



DE Department of
Engineering
Ferrara

Appunti

Tecnologie Meccaniche II

DE

Department of Engeneering Ferrara

Via Saragat 1, 44122 Ferrara

<https://de.unife.it>

Università degli Studi di Ferrara

Via Ludovico Ariosto, 35 - 44121 Ferrara

<https://www.unife.it>

Revisioni

Revisione	Data	Autori	Descrizione
1.0	29.01.2021	XX YY	document created
1.1	28.02.2023	LN	Prima compilazione con modifiche
1.2	01.03.2023	LN	Applicazione modello alla necessità
1.3	18.04.2023	LN	Continuazione con la produzione del testo, aggiunti capitoli 2, 3, 4

Università degli Studi di Ferrara

[XX] Dr. Name Surname - name.surname@xxx.com
[YY] Dr. Name Surname - name.surname@xxx.com
[LN] Nicolè Lorenzo - lorenzo.nicole@edu.unife.it

Abstract

In questo elaborato si vuole riportare gli appunti circa le lezioni di Tecnologie Meccaniche II.

Prefazione

...

Acknowledgements

Tutto ciò che verrà trattato a lezione verrà riportato ed addattato in questo elaborato.

Indice

Abstract	i
Prefazione	ii
Acknowledgements	iii
Indice	iv
Elenco delle figure	viii
Elenco delle tabelle	x
Todo list	xi
I Lavorazioni su Lamiere	1
1 Introduzione	2
1.1 Proprietà meccaniche sulla deformabilità	2
1.1.1 Tensione a freddo nelle lavorazioni a freddo	2
1.1.2 Snervamento discontinuo	3
1.2 Tessitura e anisotropia	3
1.2.1 Proprietà modificate	3
1.2.1.1 Reticolo esagonale compatto	4
1.2.1.2 Reticolo cubico	5
1.3 Effetti delle lavorazioni a freddo	5
1.3.1 Effetti della velocità di deformazione	7
1.4 Limiti di formabilità delle lamiere	8
1.4.1 Come mai le lamiere?	8
1.5 Materiali per lamiere	9
1.5.1 Acciai	9
II Sinterizzazione	11
2 Sinterizzazione	12
2.1 La lavorazione	12
2.1.1 Produzione delle polveri	13
2.1.1.1 Caratterizzazione delle polveri	14
2.1.2 Preparazione delle polveri	16
2.1.2.1 Miscelazione	16

III Asportazione di truciolo	17
3 Lavorazioni per asportazione di truciolo	18
3.1 Introduzione	18
3.2 Taglio ortogonale ideale	19
3.2.1 Fattore di attrito	21
3.2.2 Valutazione delle forze	21
3.3 Taglio ortogonale realistico	24
3.3.1 Truciolo continuo	25
3.3.1.1 Truciolo continuo ondulato	26
3.3.1.2 Truciolo continuo a dente di sega	26
3.3.2 Truciolo discontinuo	26
3.3.3 La rottura del truciolo	26
3.4 Taglio obliquo	27
3.4.1 Tornitura	27
3.4.2 Calcolo della forza ed energia	27
3.4.3 Temperature	30
3.4.4 Fluidi da taglio	31
4 Lavorazioni al trapano	32
4.1 Tipologie di trapani	34
5 Fresatura	36
5.1 Fresatura periferica	36
5.2 Fresatura verticale	36
5.2.1 Fresa a codolo	37
6 Altre Lavorazioni	39
6.1 Taglio con sega	39
6.2 Broccatura e taglio di filetti	39
6.2.1 La broccatura	39
6.2.2 Filettature	39
6.3 Aspetti conclusivi	39
6.4 Produzione di ingranaggi	40
7 Variabili di processo per lavorazioni in asportazione di truciolo	44
7.1 Durata lavorazione e potenza macchina	45
7.1.1 Esempio applicativo	49
8 Macchine Utensili	50
8.0.1 Esempio di controllo numerico	51
8.1 Ottimizzazione delle lavorazione per asportazioni di truciolo	51
9 Abrasione	54
9.1 Rettifica	54
9.1.1 Fluidi da rettifica	57
9.1.2 Lavorazioni di rettifica	57
9.1.2.1 Obiettivi della rettifica	58
9.1.2.2 Nastri e carte vetrate	58
9.1.2.3 Levigatura	59
9.2 Abrasione non legata	59
9.2.1 Lappatura	59
9.2.2 Burattatura	60
9.2.3 Sabbiatura	60

9.3 Considerazioni finali	60
9.3.1 Aspetti progettuali	61
IV Lavorazioni non convenzionali	62
10 Lavorazioni non convenzionali	63
10.1 Lavorazioni chimiche	64
10.2 Lavorazioni elettrochimiche	64
10.2.1 Elettroerosione	66
10.2.2 Elettroerosione a tuffo	66
10.2.3 Elettroerosione a filo	66
10.3 Lavorazioni con fasci alto contenuto energetico	67
10.3.1 A fascio elettronico	67
10.3.2 Taglio Laser	68
10.3.3 Taglio al plasma	69
10.3.4 Taglio al cannello ossiacetilenico	69
10.4 Taglio ad acqua	69
V Tecniche di giunzione	71
11 Tecniche di giunzione	72
11.1 Classificazione delle tecniche	72
11.2 Giunzioni meccaniche	74
11.2.1 Rivettatura	74
11.2.2 Grafettatura	74
11.2.3 Aggraffatura	74
11.2.4 Giunzione a deformazione plastica	74
11.2.4.1 Snap-fit	76
11.2.4.2 Ribattitura	76
11.3 Saldature allo stato solido	77
11.3.1 Saldature a freddo	77
11.3.2 Saldature per diffusione	78
11.3.3 Saldature a caldo	78
11.3.4 Saldatura a frizione	78
11.3.4.1 Friction Stir Welding	80
11.4 Saldature a fusione	81
11.4.1 Caratteristiche del giunto	82
11.4.2 Difetti e qualità della saldatura a fusione	83
11.4.3 Intensità di energia	84
11.5 La saldabilità	85
11.6 Saldatura a resistenza	85
11.6.1 Saldatura su rilievo	86
11.6.2 Saldatura a scintillio	87
11.7 Saldature ad arco	87
11.7.1 Saldatura ad arco con elettrodo permanente	88
11.7.2 Saldatura ad arco al plasma	88
11.7.3 Saldatura ad arco con elettrodo consumabile	89
11.7.4 Saldatura ad arco con elettrodo rivestito	90
11.7.5 Saldatura ad arco con fondente intubato	90
11.7.6 Saldatura ad arco sommerso	90
11.7.7 Saldatura ad arco con elettroscoria	91

11.7.8 Saldatura ad arco a perno	91
11.8 Automazione delle saldatura	91
11.9 Saldature chimiche	92
11.9.1 Saldatura con cannello ossiacetilenico	92
11.9.2 Saldatura alla termite	92
A Acronimi	93

Elenco delle figure

1.1	Prove di trazione	3
1.2	Esagonale compatto	5
1.3	Reticoli cubici	6
1.4	Andamenti tipici di un acciaio dopo ricottura	7
1.5	Motivazioni delle lavorazioni a caldo	9
2.1	Processi di produzione in sinterizzazione	13
2.2	Principali modalità di atomizzazione e realizzazione delle fibre	15
3.1	Taglio Ortagonale	20
3.2	Scomposizione delle forze per il taglio ortogonale	22
3.3	Andamenti delle forze per il taglio ortogonale	23
3.4	Tipologia di forze prementi sulla faccia dell'utensile	24
3.5	Taglio ortogonale reale	25
3.6	Esempi di rompi-truciolo	27
3.7	Il taglio obliquo	28
3.8	Esempio di utensile per tornitura	29
3.10	Temperature durante le lavorazioni ad asportazione	31
3.9	Analisi termica dell'asportazione di truciolo	31
4.1	Alcune punte da trapano per diverse forature	32
4.2	Varie tipologie di punte da trapano	33
4.3	Velocità consigliate di trapanatura	34
4.4	Alcuni esempi di trapani e dettaglio punta alesatrice	35
5.1	Esempio di fresatrice orizzontale	36
5.2	Fresatura in opposizione e concordanza	37
5.3	Esempio di fresa verticale	37
5.4	Schematizzazione della fresatura a codolo	38
5.5	Esempio di frese a testa sferica	38
6.1	Breve descrizione delle seghe industriali	40
6.2	Broccatura	41
6.3	Utensili per filettature	41
6.4	Riepilogo lavorazioni per asportazione di truciolo	42
6.5	Indicazioni sulla produttività delle specifiche lavorazioni per asportazione di truciolo	42
6.6	Alcuni utensili per la produzione di ingranaggi	43
7.1	Relazione tra durezza del materiale lavorato, velocità della lavorazione e avanzamento dell'utensile.	46
7.2	Prima velocità per materiali non ferrosi	47
7.3	Parametri modificatori per lavorazioni diverse da quelle di riferimento (tornitura in sgrossatura)	48
7.4	Specifiche durezza dei materiali	49
8.1	Esempi di programmazione per macchine CNC	50

