro della macchina in relazione alle unità di misura alla tipologia di programmazione (assoluta o incrementale), alla compensazione utensile alla gestione delle origini ossia degli zero pezzo all'attivazione di eventuali cicli fissi. Le funzioni di tipo N ossia miscelanee o ausiliarie mediante le quali sono gestiti gli azionamenti ossia accensione e spegnimento del mandrino erogazione del fluido lubro-refrigerante arresto programmato o fine del part program e così via. Infine la terza classe di funzioni è definita mediante le restanti lettere di indirizzo assegnate, in particolare sono generalmente riconosciute le lettere X, Y e Z, A, B, C, U, V e W mediante le quali sono specificati i movimenti dei singoli assi controllati inoltre il numero che segue la lettera di indirizzo è indice della coordinata da raggiungere lungo l'asse controllato nel caso di programmazione assoluta (G90) della distanza da percorrere lungo l'asse nel caso di programmazione incrementale (G91). L'istruzione T è utilizzata per definire l'utensile da chiamare per la sostituzione successiva tale lettera è seguita da uno o più gruppi di cifre, tali gruppi sono utilizzati per specificare il numero del magazzino (qual'ora c'è ne fosse più di uno) lo specifico utensile da chiamare secondo i meccanismi di chiamata già visti ed infine la locazione di memoria in cui sono registrati i correttori utensile. Il cambio utensile viene attivato tramite l'istruzione M06 (riga cambio utensile T10101: T(posizione di prelievo dell'utensile) 1 (numero magazzino), 01 (posizione dell'utensile), 01 (posizione di memoria interna alla macchina).

I parametri di lavorazione sono specificati mediante le lettere F ed S relative rispettivamente alla velocità di avanzamento e alla velocità di rotazione del mandrino, in particolare il significato delle cifre che seguono le istruzioni suddette è specificato tramite le funzioni G94 e G95 che indicano rispettivamente una velocità di avanzamento in millimetri al minuto (default in fresatura) oppure un avanzamento in millimetri al giro (default in tornitura) e dalle funzioni G96 e G97 che specificano se il valore numerico che segue la lettera S è rappresentativo rispettivamente di una velocità di taglio (default in tornitura) in metri al minuto oppure di una velocità di rotazione in giri al minuto (default in fresatura).

L'accezione e il verso di rotazione del mandrino sono definiti tramite le istruzioni M03 per rotazione oraria e M04 per rotazione antioraria, lo scorrimento del mandrino è comandato dall'istruzione M05 l'istruzione M07,M08;M09 comandano l'apertura e la chiusura del circuito lubro-refrigerante. La stesura del part programm dovrebbe essere effettuata tenendo ben presenti le caratteristiche della lavorazione ossia codificando le singole operazioni che l'operatore eseguirebbe manualmente, tale codifica va scritta sottoforma di blocchi opportunamente organizzati, ogni blocco inizia con la lettera di indirizzo N seguita da un numero progressivo che specifica il numero del blocco. In fase di lettura l'unità di governo legge tutte le istruzioni comprese tra due lettere N successive in seguito effettua le interpolazioni e gestisce gli azionamenti. I controlli moderni consentono anche di omettere la lettera N che è sostituita dal segnale di invio. Di seguito vanno specificate le funzioni generali e quindi le coordinate dei punti da raggiungere non che le coordinate di interpolazioni ausiliarie (i,j,k) per interpolazioni circolari. Infine vanno riportate le istruzioni S ed F le istruzioni T e le funzioni ausiliarie M, è comunque opportuno scrivere il part programm in maniera tale da riservare la singola riga di codice ad una sola operazione.

Part Programm

Ai fini della **stesura del part programm** va stabilita la tipologia di programmazione ossia: **1 assoluta riferita alle coordinate o 2 incrementale riferita agli spostamenti**. La **programmazione assoluta** di default su tutte le macchine utensile è impostata tramite la funzione **G90** quella **incrementale** tramite la **G91**, tuttavia è sempre possibile all'interno del part programm passare da una modalità all'altra in base alle diverse opportunità. In linea di principio la **programmazione assoluta** è preferibile **in fase di appostamento utensile** e qual'ora ci sia **incertezza sulla coordinata di partenza**. La **programmazione incrementale** invece può essere conveniente **nel caso di**

spostamenti ripetitivi come ad esempio in operazioni di **spianatura**. Nel caso di spostamenti ripetitivi offre la possibilità di utilizzare direttamente le quote riportate da disegno per definire gli spostamenti inoltre consente di effettuare un primo controllo sulla stesura del part programm. **La programmazione senza compensazione utensile** è di default su tutte le macchine utensili ed implica che la stesura del part programm sia effettuata descrivendo il percorso relativo al punto di riferimento dell'utensile, tale percorso in

-T01(scelta utensile) M06(attivazione cambio utensile)
 -G00 (accostamento utensile)
 -M03,M04 (rotazione oraria o antioraria del mandrino)
 -S(impostazione velocità di taglio o rotazione della fresa)
 -G01 x Δx (sono funzioni nodali che rimangono in memoria e definiscono gli spostamenti della spianatura la velocità è lineare e non di accostamento utensile)
 -G01 y Δy
 -G01 x- Δx
 -G01 y Δy

operazioni di fresatura va ricavato effettuando un **opportuno incremento del profilo effettivo di**

lavorazione. In lavorazioni di tornitura invece tale modalità risulta obbligatoria in fase di finitura e sconsigliata in fase di sgrossatura. L'attivazione della funzioni di compensazione è attivata tramite la G41 per compensazione utensile a sinistra e G42 per compensazione utensile a destra, dove sinistra o destra sono sempre relative alla posizione dell'utensile rispetto al pezzo e sono determinate in base al verso di spostamento dell'utensile. L'attivazione della compensazione dovrebbe essere effettuata utilizzando funzioni di **interpolazioni lineare e utilizzando uno spostamento preliminare a distanza sufficiente dal pezzo.** Un altro vantaggio relativo all'utilizzo della compensazione utensile è dato dalla **correzione automatica della velocità di avanzamento passando da interpolazioni lineare ad interpolazioni circolari G02 G03** in particolare lavorando senza compensazione è necessario effettuare tale correzione ogni qual volta vari la tipologia di spostamento il raggio di curvatura o la posizione dell'utensile rispetto al profilo da realizzare. La correzione è necessaria al fine di garantire il rispetto della condizione sulla velocità di avanzamento al variare della traiettoria, tramite l'istruzione **F è impostata la velocità del punto di riferimento** che risulterà uguale a quella del punto di contatto solo per spostamenti lineari. Nel caso di interpolazione circolare e senza programmazione di compensazione la velocità del centro fresa va corretta in maniera tale che il punto di contatto si muova a velocità di avanzamento. Definito **R in raggio di raccordo e "r" il raggio dell'utensile** risulta $F = \omega R$; $F_c = \omega(r+R)$ (velocità relativa al centro fresa corretto) da cui si ricava che il valore corretto per il tratto circolare è pari a $F_c = \frac{F(R+r)}{R}$ **per tratti circolari esterni, per tratti circolari interni** $F_c = \frac{F(R-r)}{R}$. La disattivazione della compensazione utensile è definita dalla funzione **G40**.

Spostamento in rapido : G00 (F99999).

Gli spostamenti in rapido sono utilizzati per tutte le fasi di movimentazione dell'utensile in cui non avviene asportazione tale modalità è impostata tramite la funzione **G00 o G0** eventualmente seguita dalla specifica **F99999**. Nel caso di spostamento in rapido la macchina muove gli assi alla massima velocità consentita applicando un controllo di tipo punto a punto ossia relativo al solo **raggiungimento della quota finale senza controllo di traiettoria** in questi casi **la traiettoria seguita dall'utensile può essere prevista solo in maniera approssimativa** per cui è importante pianificare questi movimenti evitando collisioni. Nel caso in cui in corrispondenza di **G0** la macchina comandi contemporaneamente i movimenti alla massima velocità lungo i vari assi si ottiene uno spostamento che sarà dato nel piano dalla diagonale del quadrato di lato pari allo spostamento minore seguito da un tratto rettilineo parallelo all'asse con spostamento maggiore; nel caso di spostamento nello spazio si avrà da prima la diagonale di un cubo quindi poi quella di un quadrato ed infine spostamento parallelo ad un asse. Alcuni controlli effettuano la scomposizione delle velocità in maniera tale da percorrere tratti approssimativamente lineari anche in rapido. L'interpolazione lineare è comandata dall'istruzione G01 e prevede l'applicazione di una strategia di controllo contiguo alla traiettoria da percorrere con eventuali correzioni nel caso di spostamento interpolato la scheda master calcola tutti i punti di controllo tra il punto iniziale e quello finale di spostamento ed effettua la scomposizione delle velocità lungo gli assi controllati ad esempio nel caso di spostamento lineare tra i punti A e B di istanti L e con velocità F la macchina valuta le velocità F_x e F_y da attribuire ai singoli assi, in maniera tale che si abbia conservazione del modulo e rispetto della tangenza. Dette $F_x = \cos \theta$; $F_y = \sin \theta$ le velocità lungo gli assi risulta evidentemente le relazioni precedenti. Tuttavia per problemi di costo computazionale la scomposizione non è effettuata per via trigonometrica ma sfruttando le

seguenti relazioni $F = \frac{L}{t}$; $F_x = \frac{L_x}{t}$;

$F_y = \frac{L_y}{t}$ da cui risulta

$$F_x = \frac{FL_x}{L} = \frac{FL_x}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} ;$$

$$F_y = \frac{FL_y}{L} = \frac{FL_y}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

Esempio programmazione assoluta :

Da A a B: N30 G90
N40, G01, X40, Y30, F50
Da B a A: N30 G90
N40, G01, X10, Y10, F50

Esempio programmazione incrementale

Da A a B: N30 G91 N40, G01, X30, Y20, F50
Da B a A: N30 G91 N40, G01, X-30, Y-20, F50

Interpolazione Circolare

G02 Oraria

G03 Antioraria

N50 G03 Xb Yb I(-) J(+) F

N50 G03 Xb Yb R(+/-) F

L'interpolazione circolare è utilizzata per la lavorazione di tratti curvilinei ad avanzamento controllato. In fase di programmazione è definita dalle funzioni G02 (G2) per interpolazione circolare oraria G03 (G3) per quella antioraria la dove il verso dell'interpolazione è discriminato in base al verso dell'asse ortogonale al piano di interpolazione. La definizione completa del tratto da percorrere è data oltre che dalla funzione G02 e G03 e dalle coordinate assolute o incrementali del punto da raggiungere da una serie di informazioni ausiliarie relative al centro della circonferenza o al suo raggio. In relazione alla posizione del centro tali coordinate sono codificate tramite le lettere di indirizzo I, J e K relative rispettivamente alla distanza del centro dal punto di inizio interpolazione lungo gli

assi X, Y e Z. I valori numerici che seguono I J o K hanno sempre significato incrementale ed avranno segno positivo per spostamenti concordi agli assi e negativo altrimenti. In alternativa i controlli più recenti consentono di fornire l'informazione necessaria utilizzando il raggio dell'arco da realizzare tramite la **lettere di indirizzo R il valore numerico seguente**, la R avrà segno positivo se l'angolo al centro relativo all'arco da realizzare è minore di 180° valore negativo se maggiore. **Le macchine utensili a controllo numerico non sono in grado di realizzare delle traiettorie rigorosamente circolari** di conseguenza i tratti circolari sono approssimati a delle poligonali che possono essere interne esterne o sovrapposte alla traiettoria perfetta le approssimazione suddette sono causa di un errore tipico della macchina e definito rispettivamente dalla tolleranza interna alla tolleranza esterna e tolleranza totale. In base ai valori delle tolleranze suddette gli **archi reali sono approssimati tramite poligonali** comprese tra due circonferenze concentriche in maniera tale da essere circoscritte alla circonferenza interna ed in scritte a quella esterna. Anche nel caso di interpolazione circolare la scheda master calcola le coordinate dei punti di controllo ed esegue la scomposizione delle velocità lungo gli assi controllati rispettando la condizione di tangenza e di conservazione del modulo. All'atto pratico in base ai dei valori di tolleranza definiti e alle caratteristiche geometriche (centro e raggio) dell'arco da realizzare si **calcola l'angolo al centro θ sotteso da ogni tratto lineare** e di conseguenza il numero dei lati della poligonale approssimante le strategie di calcolo **dell'angolo θ** sono sostanzialmente le stesse nei tra casi. **Nel caso di tolleranza interna la poligonale approssimante sarà inscritta in un arco di raggio pari al valore nominale e circoscritta in un arco concentrico al precedente e raggio pari a $R-t_i$** (t_i =tolleranza interna). Nel caso di tolleranza interna trigonometricamente risulta che l'angolo

$$\theta = 2 \arccos \left(\frac{R - t_i}{R} \right)$$
 da cui si ricava il numero di lati della poligonale approssimante n è uguale all'intero superiore del rapporto tra l'angolo totale sotteso dall'arco e l'angolo θ calcolato $n = \text{int} \left(\frac{2\pi}{\theta} + 0,5 \right)$

infine l'angolo θ è opportunamente corretto in maniera tale che l'estremo della poligonale coincida con il punto finale fornito da part programm. Dal punto di vista i criteri di tolleranza esterna e tolleranza totale sono identici al criterio di tolleranza internale uniche differenze sono relative alla posizione dell'errore connesso e alle formule di calcolo dell'angolo θ .