8.2 Esempio di Macchina CNC	51
8.3 Rappresentazione della funzione (8.8)	53
9.1 Principali lavorazioni abrasive	55
9.2 Casistiche in cui si può trovare la particella tagliente	55
9.3 Tabella delle energie specifiche di lavorazione per diversi materiali	56
9.4 Descrizione della sigla per le mole	57
10.1 Classificazione lavorazioni non convenzionali	63
10.2 Modalità di attacco chimico	64
10.3 Risultati ottenibili con le lavorazioni chimiche	65
10.4 Schema generale delle lavorazioni elettrochimiche	65
10.5 Possibilità dell'elettroerosione	67
10.6 Schema funzionamento tubo catodico	68
10.7 Esempi di taglio laser	68
10.8 Altre lavorazioni non convenzionali	69
11.1 Fissaggi	73
11.2 Tipologie di rivetti	74
11.3 Rivettatura cieca	74
11.4 Considerazione sulla corretta rivettatura	75
11.5 Fissaggi meccanici di graffettatura, aggraffatura e snap-fit	75
11.6 Alcuni esempi di fissaggio per deformazione plastica	76
11.7 Processo di ribattitura	76
11.8 Ulteriori metodi di fissaggio meccanico utilizzati	76
11.9 Saldature allo stato solido col dettaglio delle lavorazioni a freddo	77
11.10 Principali tecniche di saldatura a freddo	79
11.11 Realizzazione per saldatura a diffusione di profili utilizzati in aeronautica	80

Elenco delle tabelle

1.1 Vantaggi e svantaggi delle lavorazioni a freddo	6
---	---

Todo list

Figure: 1.3 (1) Da aggiungere il grafico tridimensionale sulla deformazione a freddo.	5
Figure: 1.3 (2) Aggiungere proiezioni del grafico precedente in due dimensioni.	6
Figure: 9.1 (3) Aggiungere le figure delle lavorazioni di rettifica	57
■ 9.1 (4) Aggiungere i dettagli	58
■ 9.1 (5) Aggiungere dati	58
■ 9.1 (6) Completare l'esercizio	58
Figure: 9.1 (7) Confronto abrasivi e superabrasivi	59
Figure: 9.2 (8) lappatura	59
Figure: 9.2 (9) Utensile ad ultrasuoni	59
Figure: 9.2 (10) Burattatura	60
Figure: 9.3 (11) Tabella di confronto lavorazioni	60
Figure: 9.3 (12) Grafico limiti geometrici per lavorazione	60
■ 9.3 (13) Completare elenco	61
■ 11.3 (14) Aggiungi	78
Figure: 11.3 (15) Saldatura per frizione	78
Figure: 11.3 (16) Processo di saldatura per attrito	80
■ 11.4 (17) aggiungere	81
Figure: 11.4 (18) cordone saldatura profondo	81
Figure: 11.4 (19) cordone di saldatura fino	81
Figure: 11.4 (20) Caratteristica saldatura	81
Figure: 11.4 (21) Dimensione intergranulare nella ZTA	82
Figure: 11.4 (22) Grafico intervalli di durezza	83
■ 11.4 (23) aggiungi	83
Figure: 11.4 (24) Confronto 3 saldature	83
Figure: 11.4 (25) confronto altri errori	83
Figure: 11.6 (26) Saldatura a resistenza	85
Figure: 11.6 (27) Esempio Mini Minor	86
Figure: 11.6 (28) Processo di saldatura a resistenza	86
Figure: 11.6 (29) Saldatura su rilievo	86
■ 11.6 (30) Le figure devono essere poste come sottofigure commentate	86
Figure: 11.6 (31) Saldatura a resistenza a rulli	86
■ 11.6 (32) Aggiungere il commento alla saldatura a rulli	87
■ 11.6 (33) Completa	87
Figure: 11.6 (34) Esempio saldatura delle rotaie	87
Figure: 11.7 (35) Schema saldatura ad arco	87
Figure: 11.7 (36) Acronimi tipologie di saldatura ad arco	88
Figure: 11.7 (37) Tecnica di saldatura ad arco trasferito e non trasferito.	89
Figure: 11.7 (38) Confronto tra saldature	89

Figure: 11.7 (39) Saldatura FCAW	90
Figure: 11.7 (40) saldatura SAW	90
11.7 (41) Aggiungi	91
Figure: 11.7 (42) SWP	91
11.8 (43) Da rivedere dalle slide	91
11.8 (44) aggiungi	91
11.8 (45) Aggiungi ref	91
11.9 (46) Aggiungi la reazione chimica	92
11.9 (47) Aggiungi le formule chimiche	92
11.9 (48) aggiungi	92
Figure: 11.9 (49) Cannello e confronto qualità	92
Figure: 11.9 (50) Tipi di fiamme	92
11.9 (51) integra con le slide	92

Parte I

Lavorazioni su Lamiere

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 Proprietà meccaniche sulla deformabilità

Per un materiale metallico, le lavorazioni che si basano sulla deformazione del materiale sono:

- Forgiatura;
- Laminazione;
- Estrusione;
- Trafilatura;

Di queste, le prime 3 provocano compressione nel materiale che, dunque, permettono al materiale metallico di mantenere le caratteristiche meccanico-fisiche. Essendo comunque compresso, il materiale risulta più duttile. Per quanto riguarda invece la trafilettatura, in questo caso si ha una trazione del materiale. Il che si traduce in una perdita di duttilità dovuta alla deformazione, prima elastica e poi plastica, del materiale. Ciò altera le proprietà meccanico-fisiche. Tutto ciò è vero in particolare per lavorazioni massive: operazioni che vanno a modificare tutte e tre le dimensioni del materiale.

Se invece si prendono in considerazione le lamiere: prodotti di materiale metallico noti per aver un'ombra delle tre dimensioni particolarmente ridotta, lo spessore nello specifico, la situazione cambia. Infatti non si può più considerare una qualsiasi deformazione in tutte e tre le dimensioni spaziali. Inoltre, comprimendo una lamiera si rischia di piegarla. Dunque le lavorazioni su lamiera sono in genere, ma non sempre, per trazione. Inoltre si vuol ricordare come la laminazione non sia una lavorazione su lamiera in quanto si ipotizza che la lamiera sia già laminata, dunque pronta a successivi trattamenti. La maggior parte delle lavorazioni su lamiera vengono eseguite a freddo: ciò, come si vedrà in seguito, garantirà il mantenimento di determinate caratteristiche meccanico-fisiche.

1.1.1 Tensione a freddo nelle lavorazioni a freddo

Se si osserva il grafico della prova di trazione 1.1a si osservano 2 particolari zone: comportamento elastico del materiale e comportamento plastico. Ricordando l'equazione constitutiva del materiale ovvero

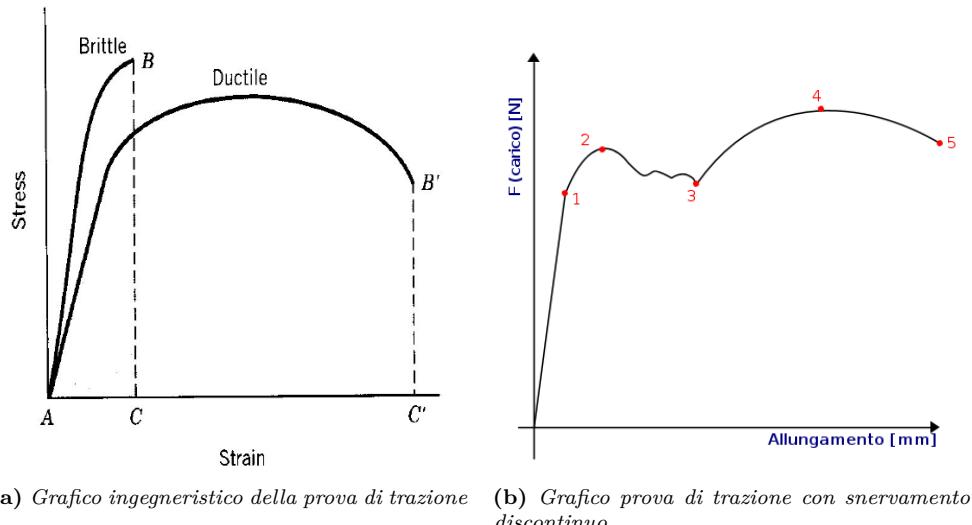
$$\sigma = K\epsilon^n \quad (1.1)$$

Dove i termini di 1.1 sono:

- σ tensione [MPa]
- K coefficiente di resistenza
- ϵ fattore di incrudimento
- n Sensibilità alla velocità di incrudimento

Dalla 1.1 si può intuire che il fattore K lo si volgerà particolarmente grande al fine di garantire un'alta resistenza allo snervamento. La stazione si manifesta su una sezione "più debole" (impurità, vuoti, ecc...), da cui avrà luogo una deformazione della sezione stessa. Dunque sulla sezione si manifesta incrudimento dovuto proprio alla trasformazione. L'incrudimento renderà la sezione molto più dura rispetto alle circostanti. Perciò si può dimostrare come il valore per cui la strizione si stabilizza è proprio pari al coefficiente n . Sotto queste ipotesi allora vale:

$$\epsilon = n \quad (1.2)$$

**Figura 1.1:** Prove di trazione

In generale si preferisce utilizzare materiali con coefficiente n molto alto: per cui il materiale si deforma molto prima della strizione. Dunque è più **duttile**.