Una volta definito il valore **dell'angolo θ^*** , $\theta^* = 2 \frac{\pi}{n}$, la scheda master è in grado di calcolare tutte le posizioni di interpolazione intermedia. Utilizzando le seguenti relazioni

$$\begin{cases} x_1 = x_c + R \cos[\alpha + (i-1)\theta^*] \\ y_1 = y_c + R \sin[\alpha + (i-1)\theta^*] \end{cases}$$
 Infine per ogni punto di interpolazione viene effettuata la scomposizione della velocità lungo gli assi controllati tale calcolo è effettuato in base alla posizione del punto considerato rispetto al centro della circonferenza. In particolare mediante l'uguaglianza degli angolo alfa conseguenza della condizione di tangenza risulta:

$$\sin \alpha = \frac{I}{R} = \frac{F_x}{F_c}; \cos \alpha = \frac{J}{R} = \frac{F_y}{F_c}; F_x = F_c \frac{I}{R} = \frac{I}{\sqrt{I^2 + J^2}}; F_y = F_c \frac{J}{R} = \frac{J}{\sqrt{I^2 + J^2}}$$

In fase di programmazione è possibile utilizzare una serie di **cicli fissi o macro che sintetizzano lavorazioni complesse o ripetitive in un**

numero di blocco estremamente ridotto tipico esempio sono i cicli fissi di foratura definiti dalle **funzioni da G81 a G89** ed eliminati o disattivati tramite la funzione **G80**. La **funzione G81 attiva il ciclo di foratura semplice** ed è seguita da informazioni relative alla quota z da raggiungere (fondo del foro) alla velocità di avanzamento in fase di asportazione e dalla quota di risalita in rapido dopo l'esecuzione del foro qual'ora differente dalla quota iniziale nei blocchi successivi

quello di attivazione del ciclo fisso è sufficiente **codificare unicamente le coordinate relative ai centri degli altri fori da realizzare**. Una volta attivato il ciclo fisso la macchina si muove con interpolazione di tipo lineare fino alla quota corrispondente al fondo del foro effettua una sosta nella suddetta posizione in modo da completare l'asportazione dopo di che risale in rapido fino alla quota iniziale o alla quota di risalita specificata(lettera di indirizzo R), infine si muove in rapido fino alle coordinate specificate nel blocco successivo dove ripete le operazioni suddette.

Saldature e giunzione permanenti

Le saldature sono un tipo di giunzione permanente (a differenza della bullonatura), ci sono diversi tipi di saldatura e di versi metodi di giunzione i tipi più comuni di saldatura sono: **saldature in piano** quando in due elementi sono posti uno di fianco all'altro orizzontalmente, **saldatura verticale** quando uno è posto in maniera perpendicolare rispetto all'altro, **saldatura frontale** saldiamo due elementi la cui giunzione è parallela al suolo e i due elementi sono disposti verticalmente rispetto al suolo, infine la **saldatura sovra testa** è una saldatura che prevede giunzione parallela al suolo e disposta in alto rispetto alla testa dell'operatore. Come li possiamo giuntare due elementi con geometrie diverse la più comune è la giunzione di teste di due elementi disposti l'uno vicino all'altro in tale moto (fig 1), l'altro modo è la saldatura a L (fig 2), la saldatura a T (fig 3), infine la saldatura per sovrapposizione (fig 4). In tutti i tipi di saldatura per ottenere la giunzione dobbiamo sottoporre energia sotto forma di calore ci da la possibilità di raggiungere una temperatura tale da fondere o solamente i lembi dei materiali da unire, oppure sia i lembi che l'eventuale materiale da apporto. Possiamo classificare le saldature in due famigli: saldature autogene, saldature eterogene. Appartengono alla saldature autogene le saldature per fusione che sono la saldatura a gas o saldatura ossiacetilenica, la saldatura ad arco, la saldatura al plasma, la saldatura laser. La saldatura ad arco si divide in: saldatura ad arco convenzionale saldatura TIG (tungsten inert gas), la saldatura MIG (metal inert gas), la saldature MAG (metal active gas), la saldatura ad arco sommerso. Alla stessa famiglia delle saldature autogene fanno parte la saldatura per resistenza e pressione, la saldatura a rulli, la saldatura per scintillio, la saldatura per attrito. Per la famiglia delle saldatura eterogene comprende: la saldobrasatura, la brasatura forte, la brasatura dolce. La saldatura Dip Brasing per alluminio nota anche come saldatura in sali fusi e saldatura ad onda sono tipi di saldatura che studieremo. Si chiamano autogene tutte le saldature che prevedono la fusione dei lembi degli elementi da unire e del eventuale materiale da apporto che deve essere metallurgicamente simile al metallo da unire in modo che la temperatura di fusione sia la stessa. Le saldature eterogene avviene quando la saldatura avviene solo per fusione del metallo de apporto (temperatura minore di fusione rispetto ai lembi) un esempio sono saldature sulle schede dei componenti elettrici.

Saldature autogene

La saldatura a gas o ossiacetilenica è una saldatura autogena che si può eseguire sia con che senza materiale da apporto, viene eseguita sfruttando tramite la reazione esotermica ottenuta grazie alla combustione di un gas combustibile acetilene e un gas comburente ossigeno che genera calore. Come si ottiene la combustione? Tramite un cannello che miscela i due elementi in maniera stechiometrica:

-Prima reazione: Acetilene+ossigeno $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2$ reazione stechiometrica tutto l'ossigeno e l'acetilene vengono bruciati genera ossido di carbonio e idrogeno si genera una certa **quantità di calore** che chiamiamo **Q1** il processo continua.

-Seconda reazione: $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ che genera una certa **quantità di calore Q2**.

-Terza reazione: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ che genera una quantità di **calore Q3 e vapore acqueo**.

L'ossigeno proviene nella prima reazione dalla bombola viene consumato totalmente quindi nelle altre **due reazioni l'ossigeno non proviene dalla bombola ma dall'ambiente** e questa è un fenomeno molto importante perché elimina l'ossigeno dalla zona di saldatura che è un elemento molto dannoso per la vita della saldatura (fig 5). Per vedere come varia la temperatura nella zona di uscita del cannello eseguiamo un grafico T-x temperatura distanza.

La seconda zona quella riducente elimina l'ossigeno ed **è quella in cui avviene la saldatura del giunto** perché è quella zona in cui la temperatura è massima **3150°C** e facilita quindi la fusione ed essendoci poco