1.1.2 Snervamento discontinuo

Lo snervamento discontinuo è tipico dei metalli che hanno basso valore interstiziale. Tipicamente, a fine lavorazione di tali metalli si presentano le **bande di Lüder**. Di fatto non costituiscono un difetto tecnologico, piuttosto puramente estetico. Siccome le lamiere vengono utilizzate anche per coperture, tali bande fanno sembrare il prodotto più scadente (Anche se di fatto non lo è). Il grafico 1.1b rappresenta il comportamento di un materiale a snervamento discontinuo.

1.2 Tessitura e anisotropia

La tessitura è la descrizione della presentazione, sia estetica che prestazionale, del materiale. Logicamente dipende direttamente dai grani cristallini presenti nel materiale.

Quando questi si presentano in forma allungata (es. post laminazione), portano a delle differenze dal punto di vista meccanico-fisico del prodotto. Portano **anisotropia**. Già si sa che i piani preferenziali di scorrimento sono quelli ad alte densità atomica e, nel caso non ce ne siano a sufficienza, il materiale tenderà a costituirne di nuovi¹.

1.2.1 Proprietà modificate

Ricordando i principali termini di descrizione delle proprietà meccanico-fisiche dei metalli:

γ Densità di snervamento

T_s Resistenza meccanica

Inoltre anche altre proprietà, non necessariamente meccaniche, vengono modificate da eventuali lavorazioni a freddo. Allora: considerando una lamiera lavorata a freddo vale:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad \underbrace{\rightarrow}_{\text{per lamiere}} \quad \epsilon_l + \epsilon_w + \epsilon_t = 0 \quad (1.3)$$

¹Si vedrà anche in seguito che la questione dei piani di scorrimento è cruciale per la qualità del materiale

La 1.3 definisce la *costanza della deformazione del volume principale*. Si considerano pedici diversi da quelli classici per un volume massivo in quanto stiamo considerando una lamiera, per cui i nuovi pedici indicano:

l *length*

w *width*

t *thickness*

Si ricordano, inoltre, le deformazioni per le principali grandezze:

$$\epsilon_w = \ln \frac{w_1}{w_0} \quad \epsilon_t = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (1.4)$$

Dove w_1 e h_1 sono le misurazioni dopo la prova di trazione, mentre w_0 e h_0 sono i valori iniziali. A partire dai termini sopraelencati, si può definire il parametro r definito come nella 1.5.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (1.5)$$

Non ha un nome specifico, nonostante rappresenti la quantità di deformazione che una lamiera subisce se sottoposta a trazione. In particolare, le due deformazioni considerate sono quella in termini di spessore e quella in larghezza. Se il materiale avesse:

$$r = 1 \quad (1.6)$$

potrebbe essere considerato isotropo. Più correttamente si definiscono **isotropi** tutti quei materiali per cui vale la 1.7.

$$r_0 = r_{45} = r_{90} = 1 \quad (1.7)$$

dove i fattori r sono il rapporto tra le deformazioni come sopra però ponendo la trazione con angolo tanto quanto indicato dal pedice:

r_0 Direzione laminazione

r_{45} Direzione intermedia

r_{90} Direzione ortogonale

Altrimenti il materiale è semplicemente **anisotropo**. L'anisotropia può essere un problema in termini di lavorazione di una lamiera: si prenda come esempio il caso della realizzazione di un contenitore per estrusione. Se il materiale fosse isotropo allora la deformazione avverrebbe in maniera uniforme su tutta la lamiera. Se, invece, il materiale è anisotropo, la deformazione diversificata produce variabilità sul bordo del prodotto. Successivamente sarebbe necessario un'operazione di *trimming* per eliminare il materiale in eccesso. L'anisotropia si può verificare in diverse forme.

$r_0 = r_{45} = r_{90} \leq 1$ allora si parla di **Anisotropia normale** alla superficie della lamiera. Se ne può misurare il valore tramite:

$$r_m = \bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2 * r_{45}}{4} \quad (1.8)$$

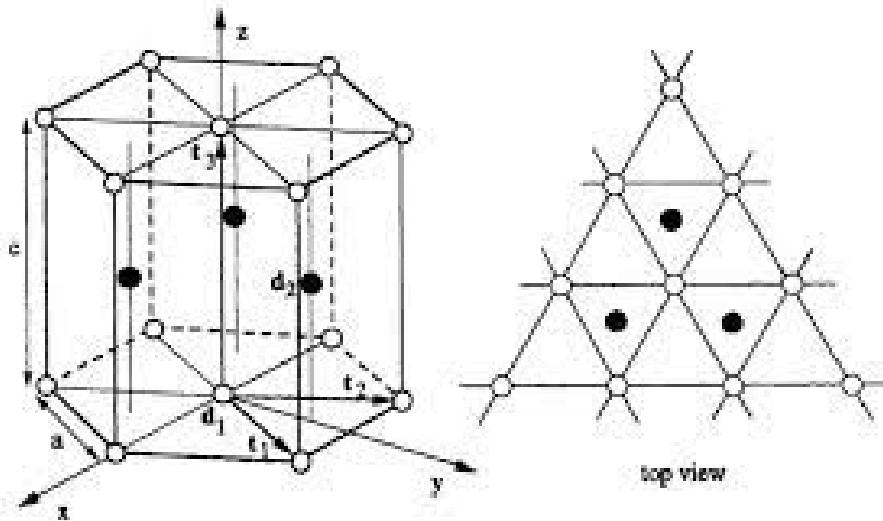
$r_0 \neq r_{45} \neq r_{90}$ allora si parla di **compresezione di anisotropia planare e normale** da cui si può ottenere una misura

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2 * r_{45}}{2} \quad (1.9)$$

In generale l'anisotropia si verifica quando, durante la laminazione, i reticolati cristallini si muovono per garantire i piani di scorrimento. Ora si vuole dare una rapida visione delle principali strutture cristalline nei materiali.

1.2.1.1 Reticolo esagonale compatto

I piani di scorrimento si trovano sulle superfici di base del prisma compatto. Si definisce *compatto* perché il rapporto tra l'altezza del prisma e la lunghezza di un lato di base, ovvero c/a considerando i riferimenti della figura 1.2. Si osserva che il rapporto 1.5 per materiali con reticolo cristallino High c/a

**Figura 1.2:** Esagonale compatto

è prossimo a a 0:

$$r_{\text{High } c/a} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \longrightarrow 0 \quad (1.10)$$

Nella maggior parte dei casi si vuole un rapporto r il più alto possibile. Così ché la deformazione della lamiera interessa la larghezza piuttosto dello spessore. Altrimenti potrebbero sorgere problemi sulla rigidità della lamiera anche senza eseguire alcuna lavorazione. Potremmo allora dire che:

- n indichi il ritardo nella deformazione (sensibilità alla deformazione)
- r indichi che tipo di deformazione si avrà.

Nel caso di materiali ad esagonale compatto ma con rapporto c/a basso si osserva:

$$r_{\text{Low } c/a} \longrightarrow \infty \quad (1.11)$$

Ad esempio per guadagnare duttilità nel titanio (Ti) si effettuano lavorazioni a caldo.

1.2.1.2 Reticolo cubico

Per i metalli cristallizzanti a Cubico a Facce Centrate (**CFC**) si osserva un valore di $r \approx 0.4 \div 0.8$. Mentre per i metalli a Cubico a Corpo Centrato (**CCC**) si osservano valori di $r \approx 1$.

1.3 Effetti delle lavorazioni a freddo

Come già accennato in precedenza, le lavorazioni a freddo permettono di ottenere da un materiale metallico sì la deformazione voluta. In più si garantisce al materiale maggiore durezza. Ciò è dovuto allo scorrimento delle dislocazioni, durante la lavorazione del materiale, che vengono bloccate dal bordo del grano cristallino. Di contro bisogna tenere a mente che una maggiore durezza impone una minore duttilità, considerazione che serve nel caso la lamiera debba subire diverse lavorazioni prima di divenire prodotto finito.

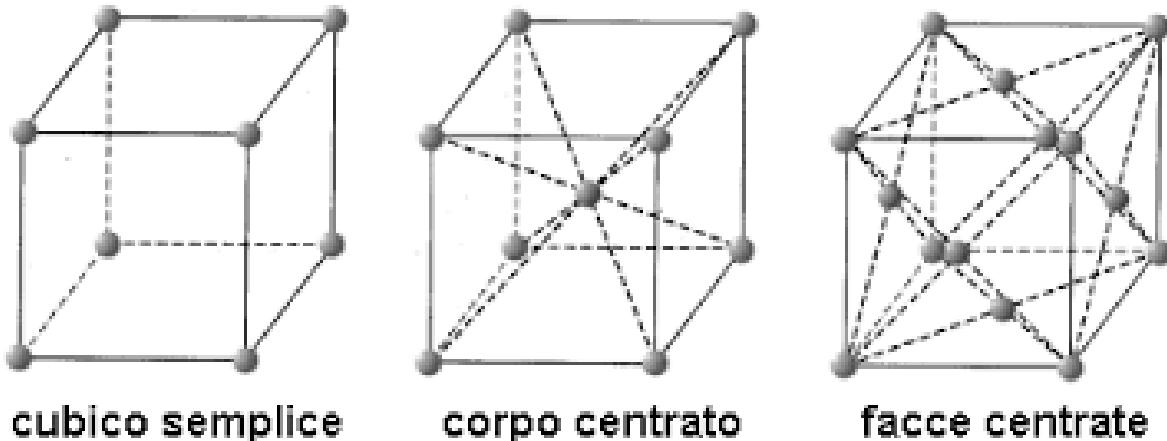
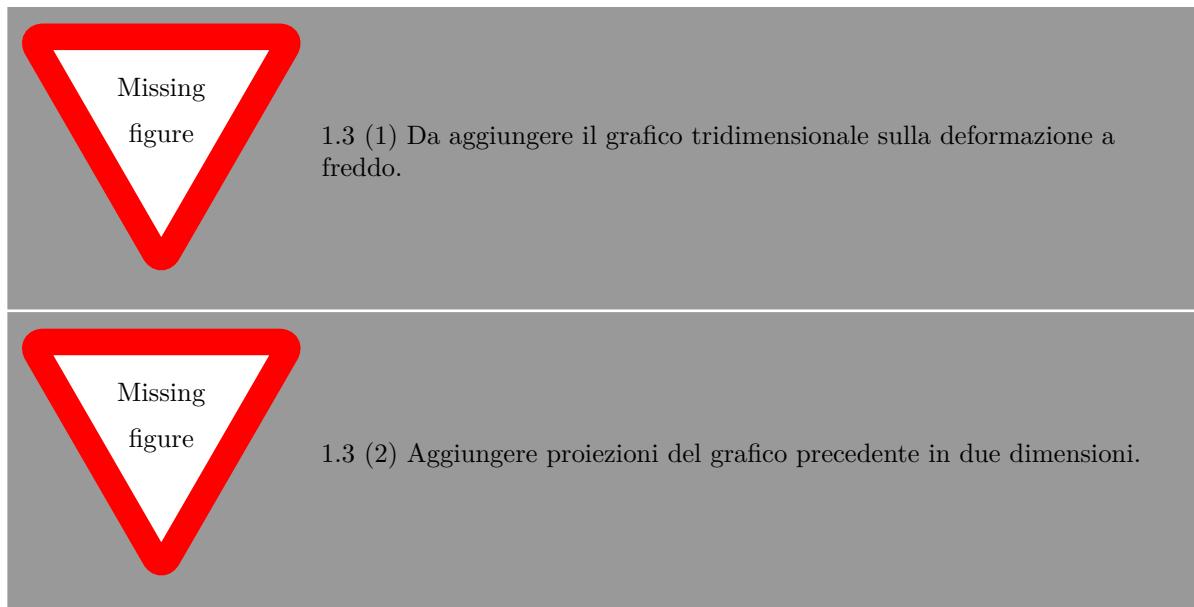


Figura 1.3: Reticoli cubici



Dunque le lavorazioni a freddo hanno diversi vantaggi e svantaggi come descritto nella tabella 1.1. Per ovviare ad alcuni problemi evidenziati alla tabella 1.1, si può pensare di ricorrere a ricotture parziali o complete. Alcuni esempi sono riportati alle figure 1.4

In particolare:

Lavorazione a freddo $T < 0.3T_m$ evidenzia un chiaro incrudimento del materiale, che ne risulterà indurito.

Tabella 1.1: Vantaggi e svantaggi delle lavorazioni a freddo

Vantaggi	Svantaggi
Metodo economico per indurire il materiale Il prodotto è quasi finito finite le lavorazioni (in genere)	Pressione sugli stampi più alti Bisogna trovare un compromesso tra durezza desiderata e consumo delle attrezzature

Ricotture di distensione $0.3T_m < T < 0.5T_m$ Permette una ridistribuzione delle dislocazioni ma senza ricristallizzazione

Ricottura di ricristallizzazione $T > 0.5T_m$ Non è scontata la ricristallizzazione ma si ha una distensione dei grani, annullando eventuali lavorazioni a freddo precedenti.

Nonostante ciò le ricotture possono essere molto interessanti per le caratteristiche meccaniche dei materiali metallici. Ipotizzando di voler raggiungere un determinato obiettivo di duttilità del materiale. Si può raggiungere tale obiettivo semplicemente lavorando il materiale a freddo, dando una certa deformazione al pezzo. Sappiamo che così il pezzo sarà più indurito di conseguenza. C'è un ulteriore modo: se si incridisce di più rispetto all'obiettivo, attraverso una deformazione maggiore di quella desiderata, si può pensare di sfruttare una ricottura di distensione per ritornare al livello di duttilità richiesto ma garantendo un livello di durezza maggiore rispetto alla sola lavorazione a freddo. In genere vale anche il viceversa. Tale metodo viene chiamato *forte incrudimento con ricottura parziale*. Alla figura 1.4a è graficato l'andamento delle tensioni di snervamento e rottura dopo una ricottura completa. Si osserva che vengono perse completamente le caratteristiche meccaniche guadagnate tramite incrudimento per lavorazione a freddo. Alla figura 1.4b viene mostrato il processo per ottenere una determinata tensione di snervamento dopo forte incrudimento.

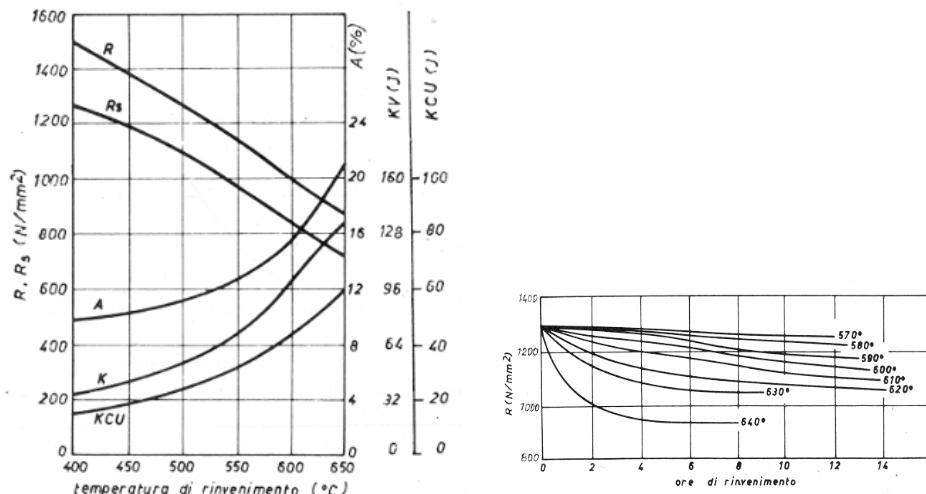
Ipotizzando una ricottura completa, ovvero portando il materiale a una temperatura $T > 0.5T_m$, si può avere ricristallizzazione del metallo che porta grani a dimensioni maggiori. Bisogna anche tenere a mente l'influenza del tempo su questi processi di ricottura.

1.3.1 Effetti della velocità di deformazione

Come visto nell'equazione costitutiva 1.3, il materiale viene univocamente definito tramite tale equazione. In realtà è necessario "mettere in relazione" anche il tempo. Considerando l'equazione costitutiva per lavorazione a caldo:

$$\sigma_f = C \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (1.12)$$

Da cui si può osservare che se la temperatura aumenta allora C diminuisce e contemporaneamente m cresce. Infatti:



(a) Duttilità, snervamento e rottura dopo ricottura (b) Durata ricottura in base allo snervamento richiesto

Figura 1.4: Andamenti tipici di un acciaio dopo ricottura

C è il coefficiente di resistenza alla temperatura del materiale;

m è l'indice di sensibilità alla velocità di deformazione;

$\dot{\epsilon}$ è la velocità di deformazione descritta come V/h

Con una strizione diffusa, l'incrudimento è diffuso su tutto il provino. E, come si era visto anche in precedenza, ciò migliora le caratteristiche meccaniche. Se invece, la strizione è localizzata rischia di indebolire il materiale. Il fatto che sia locale indica che il materiale in quel punto è più debole e può rompersi più facilmente.

1.3.1 Definizione (Considerazione): *In generale si privilegiano metalli che abbiano alta sensibilità al incrudimento e maggiore sensibilità alla velocità di strizionamento.*

Si vogliono ricordare i valori per cui m porta ad un determinato comportamento il materiale:

$-0.05 < m < 0.05$ Cold working

$0.05 < m < 0.3$ Hot working

$0.3 < m < 0.7$ Superplasticity²

$m > 1$ Newtonian fluid

1.4 Limiti di formabilità delle lamiere

1. Manifestazione di strizioni localizzate.
2. Con strizione diffusa, prima della rottura.
3. Generazione delle bande di Lüder
4. Generazione della superficie a buccia d'arancia

A parte le prime due che portano a conseguenze meccaniche per cui la lamiera effettivamente non può più essere vendute o utilizzate per la produzione. La terza ha una motivazione puramente estetica: siccome le lamiere possono essere utilizzate come copertura, tale superficie può essere problematica. Non lo è dal punto di vista meccanico-fisico. La superficie a buccia d'arancia anch'essa non influenza sulle prestazioni meccaniche del prodotto³. La formazione è dovuta alla rotazione dei grani cristallini durante eventuali lavorazioni. La soluzione è quella di sfruttare, per le lamiere in particolare, materiali a grana fine.