ossigeno si evita la formazione di ossido che provoca una cattiva saldatura poco resistente (**l'ossido di ferro** non la ruggine di colore nero è sempre da evitare durante le saldature perché non entra a far parte della zona liquida ed impedisce la saldatura). La prima zona della fiamma il dardo ha sempre un colore bianco di forte intensità. Per capire se si sta lavorando con troppo ossigeno bisogna verificare che il colore del fiocco (terza zona della fiamma) non sia blu, nel caso in cui la fiamma è blu bisogna diminuire la quantità di ossigeno, altrimenti se la fiamma del fiocco è arancio (con del fumo nero) significa che c'è troppo acetilene e bisogna ridurlo (il fumo nero è dovuto alla troppa percentuale di carbonio). L'acetilene e l'ossigeno sono contenute in due bombole; bianca sulla parte superiore per l'ossigeno senza giunture saldate lungo le generatrici del cilindro a causa dell'elevata pressione a cui bisogna sottoporre l'ossigeno per ottenerlo in fase liquida, il rubinetto della bombola di ossigeno è in rame perché è un materiale autolubrificante e per evitare l'utilizzo di lubrificanti molto pericolosi quando sono a contatto con l'ossigeno, in seguito vengono miscelati e poi mandati all'ugello, durante la prima accensione bisogna far passare solo acetilene, che lo si fa reagire con l'ossigeno e tramite una fiamma di innesco otteniamo la fiamma, far passare solo ossigeno puro è molto pericoloso perché reagendo con materiale organico ad esempio grasso olio esplode. La bombola di acetilene (colore arancione sulla bombola) può presentare giunti saldati perché la pressione della bombola stessa è più bassa di 1,5 MPa rispetto ai 15 MPa dell'ossigeno, l'acetilene però è un gas instabile e per renderlo stabile bisogna diluire dell'acetone (perché l'acetilene vuole ritornare da fase liquida a fase gassosa ed è una reazione pericolosa) per farlo rimanere in fase liquida, per favorire ciò nella bombola vengono inserite microsfeere di ceramica. Vengono saldati con questo processo acciai a basso contenuto di carbonio di spessori poco elevati per evitare l'utilizzo di materiale di asporto e più passate di saldatura. Il rendimento di una saldatura si calcola misurando la lunghezza del cordone di saldatura rispetto all'unità di tempo. La stessa fiamma ossiacetilenica può essere utilizzata per saldature eterogenee. La fiamma ossiacetilenica viene utilizzata anche per il taglio ossiacetilenico (ad esempio per scassinare le cassaforti) che taglia i metalli, in questo caso il taglio del metallo si ottiene grazie alla rapida ossidazione che si ottiene grazie all'elevata temperatura, i piccoli pezzi di ossido grazie alla turbolenza abrasano il materiale e provocano il tagliarlo. Il cannello da taglio è diverso da quello da saldatura oltre ad una portata stechiometrica ($C_2H_2 + O_2$) ho una portata di solo ossigeno O_2 , quindi avrò un eccesso di ossigeno che causerà una fiamma di colore arancio (con questa tecnica si riesce a tagliare acciai a basso contenuto di carbonio, nel caso di acciaio inossidabili si miscela della polvere di ferro nell'ossigeno).

Vantaggi del taglio acetilenico è la non usura di utensili da taglio, un contro è che non si riescono a tagliare spessori maggiori di 20mm, la velocità di taglio è molto lenta pochi centimetri all'ora, la scabrosità del taglio ottenuto e la poca linearità del taglio e quindi un'alta rugosità della superficie a causa dell'abrasione dell'ossido di ferro, inoltre man mano che aumenta lo spessore della lamiera da tagliare si ottiene una divergenza delle pareti del taglio. La saldatura ossiacetilenica viene abbandonata se non per le saldature eterogenee che viene utilizzata come fonte di calore. Il taglio ossiacetilenico si può eseguire nel caso in cui vi sono elementi che devono eseguire altre lavorazioni (spessori da 50 a 350mm). Varia la velocità di taglio nel caso di spessori elevati (con polvere di ferro) si lavora con velocità di 10 centimetri/ora, nel caso di 200mm (senza polvere di ferro) di spessore la massima velocità ottenibile è 0,3 metri/minuto.

Uno degli impieghi di questo taglio è la cianfratura ossia l'operazione di preparazione dei lembi da saldare, questa operazione dipende dallo spessore del lembo fino allo spessore di 3 mm non c'è bisogno di questa operazione (ma solo l'operazione di pulizia del giunto da saldare); nel caso di spessore da 3 a 6 mm c'è bisogno di uno spazio tra i due giunti per far spazio al materiale da apporto, nel caso dello spessore compreso tra 6 e 16 mm c'è bisogno dell'operazione di cianfratura. Per questa operazione di cianfratura si evita l'utilizzo di macchinari ad alta precisione e bassa rugosità (per fare le cave) come la fresatrice e si preferisce l'utilizzo di taglio acetilenico. Se lo spessore delle due lamiere supera i 16mm fino a 20 mm c'è bisogno di un altro tipo di preparazione a doppia V. Nel caso di spessori maggiori di 20mm c'è bisogno di

una cianfrinatura più complessa a forma di gola. Fare più passate di saldatura nel caso di spessori maggiori di 20 mm fa diminuire il rendimento e quindi impiegare maggiore tempo. (fig1)

www.r0x.it

Saldatura ad archi convezionali

La saldatura ad archi convenzionali (con elettrodo rivestito) ha un rendimento molto più alto di quella ossiacetilenica, si ottiene tramite un passaggio di corrente tra il giunto da saldare detto metallo base e metallo da apporto sempre presente che prende il nome di elettrodo. L'attrezzatura può essere di due tipi formata da o un generatore di corrente alternata o un generatore di corrente continua. Il generatore di corrente alternata è costituito da un trasformatore che è in grado ridurre la differenza di potenziale tra elettrodo e metallo base e di consentire il passaggio di corrente di qualche centinaio di ampere. Per ottenere la corrente non è sufficiente ridurre la tensione c'è bisogno di un altro apparecchio detto raddrizzatore. Come è possibile ottenere temperature tanto elevate da portare alla fusione del metallo. È possibile schematizzare l'attrezzatura in questo modo: un generatore di corrente G collegato a due fili, il primo collegato ad una pinza con l'elettrodo, il secondo va collegato al giunto da saldare ossia al metallo base(fig 2)(se i due elementi non sono uniti c'è bisogno di un ponte che consente il passaggio di corrente su tutti e due gli elementi da saldare). L'operatore inizialmente accosta l'elettrodo al giunto che permette il passaggio di una corrente di corto circuito(ossia la massima corrente che può erogare il generatore), ciò porta al punto di contatto per effetto Joule ad arrivare ad altissime temperature che permettono la fusione del metallo da apporto. L'aria circostante si dissocia in ioni positivi e negativi che fanno sì che questo gas dissociato chiamato plasma, diventa anche esso un conduttore e quindi anche se stacciamo la corrente la colonna di plasma permette il passaggio di corrente (essendo un conduttore). Durante la saldatura questo passaggio di corrente genera scintille di elevate luminosità molto pericolose per gli occhi dell'operatore per questo si utilizzano maschere di protezione. La temperatura dell'arco di saldatura è di circa 6000 7000°C. Il materiale d'apporto è detto in questo caso elettrodo come la saldatura ossiacetilenica è manuale, il materiale da apporto deve essere simile a quello di base per evitare l'insorgere di problemi strutturali legati alle diverse temperature di fusione dei due metalli. Affinchè sia assicurata la continuità dell'arco elettrico la distanza tra l'elettrodo e il metallo base deve variare dai 3 ai 6 mm se la distanza si riduce a meno di 3mm si può avere contatto tra elettrodo e metallo base con la conseguente saldatura tra i due elementi, se la distanza è maggiore di 6 mm l'arco si può spegnere. Il campo magnetico generato dalla corrente ha forte influenza nella saldatura esso si sposta come la corrente, l'arco elettrico si muove a causa del soffio magnetico causato dal campo magnetico questo fenomeno si può regolare regolando la tensione sia costruendo un elettrodo di struttura adatta. L'elettrodo nella saldatura ad arco ha un metallo di struttura simile a quello da saldare ed è circondato da una polvere di rivestimento. Le funzioni della polvere di rivestimento ,costituita da sali con temperatura di fusione più elevata dell'anima, sono svariate: esso serve per orientare il flusso di metallo fuso (gocce di metallo 50 60 gocce al secondo entrano nel giunto, le gocce sono però disperse a volte dal campo magnetico), serve inoltre per eliminare l'ossigeno durante la saldatura, i gas ottenuti sono inerti ossia non reagiscono con il metallo e sono ottenuti dalla liquefazione dei sali, i sali non liquidi però vanno a miscelarsi con il metallo da apporto però essi avendo densità minore galleggiano sul metallo fuso , questa crosta però protegge il raffreddamento del giunto(riduzione della velocità di raffreddamento) essendo un isolante termico. Diagramma tensione corrente come varia la tensione in funzione della corrente, come varia la corrente in funzione della distanza tra elettrodo e metallo base(fig 3) dobbiamo cercare di ottenere per piccoli spostamenti dell'elettrodo piccole variazioni di corrente ed evitare zone che lavorano in maniera opposta ossia per piccoli spostamenti grandi variazioni di corrente. Il rivestimento dell'elettrodo viene scelto in funzione del tipo di saldatura che dobbiamo eseguire i più diffusi sono: rivestimenti ossidanti, rivestimenti acidi, rivestimenti basici, rivestimenti organici o cellosici, rivestimenti ad alta penetrazione, ed ad alto rendimento, rivestimento la rutilo.