1.4.1 Come mai le lamiere?

Le lamiere vengono largamente impiegate per la produzione di oggetti metallici, e le tecniche che verranno trattate in questo corso volgono a sfruttare tale prodotti in larga scala. Alcuni motivi dell'espansione del loro impiego sono:

- A parità di prodotto, un oggetto pieno e uno ricavato tramite lavorazione di lamiera risulta più pesante.
- La laminazione è una lavorazione molto efficiente: si producono tanti pezzi in poco tempo e con minore energia.

²Valori di deformazione tipici delle lavorazioni con materiali plastici

³C'è da dire che una maggiore porosità superficiale potrebbe stimolare la generazione di cricche in alcune lavorazioni.

- La laminazione permette di raggiungere risultati molto accurati (in termini di spessori e qualità del laminato) con poche risorse, dunque ad un costo molto basso.
- La lamiera è un prodotto "quasi" pronto all'uso.

1.5 Materiali per lamiere

I materiali che in industria vengono più comunemente utilizzati per lamiere sono ad esempio:

- Acciai, dolci + inossidabili
- Leghe di allumino
- Ottone
- Bronzi
- Rame
- Magnesio
- Titanio

Sebbene la maggior parte dei prodotti in lamiera siano lavorati a freddo, ci sono alcuni materiali che necessitano di lavorazioni a caldo. In particolare alla figura 1.5, si presentano i motivi per cui sia necessaria la lavorazione a caldo

Ora si vedranno nel dettaglio tutte le caratteristiche e motivazioni per cui viene scelta una determinata categoria di materiali.

1.5.1 Acciai

In genere si preferiscono acciai che abbiano un tenore di carbonio minore del 0.15%, ovvero gli acciai dolci. Inoltre, bisogna includere gli acciai inossidabili: sia per motivi di mercato, che necessità operative dei prodotti finali. Essendo una gamma decisamente ampia di materiali, le lavorazioni possibili sono molteplici:

lavorazioni a caldo non vengono sfruttate troppo per gli acciai in quanto si preferisce mantenere l'incrudimento ottenuto tramite la lavorazione a freddo. Anche se si impiega per:

- Ottenere maggiore duttilità per il materiale.
- Quando le forze in gioco sono eccessive è opportuno aumentare la duttilità grazie ad una maggiore temperatura.



Figura 1.5: Motivazioni delle lavorazioni a caldo

Si rischia di incorrere in:

- Finiture peggiori.
- Maggiore rugosità da cui derivano pure caratteristiche meccaniche peggiori.
- Non si ottiene incrudimento.

Lavorazioni a freddo In industria vengono sfruttate molto più volentieri per via:

- Migliori tolleranze geometriche ottenibili.
- Migliore finitura superficiale,
- Migliori prestazioni meccaniche a parità mi materiale usato.

Parte II

Sitenrizzazione

CAPITOLO 2

Sinterizzazione

Permette di realizzare oggetti a partire da polveri di un materiale.

Perché sfruttare la sinterizzazione?

I motivi sono molteplici e possono essere:

- controllo accurato della struttura richiesta;
- controllo della composizione chimica;
- formabilità;
- Quando non si vogliono macrosegregazioni;
- realizzare dei componenti in materiali con temperatura di fusione particolarmente alta.

A differenza di altre lavorazioni è necessario parametrizzare la forma delle polveri, in quanto da quei parametri si possono ottenere le caratteristiche meccaniche del lavorato finale. Inoltre la forma della polvere può essere determinante sulla lavorazione.

Per i prodotti lavorati in sinterizzazione si parla di Net- Shape: ovvero, la lavorazione porta dei semilavorati già molto vicini alla forma finale di vendita del prodotto. Ciò permette di usare tutto il materiale, senza avere sprechi dovuti a delle lavorazioni che per ottenere la forma finale, devono eliminare parte di esso.

Data la lavorazione è possibile controllare la porosità del prodotto come si vedrà successivamente. In generale non si ottengono particolari caratteristiche meccaniche anche se alle volte si possono ottenere delle caratteristiche migliori di altre lavorazioni già viste.

Bisogna prestare attenzione al discorso della porosità: troppa porosità residua può essere punto di fragilità del materiale portando alla formazione di cricche. In più non sono facili da lavorare in post-produzione. Quindi il processo di produzione deve essere near net-shape il più possibile.

2.1 La lavorazione

Alla figura 2.1 sono riportati i principali possibili processi per le lavorazioni di sinterizzazione.
In generale il processo di sinterizzazione deve passare attraverso tre principali processi:



Sarà anche la sequenza delle trattazioni successive.

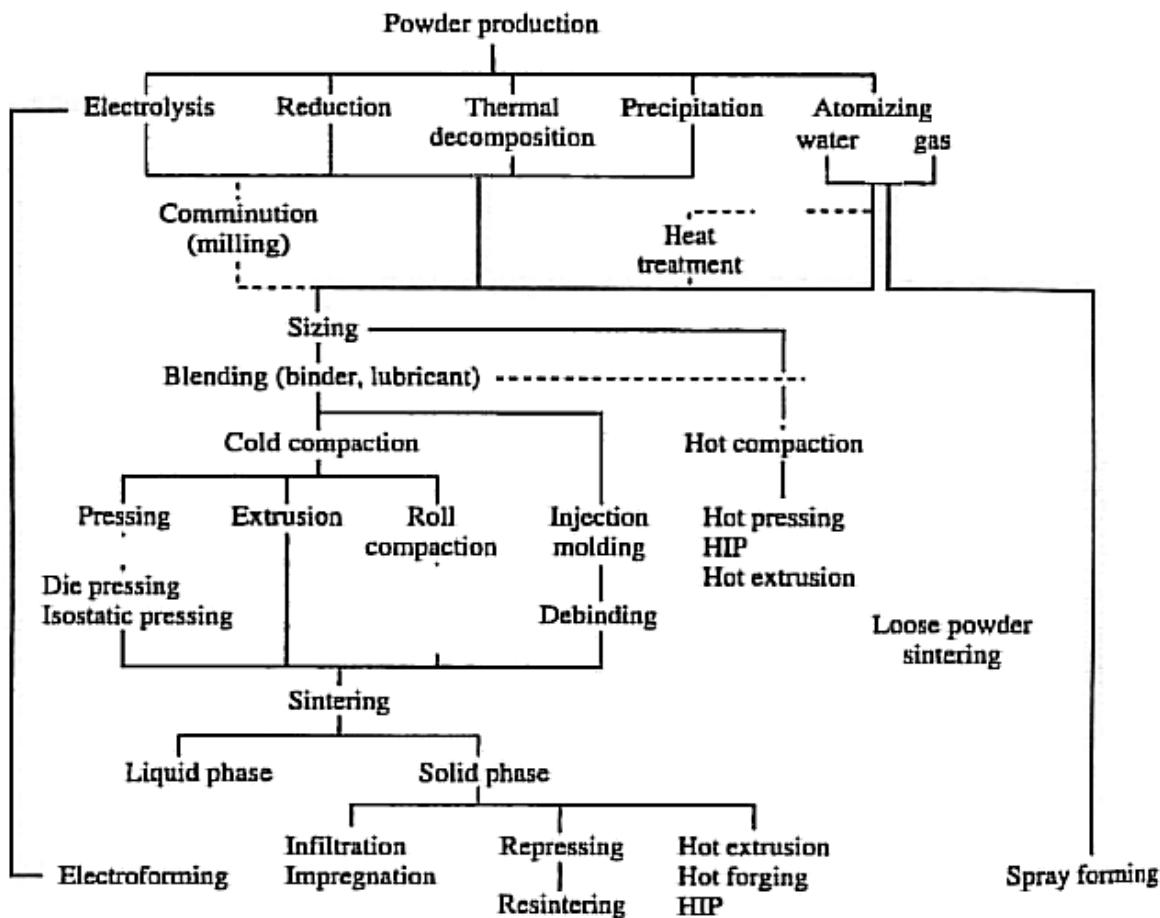


Figura 2.1: Processi di produzione in sinterizzazione

2.1.1 Produzione delle polveri

La produzione delle polveri a partire da un semilavorato è un'operazione importante dato che, dalla caratterizzazione della polvere, si possono ottenere diverse proprietà meccaniche. Come illustrato dalla figura 2.1, le polveri possono essere prodotte in diverse modalità tipo:

Estrazione Da un blocco di materiale si ottengono le particelle tramite:

Riduzione in ossido dalla quale si disgrega il materiale di partenza per ossidazione e si ottiene una *torta porosa*.

Decomposizione chimica Tramite agenti chimici che attaccano il materiale di partenza si ottengono delle particelle aguzze.

Elettrolisi Anche in questo caso si tratta di un attacco chimico e produce depositi che devono subire una successiva macinazione.

Precipitazione per soluzione acquosa Il deposito si ha per precipitazione a partire da una soluzione liquida.

Deposizione Si vaporizza il metallo per poi farlo precipitare dopo un raffreddamento. Ciò impone di prestare attenzione a quale sia la temperatura di fusione ed eventuale vaporizzazione del metallo.

Atomizzazione Può essere svolta in diverse modalità. Si sfrutta la formazione di piccole gocce di materiale fuso che, una volta raffreddate, possano diventare polvere a grana molto fine. In industria sono tre le modalità principalmente utilizzate, come illustrato alla figura 2.2:

1. Frammentazione per fluido, in figura 2.2a: dove viene fatto colare il fuso da un ugello che già forma delle gocce. Viene, poi, spruzzato del fluido, che può essere acqua o aria, per frammentare il fuso in piccole particelle. In genere si ha una relazione tipo $p_{\text{fluido}} \nearrow$ allora $D_{\text{polvere}} \searrow$. Bisogna comunque considerare che le particelle saranno ossidate per via del raffreddamento tramite fluido. Che può essere positivo nel caso dell'alluminio perché si forma allumina, non positivo per materiali ferrosi dove l'ossido forma strutture troppo dure e fragili, dannose per il prodotto post sinterizzazione.
2. Atomizzazione centrifuga, in figura 2.2b: Il colato viene spruzzato, come prima, sopra un cilindro rotante raffreddato. La forza centrifuga imposta dal cilindro alle gocce separa ulteriormente il colato formando particelle più fine. Le quali verranno raffreddate ulteriormente per il fatto che all'impatto col cilindro trovano una superficie molto più fredda.
3. Atomizzazione con elettrodo rotante, in figura 2.2c: grazie all'elettrodo si realizza un arco elettrico col materiale da polverizzare che di conseguenza si consumerà producendo la polvere. Si pone in rotazione il materiale da polverizzare. Con questo processo si ottengono delle particelle particolarmente pulite da ossidi e molto fine.

Produzione di fibre Non è insolito produrre delle fibre invece di polveri, le modalità sono diverse, simili a quelle viste per ottenere le polveri e sono illustrate alle figure ???. Le fibre hanno dei tempi di raffreddamento molto veloce: ottenendo strutture amorfe per via del fatto che il materiale non ha tempo di realizzare le strutture cristalline o non completamente. Se si vuole ottenere fibre a partire dalla frantumazione del blocco di partenza, allora è necessario che il materiale sia molto fragile.

Una volta ottenute le polveri e/o fibre, si passa alla caratterizzazione delle tali: ciò per mettere di capire quale sia il miglior processo per la produzione.

2.1.1.1 Caratterizzazione delle polveri

Una prima caratterizzazione può essere in base alla **morfologia** della polvere. La caratterizzazione è normata tramite ISO e si suddivide in due principali dimensioni:

Forma Le principali forme nella normativa sono:

- sferoidali,
- nodulari,
- irregolari,
- laminari,
- aciculare,
- dendritiche,

Dimensioni si vogliono delle particelle di dimensioni né troppo grandi né troppo piccole: si vogliono abbastanza fine per evitare la formazione di macro-segregazioni; si vogliono sufficientemente grandi per evitare che diano problemi di gestione delle polveri. Le dimensioni vengono "misurate" tramite una serie di setacci che ne danno la distribuzione.

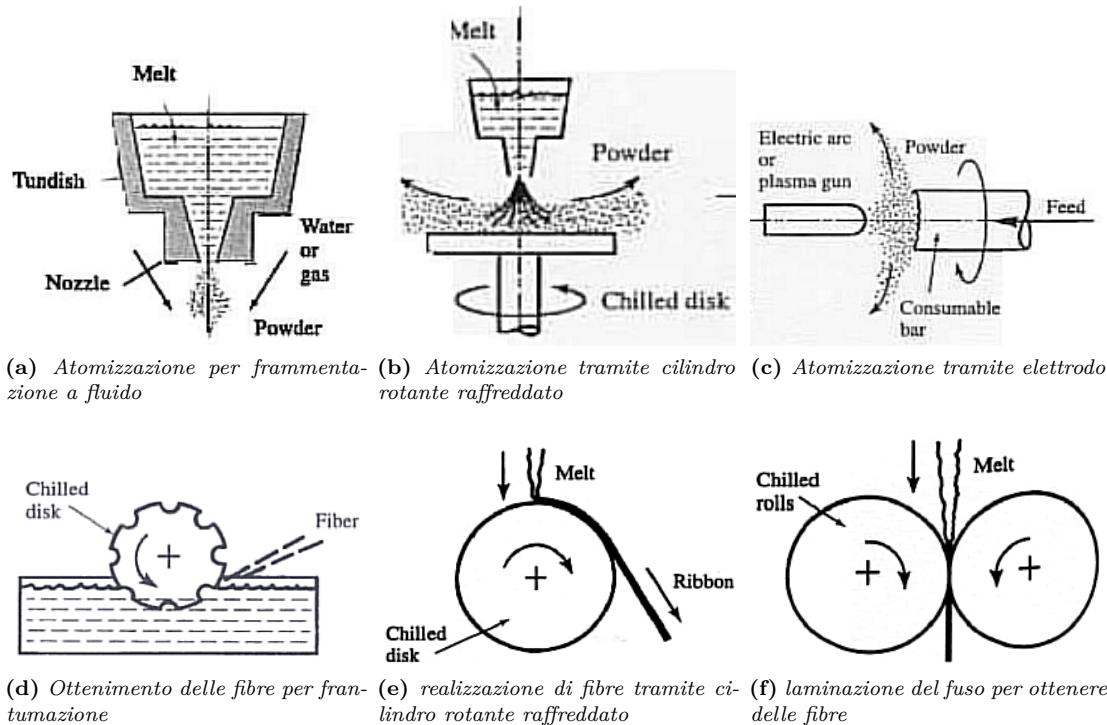


Figura 2.2: Principali modalità di atomizzazione e realizzazione delle fibre

Particelle sferoidali vengono particolarmente apprezzate per il fatto che nel trasporto e nella gestione hanno un ottimo scorrimento. In più hanno il migliore rapporto superficie/volume che è molto importante per la formazione dei legami inter-granulare. Presentano una minore superficie di contatto per legare con altre particelle. È anche importante per evitare di legare con impurità. Il vantaggio di avere un ottimo scorrimento permette di ottenere, ad un primo impaccamento, la densità più alta. Dunque una minore porosità interna. Le particelle non devono essere troppo fine perché possono dare problemi per la loro gestione: possono dare ignizione di fiamme, si possono infilare ovunque dando problemi ai macchinari, possono legarsi con impurità più facilmente.

Altri parametri con cui vengono misurate le polveri sono:

Area specifica della superficie indica quanta area è a disposizione per creare legami con altre particelle e con eventuali impurità.

Densità vera sarebbe la densità del materiale da cui si sono ottenute le polveri. Viene usata come riferimento per stimare quanta densità si ottiene post compattazione e sinterizzazione.

Densità apparente Dato uno stampo, la densità della polvere che viene messa nello stampo senza alcun sistema di compattazione.

Densità disponibile è la densità della polvere che, posta nello stampo, le viene imposta una compattazione non per realizzare il verde.

Capacità di flusso indica la portata nell'unità di tempo in un imbuto standardizzato. Si può misurare anche misurare tramite l'angolo di cono che forma lasciando cadere le polveri in un punto.

In generale, tutte queste caratteristiche dipendono da: forma delle particelle, attrito tra le particelle, distribuzione delle dimensioni.

2.1.2 Preparazione delle polveri

Una volta ottenuti le polveri si susseguono i seguenti passaggi:

1. **Classificazione**, come visto in precedenza secondo la normativa ISO.
2. **Separazione degli agglomerati**: di solito realizzata tramite macinazione con la possibilità di modificarne la forma, con conseguente incrudimento del materiale. Arrivando ad avere una modifica delle caratteristiche meccaniche.
3. **Condizionamento** il cui obiettivo principe è quello di gestire gli ossidi. L'ossido è in generale un composto tenace che compromette tra particelle vicine. In più il condizionamento permette una corretta gestione delle polveri che risulta essere particolarmente critica.
4. **Miscelazione** il discorso della miscelazione verrà affrontato più nel dettaglio al paragrafo successivo.

2.1.2.1 Miscelazione

La miscelazione viene sfruttata per raggiungere determinati obiettivi.

Parte III

Asportazione di truciolo

CAPITOLO 3

Lavorazioni per asportazione di truciolo

Il principio di funzionamento delle lavorazioni per asportazione di truciolo è differente da quanto visto fin ora. Nelle lavorazioni per deformazione plastica si avevano delle deformazioni lente. *"Per cui il materiale aveva il tempo di adattarsi"*. Per l'asportazione di truciolo così non può essere. Infatti si suppone che il materiale venga rotto, tra l'altro il più rigidamente possibile. Dunque le deformazioni richieste devono essere a più alta velocità. Ciò però crea delle problematiche non indifferenti:

- deformazioni veloci non sono rappresentabili tramite prove classiche.
- Si rende necessario idealizzare il processo e man mano aggiungere ipotesi più realistiche.

3.1 Introduzione

Nelle lavorazioni viste fin ora si portava il materiale a deformazione, anche per la tranciatura nel momento in cui il materiale subiva una deformazione critica fino all'innesto di cricche da cui poi avveniva la separazione del materiale. Per l'asportazione del truciolo non può essere così: la deformazione avviene in tempi molto più rapidi, per cui il materiale ha comportamenti differenti da quelli visti in precedenza. Inoltre, considerando il materiale di scarto, per le lavorazioni a deformazione si può recuperare ed eventualmente riciclare. Per le lavorazioni ad asportazione la cosa è molto più complicata e difficile. Il valore del truciolo è pressoché nullo e il suo recupero può essere complicato per via delle molteplici varietà di materiale che possono subire tali lavorazioni. Alla tabella 3.1 sono riportati alcuni vantaggi e svantaggi di tali lavorazioni.