Il rivestimento fonde quasi contemporaneamente all'elettrodo esso ha anche la funzione per eseguire diversi tipi di saldatura in piano verticale ecc.

1)Il rivestimento ossidante costituito da ossido di ferro è quello più economico ha la possibilità di saldare esclusivamente in piano essendo la viscosità del liquido(rivestimento) molto bassa, la resistenza meccanica del giunto ottenuto non è delle migliori non è idroscopico (non assorbe umidità, ciò è un fatto molto buono perché non compromette la saldatura poiché il vapore acqueo diventa vapore surriscaldato immediatamente, generando delle piccole esplosioni molto pericolose per la saldatura).

2)Il rivestimento acido da un giunto meccanicamente migliore a differenza del precedente è un po' più idroscopico e può essere utilizzato sia per saldature frontali che verticali ascendenti (dal basso verso l'alto). Non possono essere utilizzati nel caso in cui il materiale da saldare (base) contiene alte percentuali di zolfo e fosforo (sono inquinanti presenti nell'acciaio con percentuali dello 0.01%) i materiali acidi contenente materiale ferrosi si legano con gli inquinanti, generando una saldatura poco resistente.

3)I rivestimenti basici fanno ottenere saldature con resistenza meccanica molto elevate (sono quelli preferiti), può essere adoperato anche con acciai di bassa qualità a differenza dei rivestimenti acidi, può essere adoperato in tutte le posizioni ed è idroscopico quindi il rivestimento si inumidisce molto facilmente.

Questi primi tre rivestimenti però hanno una bassa penetrazione(cioè comporta più passate) per evitare ciò utilizziamo quelli a rivestimento cellulosici.

4)I rivestimenti cellulosici hanno però un inconveniente è l'elevata igroscopicità, anche se la profondità di penetrazione di questi elettrodi non è molto elevata (maggiore però dei primi 3)

5)I rivestimenti a rutilo hanno un'alta percentuale di titanio, ciò permette di aumentare la viscosità del liquido, il problema è che non fondendo completamente genera i carburi di titanio(il titanio reagisce con il carbonio) a durezza molto elevata ma ciò indebolisce notevolmente il cordone di saldatura (a causa della diversa durezza nelle varie zone si generano delle zone di elevate tensioni che possono generare delle micro cricche che portano alla rottura).

6)I rivestimenti ad alto rendimento tiene conto del rendimento dell'elettrodo (e non della saldatura) ottenuto dal rapporto del volume del materiale fuso al giunto con il volume dell'anima(senza il rivestimento). Il rendimento è anche del 160% quindi nel rivestimento di questi elettrodi ci sarà della polvere di acciaio(dello stesso materiale dell'anima) che fa aumentare notevolmente il rendimento poiché il materiale fuso sarà maggiore.

7)I rivestimenti ad elevata penetrazione, hanno profondità di penetrazione doppie rispetto ai rivestimenti precedenti (anche di 10mm), consentendo saldature ottenute tramite una sola passata. Nel caso noi abbiamo un giunto cianfrinato vi è necessariamente bisogno di più passate, però se utilizziamo rivestimenti ad elevata penetrazione possiamo ridurre la cianfrinatura.

Come è possibile riconoscere il giunto? Le norme UNI definiscono delle sigle presenti sulle scatole degli elettrodi che ci permettono di riconoscere il tipo di elettrodo che stiamo per comprare. In questa sigla c'è il grado di igroscopicità, il rendimento, le caratteristiche meccaniche dell'anima, il tipo di rivestimento (uno dei 7) e il costo.

Quali sono i vantaggi della saldatura ad arco e gli svantaggi.

-I vantaggi sono: riesce a saldare acciai basso legati(a basso contenuto di carbonio), l'attrezzatura per la saldatura è abbastanza piccola; facilità nella saldatura in campo (ossia fuori dall'azienda).

-Gli svantaggi sono: non riesce a saldare giunti in alluminio (alto reattivi), non riesce a distruggere allumina

(ossido dell'alluminio); la produttività non è molto elevata a causa del basso rendimento, bassa profondità di penetrazione, perdita di tempo per eseguire la cianfrinatura; perdita di tempo per la sostituzione dell'elettrodo; perdita di tempo per la pulizia dei giunti prima della nuova passata.

www.r0x.it

Saldatura TIG

E' una saldatura ad arco (tungsten inert gas) che prevede l'uso di un elettrodo infusibile costituito da tungsteno o da leghe di tungsteno. L'attrezzatura rispetto alla saldatura precedente è differente in quanto l'elettrodo non si fonde ha solo la funzione di generare l'arco elettrico e inoltre si utilizza un gas protettivo in genere elio o argon per la saldatura (gas inerte che non reagisce con il liquido), questo gas allontana l'ossigeno ed evita l'ossidazione del giunto. Non è detto che vi sia bisogno di materiale da apporto, nel caso esso sia necessario viene fornito tramite bacchette (dall'operatore), oppure sotto forma di un filo avvolto su una bobina nel caso di apparecchiatura automatica, (la macchina regola automaticamente tutti i parametri, non deve mantenere la bacchetta ma deve solo muovere la pistola per saldare, questo tipo di saldatura può essere anche automatica eseguita da robot). Nel caso di macchina semiautomatica essa regola differenza di potenziale tra elettrodo e base per rimanere acceso l'arco però il materiale da apporto non viene fornito automaticamente dalla macchina ma manualmente tramite una barretta. (figura della saldatura) L'attrezzatura è più complicata comprende un sistema di raffreddamento tramite acqua un generatore G, una bombola (di elio o argon) e una pistola; vi è una scintilla pilota di elevata intensità di corrente che riscalda notevolmente il gas inerte che permette di ottenere il plasma e di innescare l'arco elettrico senza la necessità di ottenere una corrente di corto circuito. La scintilla pilota non viene poi utilizzata durante la saldatura, nel caso in cui vi sia bisogno di maggiore sicurezza per la saldatura si attiva la scintilla pilota (soprattutto nel caso di macchinario semi automatico, poiché l'operatore non è in grado di rimanere costante la distanza tra pistola e metallo base. I gas di solido non sono mai puri ma miscele **Argon + anidrite carbonica, elio+argon**. L'elettrodo in tungsteno non ha vita infinita esso necessita di un processo di rigenerazione o a volte si sostituisce, l'elettrodo può essere di tre tipi:

1) Tungsteno puro, 2) Tungsteno con torio(4%), 3) Tungsteno con titanio(0.15-1.5%).