Esempio. 3.1.1: Vantaggi e Svantaggi

Vantaggi	Svantaggi
Si possono ottenere tolleranze migliori	Tempo ciclo molto più lento
Buona finitura superficiale	Scarti di materiale non recuperabili
Adatti alla lavorazione di pezzi unici	
Costo macchina relativamente basso	Spesso è richiesta alta lavorazione manuale

In industria si sta cercando di eliminare queste lavorazioni per via del tempo ciclo molto elevato. Sebbene, in abito artigianale stiano avendo un forte sviluppo, sia in termini di automazione, dunque di tecnologia a bordo macchina; sia di lavorazioni messe dalle macchine. Altro grande punto a favore di tali lavorazioni è sicuramente l'adattabilità per qualsiasi materiale.

In industria, vengono relegate ad operazioni di finitura del prodotto, dove con una singola passata si cerca di completare il prodotto e metterlo sul mercato. Per l'artigianato invece si ha un utilizzo più intensivo, dove con una passata si cerca di ottimizzare la quantità di materiale asportato.

Come punto di partenza è utile considerare applicazioni in cui il processo sia completamente idealizzato.

3.2 Taglio ortogonale ideale

Alla figura 3.1 sono rappresentati degli esempi di taglio ortogonale.

Si dice che il taglio è ortogonale quando la lama dell'utensile è ortogonale alla direzione della velocità di taglio. Allora si possono definire diversi parametri come riportato nella definizione 3.2.

3.2.1 Definizione (Parametri del taglio ortogonale):

α Angolo di spoglia superiore o frontale. Da cui

Se $\alpha > 0$ allora si dice che l'utensile ha angolo acuto,

Se $\alpha < 0$ allora si dice che l'utensile ha angolo ottuso.

θ Angolo di spoglia inferiore

ϕ Angolo di taglio

h Spessore di taglio indeformato

h_c Spessore del truciolo

Come ipotesi ideale, si considererà che tutta la deformazione del materiale avverrà solamente sul piano di taglio. Allora, dai parametri del taglio ortogonale si possono ottenere:

$$r_c = \frac{h}{h_c} = \frac{l_c}{l} := \text{Rapporto di taglio} \quad (3.1)$$

Dove:

l_c è la lunghezza del truciolo

l è la lunghezza del taglio

Mentre:

$$F = K \cdot A \quad (3.2)$$

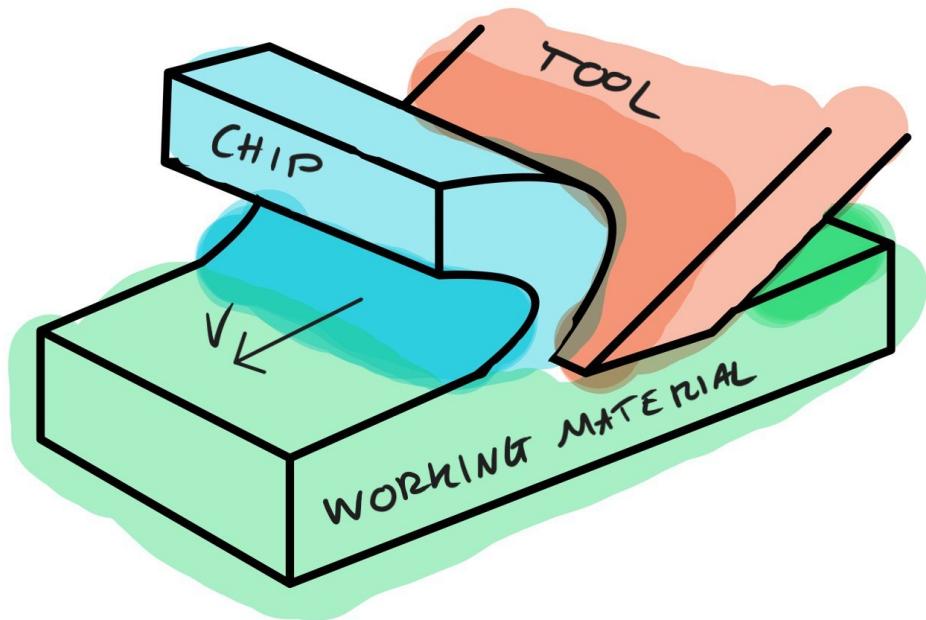
ovvero, la forza necessaria a tagliare il pezzo sarà proporzionale all'area A del piano di taglio dovuta dalla lunghezza del piano stesso per la profondità del pezzo in senso ortogonale alla figura 3.1b; in più sarà proporzionale alla pressione K esercitata dall'utensile sul pezzo. Inoltre, si può intuire che: per abbassare l'intensità della forza complessiva per il taglio sarebbe opportuno aumentare ϕ , così da limitare l'estensione del piano di taglio e di conseguenza la sua area. Si può ottenere una stima dell'angolo di taglio tramite

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \quad (3.3)$$

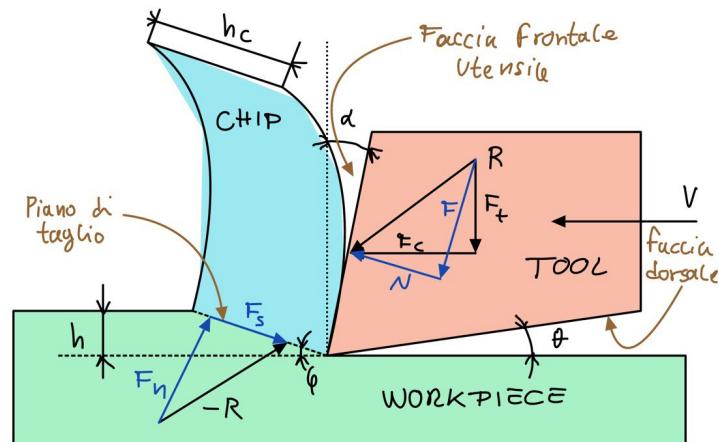
considerando che il rapporto di taglio lo si può misurare abbastanza facilmente dato che: lo spessore di taglio lo si decide in base alla lavorazione da effettuare, mentre lo spessore del truciolo lo si può misurare abbastanza facilmente. Dunque è evidente che l'angolo α lo si vuole molto grande, in modo da generare piani di taglio molto piccoli: garantendo la necessità di applicare una forza minore.

Risulta utile prestare attenzione alla successiva considerazione. Il valore di deformazione che si raggiunge con le lavorazioni per asportazione di truciolo è nettamente più alte che non le deformazioni per lavorazioni tramite deformazione. Giusto per dare un'idea dell'ordine di grandezza:

$$\dot{\gamma} = \frac{v_s}{d} = \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \frac{v}{d} [s^{-1}] \quad (3.4)$$



(a) Visualizzazione del taglio ortogonale



(b) Parametri del taglio ortogonale

Figura 3.1: Taglio Ortogonale

nella tecnica, si osservano i seguenti valori:

$$\text{Lavorazione per deformazione} \approx 1 \div 10 [\text{s}^{-1}]$$

$$\text{Lavorazione per asportazione} \approx 1000 [\text{s}^{-1}]$$

3.2.1 Fattore di attrito

Sappiamo che il fattore di attrito ricopre importante ruolo per quanto riguarda questo tipo di lavorazioni. Ci si deve prestare attenzione.

$$\mu = \frac{\tau_i}{p} \quad (3.5)$$

Di base, questa sarebbe la definizione principale di fattore di attrito. Si nota che passata la tensione tangenziale di Von Misess, l'attrito tende a calare, nonostante nell'equazione non sia previsto tale comportamento. Ciò è dovuto al fatto che per calcolare il fattore di attrito si considera un materiale indeformabile, quando nella realtà del taglio ortogonale, non può essere. Dunque il materiale sarà **indeformabile** fino alla tensione di Von Misess, passata quella bisogna considerarlo **deformabile**. Perciò l'equazione (3.5) non descrive completamente il comportamento. Si è sviluppato un **fattore di attrito** adatto a tale fenomeno:

$$m = \frac{\tau_i}{K} \quad (3.6)$$

Dove K è la tensione tangenziale all'interfaccia truciolo-utensile. Nella pratica viene preferito il fattore descritto dalla (3.6) perché più facile da calcolare. Oltre al fatto che permette di descrivere correttamente il fenomeno dello sticking.

3.2.2 Definizione (Sticking): Fenomeno di aderenza tra il truciolo e l'utensile.

3.2.2 Valutazione delle forze

Per la valutazione delle forze messe in gioco per tale lavorazione si considereranno i tre attori separatamente e man mano sovrapponendone gli effetti.

Porta utensile

Considerando la scomposizione delle forze della figura 3.2. Al porta utensile si può, operativamente, applicare una cella di carico per valutare la risultante applicata. Celle di carico più moderne possono eventualmente valutare già le componenti di tale risultante. allora possiamo ottenere i moduli delle forze:

$$\begin{cases} F_c = R \cos(\alpha + \psi) & \text{Forza di taglio} \\ F_t = R \sin(\alpha + \psi) & \text{Forza di spinta dell'utensile} \end{cases} \quad (3.7)$$

Si possono definire ulteriori scomposizioni di forze: se prima la scomposizione avveniva su proiezioni degli assi di riferimento rispetto al pezzo lavorato; ora si possono definire delle scomposizioni rispetto all'utensile.