1) Il primo elettrodo è quello che inquina più facilmente il cordone (è quello che si usura più facilmente) intensità di correnti fino a 60 ampere;

2) il secondo è più resistente e ci fa ottenere profondità di penetrazione maggiori, riesce a tenere costante l'arco anche con intensità di corrente di 5 ampere;

3) il terzo elettrodo ha un comportamento intermedio tra i primi due (30 ampere).

Il generatore di corrente come funziona? Il sistema giunto elettrodo può essere alimentato in tre modi:

1) in corrente continua polarità diretta, 2) corrente continua polarità indiretta, 3) corrente alternata.

1) Corrente continua polarità diretta: in questo caso il polo negativo viene collegato all'elettrodo e il polo positivo al metallo da saldare. La corrente scorre dall'elettrodo negativo a quello positivo gli elettroni partono dall'elettrodo e giungono al giunto (gli elettroni viaggiano alla velocità della luce). Gli urti degli elettroni generano calore aggiunto a quello dell'arco elettrico. L'elettrodo di tungsteno è continuamente sollecitato da gli urti di ioni positivi, mentre gli elettroni sollecitano il metallo base. Gli ioni positivi non hanno un'influenza elevata come quella degli elettroni. Il calore viene distribuito in questa maniera: il 70% sul metallo base e del 30% sull'elettrodo in tungsteno. È possibile avere quindi un rendimento molto elevato della saldatura, si riesce a saldare molto velocemente perché si riesce a saldare molto velocemente anche la profondità di penetrazione è molto elevata rispetto alle saldature precedenti, riducendo il numero di passate. L'arco elettrico è molto stabile poiché esso è concorde con il flusso di elettroni che è ben determinato (dall'elettrodo al materiale base quindi da una superficie piccola ad una grande).

2) Corrente continua polarità indiretta: in questo caso il polo positivo si trova sull'elettrodo, il polo negativo è collegato al metallo base, in questa maniera il percorso è inverso gli elettroni si spostano verso l'elettrodo mentre gli ioni positivi verso il metallo base, questo fenomeno è molto importante poiché esso permette di rompere lo strato di ossido sul metallo base come ad esempio sull'alluminio, e quindi ci permette di

eseguire saldature su giunti in alluminio. La distribuzione del calore è inversa 70% sull'elettrodo e 30% sul metallo base. Questo è un forte inconveniente che fa riscaldare la pistola per cui abbiamo bisogno di un circuito di raffreddamento nella pistola, un secondo inconveniente è il basso rendimento della saldatura, come anche la ridotta profondità di penetrazione. Nel caso di corrente continua a polarità indiretta il flusso non è ben determinato poiché esso va da una superficie grande ad una piccola (dal metallo base all'elettrodo) seguendo il flusso di elettroni. A causa di questi inconvenienti questo tipo di saldatura viene eseguita esclusivamente per giunti di materiali refrattari come l'alluminio.

3) Corrente alternata: La corrente per un semi periodo sarà positiva per l'altro sarà negativo. Per cui l'elettrodo sarà sollecitato per un semiciclo da elettroni per l'altro semiciclo da ioni positivi, lo stesso vale per il metallo base, per cui la distribuzione del calore è del 50% su elettrodo e sul metallo base. Otterrò quindi un rendimento della saldatura migliore rispetto a quello ottenuto a corrente continua indiretta (il rendimento sarà peggiore rispetto a quello ottenuto a corrente continua diretta), e potrò saldare anche metalli refrattari come l'alluminio. Però a causa della variabilità dei campi magnetici darà luogo ad un soffio magnetico che può far spegnere l'arco elettrico. Questo inconveniente è amplificato dalla diversità delle leghe di cui è formato il metallo base e l'elettrodo. È comunque il tipo di corrente maggiormente utilizzata. Per stabilizzare l'arco elettrico viene rimasta accesa la scintilla pilota per evitare il continuo spostamento della nuvola di plasma polarizzata.

Una delle differenze più consistenti rispetto alla saldatura ad arco è il ridotto spessore del cordone di saldatura che ci permette di saldare anche pannelli più piccoli, si possono saldare metalli come magnesio titanio alluminio (i metalli nobili), e la velocità di saldatura è maggiore. Per spessori più elevati si utilizzano saldatura di tipo MIG, MAG o al Plasma che deriva dalla saldatura TIG. La saldatura TIG è molto costosa sia per il costo iniziale della macchina sia per il costo del gas.

www.r0x.it

Saldatura al Plasma

Nella saldatura al plasma la pistola ha una struttura diversa composta da varie parti: 1) l'elettrodo in materiale inossidabile, 2) un tubo di adduzione di gas plasma genico (elio, argon), 3) un condotto nel quale fluisce un gas inerte (argon elio) che protegge la saldatura come nel caso della saldatura TIG.

C'è una disposizione diversa dell'elettrodo in tungsteno rispetto a quella TIG: esso è interno e non esterno alla pistola. Vi sono due tipi di archi: **1) arco diretto:** che scocca tra l'elettrodo e il metallo base; **2) l'arco trasferito** tra l'elettrodo e il bordo della pistola. 1) L'arco diretto prevede necessariamente il collegamento del polo positivo al metallo base e del polo negativo all'elettrodo di tungsteno (corrente continua polarità diretta). Questo arco concentrato non è in grado di solo di saldare (infatti le correnti in gioco sono molto piccole) ma innesca la trasformazione del gas in plasma che sviluppa tanta energia da generare la saldatura. 2) Quando l'arco è indiretto il materiale da saldare è sollecitato solo termicamente e non elettricamente: in questo caso si possono saldare anche materiali non conduttori ai quali non si può collegare il polo negativo (poiché non permette il trasferimento di corrente). La sorgente di calore in questo caso è il gas plasma genico che lambisce l'arco e diventa plasma ad alta temperatura e permette la saldatura.

Questa è una saldatura autogena che viene utilizzata per piccoli spessori, la saldatura avviene o per **fusione** o per **Key Hole**. Il **metodo di fusione** può prevedere l'utilizzo di metallo da asporto: è utilizzato per spessori molto piccoli (stesso metodo delle altre saldature). Nel **metodo Key Hole** la colonna di plasma inizia la saldatura forando i due lembi da saldare regolando opportunamente la portata di gas plasma e la velocità della pistola: si genera nel foro un moto vorticoso dei gas e dei vapori di metallo il quale moto evita che il metallo liquido esca dal foro, spostando dalla pistola e quindi proseguendo la saldatura il foro con il metallo solidifica e permette la saldatura (si parte da un foro e ci genera un lembo di saldatura). Nel taglio a plasma l'attrezzatura è un po' diversa: possiamo avere tre tipi di pistola che danno vita a tre tipi di taglio differenti: si può avere il taglio **GAS GAS**, il **taglio GAS ARIA** e il **taglio GAS ACQUA**.

1) Il taglio **gas gas** prevede un gas plasma genico e un gas inerte protettivo molto simile a quella utilizzata

nella saldatura al plasma (taglio molto preciso rispetto a quella acetilenica) il gas inerte protegge i lembi dall'ossidazione.

2) Il **gas aria** utilizza il gas inerte per generare il plasma e l'aria come gas che permette di espellere il metallo liquido (quello acetilenica avviene per ossidazione e non per fusione dei lembi).

3) Il taglio **GAS ACQUA** utilizza sempre il gas inerte per generare il plasma e l'acqua per espellere il liquido protegge il giunto tagliato. Questo taglio è preferibile poiché è molto veloce e raffredda il giunto tagliato. Nel caso di taglio ossiacetilenico, i lembi tagliati non combaciano perfettamente a causa della fiamma (figura dei due tagli), le superfici sono molto ruvide e imprecise; Vi è comunque una divergenza anche nel taglio al plasma anche se molto minore rispetto a quella ossiacetilenica.

Motore passo passo: è un particolare motore che funziona ad impulsi (esso non funziona né a corrente continua né a corrente alternata) ci permette spostamenti molto precisi (1 millesimo di grado ogni impulso) e viene utilizzato nelle macchine a controllo numerico. Non si utilizzano motori a corrente continua o alternata a causa della bassa precisione nell'utilizzo nelle macchine a controllo numerico.

www.r0x.it

Saldatura MIG e MAG

Sono saldature autogene che si differenziano solo per il tipo di gas utilizzato. La saldatura MIG usa come gas inerte elio o argon mentre la saldatura MAG usa l'anidrite carbonica. Nella saldatura MIG saldiamo con velocità più elevate e maggiore penetrazione, è possibile saldare qualsiasi leghe anche quelle leggere però i soldi della saldatura MIG sono molti elevati. Quando è possibile tollerare una piccola ossidazione del giunto e una minore qualità dello stesso invece delle MIG si utilizza la MAG la CO₂ potrebbe contribuire all'ossidazione della giunzione in quanto non è altamente protettivo (si unisce al metallo liquido) il gas attivo (CO₂) potrebbe interagire con l'arco elettrico rendendo più complicato il mantenimento dello stesso, per ridurre l'ossidazione del cordone si utilizza un diverso materiale da apporto. La saldatura MAG ha una qualità minore in quanto avviene la dispersione del materiale sul cordone di saldatura (non tutto il materiale va nel giunto da saldare). La MAG è utilizzata per materiali basso leganti ed è più economica. Questo tipo di saldatura è detta anche a filo continuo, l'attrezzatura necessaria è costituita da una macchina elettrica che funziona esclusivamente in corrente continua in polarità inversa, polo positivo sulla pistola, (la saldatura può essere automatica, robot, e semiautomatica, operatore; si utilizza solo questo tipo di polarità poiché è necessario che il metallo da apporto fonda con la stessa velocità con cui esso fuoriesce dalla torcia altrimenti avremmo la saldatura del filo sul metallo base nel caso in cui il metallo da apporto fonde troppo velocemente l'arco potrebbe spegnersi durante la saldatura), c'è la necessità di un motore elettrico in grado di trascinare il metallo d'apporto posizionato in una bobina il quale filo funge da elettrodo nella pistola e tramite l'elettrodo c'è la possibilità di ottenere l'arco elettrico tra il filo continuo e il metallo base (come elettrodo e metallo da apporto un filo proveniente dalla bobina questo filo è metallurgicamente simile al metallo base). È previsto l'utilizzo di una bombola con vari tipi di gas che tramite un tubo vengono immessi nella pistola. La caratteristica elettrica è diversa da quello di tipo ad arco convenzionale, l'intervallo di distanza tra elettrodo e metallo base è maggiore poiché un intervallo di distanza maggiore comporta ad una corrente maggiore che ci permette di saldare più facilmente. Tre modalità di saldatura short arc, spray arc, pulsed arc, ci danno la possibilità di saldare in tutte le posizioni.

La modalità short arc ossia corto circuito, deve avvenire il corto circuito tra elettrodo e metallo base si ottiene generando una corrente di transizione al di sotto della quale il metallo d'apporto liquefa molto lentamente al di sopra della quale la velocità di liquefazione aumenta più velocemente. Nella modalità short arc si lavora sempre al di sotto del valore di corrente di corto circuito, nella fusione del metallo si ottiene una sola goccia grande di elevata viscosità. Questa goccia grande andando a contatto con il metallo

base permette il transito di una corrente di corto circuito che fa aumentare la temperatura e quindi permette la completa liquefazione del metallo da apporto e la formazione del giunto. La corrente di corto circuito passa solo per pochi istanti. Il motivo per cui viene utilizzato questo tipo di operazione è che ci permette di saldare sopra la testa, questo metodo non viene utilizzato per saldature in piano a causa del basso rendimento della saldatura e della bassa penetrazione.

Il metodo spray arc è utilizzato nei casi in cui non ci interessa la viscosità quindi non dobbiamo saldare sopra la testa (si generano molte goccioline), si lavora per valore di corrente di transizione appena superiore. Questa modalità ha un rendimento molto elevato e una profondità di penetrazione maggiore, per cui quando possibile è molto utilizzato.

Il metodo pulsed arc si ottiene sovrapponendo alla corrente continua (inferiore alla corrente di transizione) degli impulsi di corrente superiori alla corrente di transizione, si riducono i tempi di contatto tra metallo da apporto e elettrodo quindi si riduce la viscosità facendo conto che la viscosità non rimane costante, comportamento intermedio dei primi due. Questo tipo di saldatura è molto costosa a causa dell'apparecchio elettrico che regola questi impulsi.

Quando si utilizzano saldature MIG o MAG? TIG costa molto di più della MIG e della MAG ma è di qualità migliore, la MAG è di qualità peggiore della MIG ma di costo inferiore. Si preferisce nei processi industriali la saldatura MIG.

www.r0x.it

Saldatura ad arco sommerso

E' sommersa poiché l'arco scocca sotto uno strato di polvere di sali che hanno la stessa funzione dei rivestimenti degli elettrodi (questa volta non sono incollati). Il metallo da apporto sempre presente non è rivestito ma la protezione della saldatura avviene grazie alla polvere. La macchina è simile a quella utilizzata nella saldatura ad arco convezionale si lavora però sia a corrente continua che alternata. La saldatura è molto simile a quella mig e mag in quanto non si sostituisce elettrodo infatti il metallo da apporto viene fornito tramite un filo continuo tramite un motore elettrico, vi è una tramoggia che contiene la polvere di sali che segue la saldatura; la quantità di polvere che viene fornita è superiore a quella sufficiente alla saldatura (questa parte in più viene recuperata), parte di polvere invece fa parte della saldatura.

Esistono due tipi di polvere: 1) polvere fusa che viene prima fusa e poi tritурata e dopo immessa sulla saldatura (però questa polvere è meno protettiva, non evita completamente la saldatura), 2) polvere agglomerata formata da miscele di polvere che dà maggiore protezione dall'ossidazione.

Questa saldatura è utilizzata per saldatura molto lunghe, lamiere tubi.

Saldatura per pressione e resistenza

E' una saldatura che avviene senza l'utilizzo di materiale da apporto, la saldatura avviene per effetto Joule grazie al passaggio di corrente, tramite una certa pressione, tra i due giunti da saldare. Ottenuta la pressione desiderata si fa passare una certa corrente che permette la saldatura solo nella parte in cui c'è contatto tra i due lembi lì dove la resistenza è massima. La saldatura non avviene tra elettrodo e giunto poiché la resistenza tra questi due materiali è molto bassa. Questo tipo di saldatura viene utilizzato nell'ambito automobilistico, per la saldatura delle lamiere come il cofano, per la velocità alla quale viene eseguita, e per l'automatizzazione possibile. La saldatura per punti deve essere seguita con parametri tali che non vi sia fusione al di fuori della parte centrale del giunto, altrimenti per effetto di contrazione del materiale (ritiro del materiale dopo la fusione) tra la parte liquefatta e quella non liquefatta vi è il distacco dei due giunti e quindi è come se la saldatura non viene eseguita, ciò avviene quando c'è una permanenza dell'impulso troppo elevato. Altro limite di questa saldatura il non utilizzo per la saldatura di bombole, per evitare questo inconveniente si utilizza la saldatura a rulli, in cui i due elementi da saldare passano attraverso due rulli controrotanti le modalità del processo sono simili a quelle della laminazione (passa ovviamente anche della corrente per permettere la saldatura), i due rulli sono quindi gli elettrodi, bisogna regolare la frequenza della corrente e la velocità di rotazione dei rulli per ottenere una saldatura continua. Altro parametro da regolare è la forza di chiusura dei due rulli. Con questo processo

Saldatura per scintillio

Serve a saldare di testa i tubi, si salda contemporaneamente su tutto il perimetro, i due tubi vengono avvicinati e poi pressati tramite una forza F un tubo è incastrato l'altro è incernierato (a volte è possibile far ruotare il tubo incernierato) si fa passare della corrente che genera delle microfusioni tra le due superfici a contatto. Dopo qualche secondo la forza applicata sulla trave incernierata viene aumentata notevolmente prima che si raggiunga il raffreddamento portando alla continua fusione del tubo. Ad un certo istante T_1 ovviamente la corrente assume un certo valore che sarà fatto passare fino ad un istante T_2 . Una volta raffreddato il pezzo la pressione viene eliminata. Durante la saldatura si genera delle scintille di ossido che vengono parte espulse e parte inglobate nel tubo, questo può essere un grande difetto se non vogliamo una riduzione di sezione oppure ossido nei tubi. La corrente varia da 10000 ampere.

Saldatura eterogenea

Nelle saldature eterogenee vi è sempre materiale da apporto, questo materiale deve avere una temperatura di fusione sempre minore del metallo base. Vi sono tre tipi di saldature eterogenee:

- 1) saldo brasatura (800°C) utilizzata per saldare le ghise poiché la ghisa non si salda facilmente essendo un materiale che fonde a temperatura 1142°C la lega di rame viene utilizzata come materiale da apporto.
- 2) brasatura forte (600°C),
- 3) brasatura dolce (200°C), utilizzata per i componenti elettronici, materiale da apporto è una lega eutettica stagno piomba (lega che fonde alla temperatura più bassa, 180°C), si usa una temperatura così bassa per evitare rotture dei componenti elettronici.

Ciò che le differenzia le tre saldature è la temperatura a cui avviene la saldatura. Perché il materiale da apporto riesce a generare una saldatura?

Avvengono due fenomeni durante la saldatura: si ha un legame meccanico tra il metallo da apporto e il metallo base il metallo fuso entra nelle capillarità del metallo base generando un buon legame, si ha un legame chimico molto forte infatti molecole di rame ad esempio si lega chimicamente con il ferro generando un legame molto forte. Questi sono i due motivi che permettono una buona saldatura tra metallo base e metallo da apporto.

Zona termicamente alterata (ZTA)

Alterando un giunto tramite una saldatura possiamo individuare tre zone:

- 1) la zona 1 è quella della saldatura vera e propria (dove è avvenuta la saldatura con o senza metallo da apporto),
- 2) la zona 2 non è stata interessata da fusione ma hanno subito temperature molto elevate,
- 3) la zona 3 è quella parte che non ha raggiunto temperature elevate e quindi è rimasta inalterata.

La zona 1 interessa quella che fonde il materiale e in essa interessano fenomeni che possono avvenire come l'ingrossamento del grano che dipende anche dalla velocità a cui il metallo si raffredda, è possibile risolvere il problema altrimenti potremmo avere problemi meccanici a causa della differenza di grandezza dei grani (giunto e materiale base), altro difetto possibile (solo negli acciai) sono le cricche a caldo (più zolfo e fosforo è presente negli acciai più l'acciaio è scadente) questi due materiali hanno un'alta affinità a temperature elevate e formano una lega che non ci dà fastidio però quando la temperatura si abbassa il fosforo e zolfo precipitano e generano dei grumi che precipitano riducendo sia la sezione resistente della saldatura sia perché danno luogo a delle microscopiche lesioni che possono essere un innesco quando il giunto è sottoposto a fatica. Nella prima zona possono introdursi delle scorie che possono rimanere imprigionate e causare dei vuoti nel giunto saldato. Nella zona 2 si raggiungono alte temperature che possono alterare il materiale, si può avere un distacco tra cordone e zona 2 a causa del raffreddamento e del conseguente distacco delle zone per i differenti coefficienti di dilatazione termica delle due zone (a causa delle diversità chimiche), si può avere anche in fase solida (zona 2) un ingrossamento degli atomi liberi (dei grani). Nella zona 2 si può avere quindi l'ingrossamento dei grani, nella zona 2 vi possono essere

anche le cricche a freddo dovute a rivestimenti poco igroscopici (quindi H₂O, potrebbe alterare anche la zona 2). Le cricche a caldo sono eliminabili utilizzando Sali che reagiscono con lo zolfo oppure utilizzando acciai di migliore qualità, le intrusioni di materiali non sono eliminabili, i difetti dei grani sono eliminabili facendo trattamenti termici come ad esempio ricottura di distensioni.

www.r0x.it