Utensile

Sempre in riferimento alla figura 3.2.

$$\begin{cases} N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \\ F = F_c \sin \alpha - F_t \cos \alpha \end{cases} \quad (3.8)$$

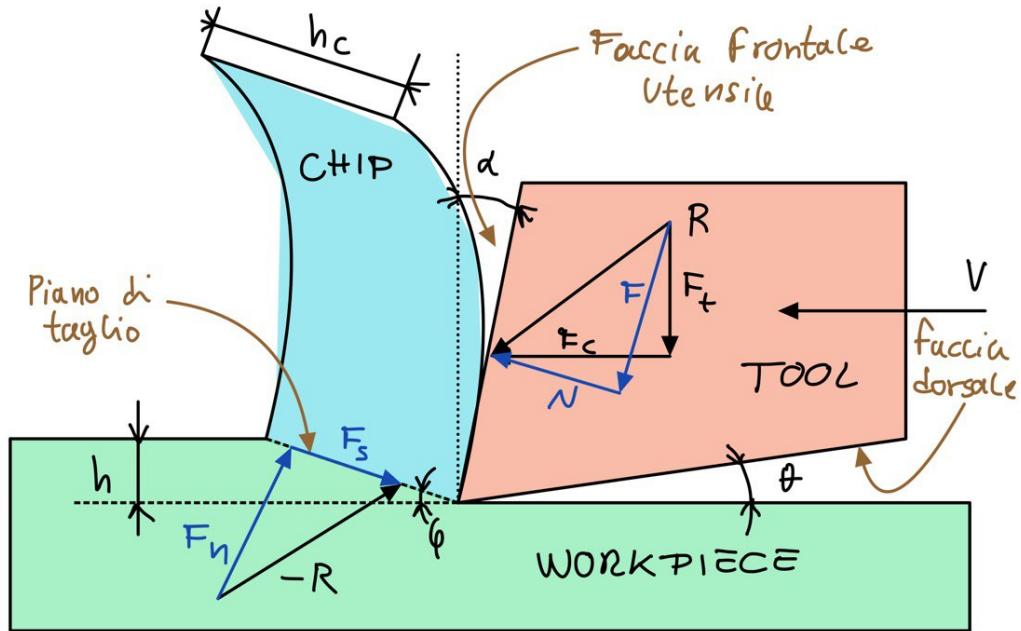


Figura 3.2: Scomposizione delle forze per il taglio ortogonale

L'angolo relativo tra R e N viene indicato con β e viene definito come **angolo d'attrito sulla faccia dell'utensile**. Vale:

$$\beta = \frac{F}{N} \approx \mu \quad (3.9)$$

Notare che β è una sottospecie di coefficiente di attrito, infatti dipende proprio da quest'ultimo.

Pezzo lavorato

Lato pezzo lavorato si può vedere la totalità delle forze in gioco. In particolare si devono evidenziare le forze:

F_n risulta essere un contributo idrostatico per il materiale, dunque ne aumenta la duttilità. Aspetto che rende il taglio più difficoltoso. Ciò si risolve aumentando l'angolo del piano di taglio ϕ che si vedrà successivamente.

F_s è la vera e propria forza resistente al taglio. Si sviluppa come relazione della pressione di taglio resistente del materiale e l'area del piano di taglio.

$$F_s = k \cdot A \quad (3.10)$$

Per rendere il taglio più agevole, si può ridurre l'area del piano di taglio nei modi che vedremo in seguito.

Riprendendo l'angolo del piano di taglio ϕ , si hanno migliori condizioni lavorative nel caso questo risulti essere molto grande. Dalla letteratura si evidenziano le seguenti relazioni tra i vari angoli scomponimenti le forze viste fino a prima:

$$\phi = 45^\circ - \frac{1}{2}(\beta - \alpha) \quad (3.11a)$$

$$\phi = 45^\circ - (\beta - \alpha) \quad (3.11b)$$

Sebbene indichino la relazione degli stessi parametri con due relazioni differenti (3.11), entrambe hanno uno scopo preciso e nascono da considerazioni differenti.

(3.11a) Si sviluppa partendo dalla considerazione che il sistema tenda a consumare la minima energia.

(3.11b) Viene detta di Upper Bound: ovvero ha l'obiettivo di valutare la massima forza necessaria per eseguire il taglio.

Per entrambi i casi risulta evidente che per aumentare ϕ si possono percorrere due strade:

- ↗ β siccome β dipende dall'attrito tra truciolo e utensile, indipendentemente dallo sticking, si può abbassare come angolo lubrificando l'interfaccia tra i due.
- ↗ α Aumentare l'angolo della faccia dell'utensile non è sempre una strada percorribile, infatti si avrebbero utensili molto fini e fragili che tenderebbero a consumarsi molto facilmente.

Nel grafico 3.3.(a) è rappresentato l'andamento della forza di taglio F_s giacente sul piano di taglio. Si osserva che tale forza aumenta all'aumentare dell'area del piano di taglio. Dunque è importante diminuire proprio quest'ultima: attraverso le strategie per aumentare ϕ viste in precedenza. Oltretutto tale andamento non è influenzato dall'angolo di spoglia superiore. L'ipotesi che porta a tale costruzione sta nel fatto che il materiale è supposto non incrudente. Infatti: raggiunto tale valore di sforzo tangenziale τ il materiale si rompe. Nel caso di materiale incrudente: si avrà una curva più che lineare, in quanto la deformazione porterà all'irrigidimento nella zona di taglio che necessiterà di maggiore forza per avere la separazione del materiale.

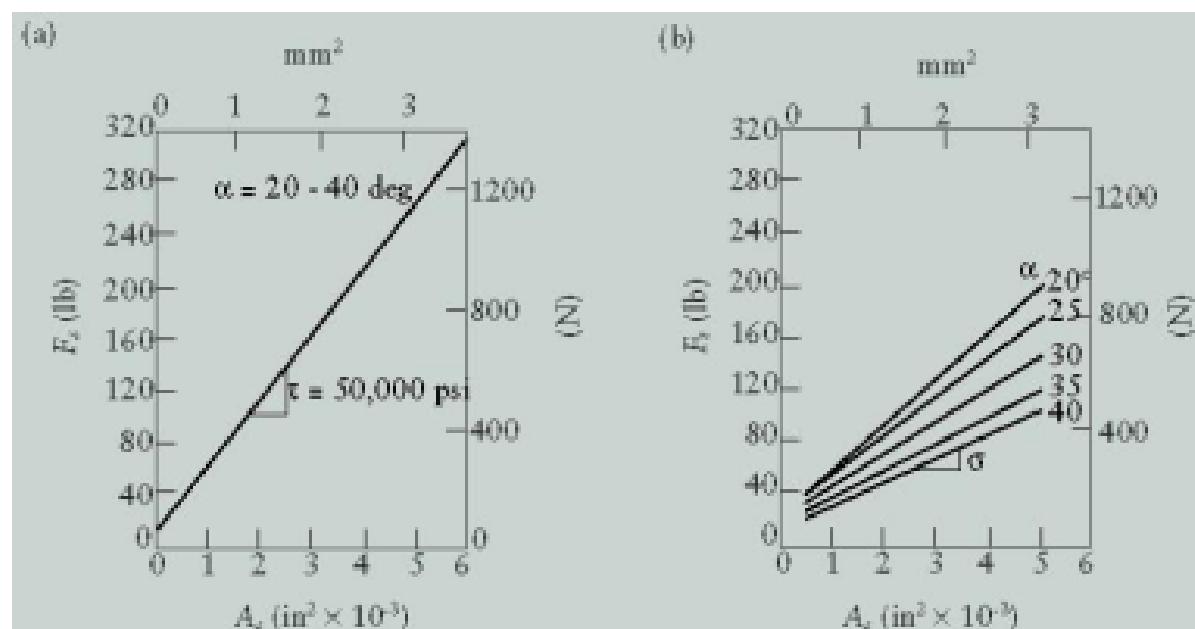


Figura 3.3: Andamenti delle forze per il taglio ortogonale

Nel grafico 3.3.(b) viene rappresentata la forza normale al piano di taglio F_n . Questa dipende dall'angolo di spoglia superiore. L'effetto di tale forza è stato già evidenziato: questa fornisce una specie di compressione idrostatica sul piano di taglio portando il materiale ad essere più duttile. Ciò spesso si traduce in un truciolo continuo che però è problematico per la continuazione della lavorazione: in quanto ingombrante e pericoloso.

Nel grafico 3.4 viene riportato il dettaglio sulla faccia superiore dell'utensile. Si possono vedere due sezioni distinte:

Sliding in questa sezione si presenta lo scivolamento del truciolo sulla faccia dell'utensile. Questo porta una cera forza resistente contro l'utensile di tipo τ : ovvero di sforzo tangenziale. Si ha uno strisciamento completamente regolato dal coefficiente di attrito. Tale resistenza si annullerà nel momento in cui c'è distaccamento tra truciolo e faccia.

Sticking nella zona di adesione si manifesta un particolare fenomeno per cui il materiale del lavorato si accumula sulla punta dell'utensile. Ciò permette di generare una zona di ristagno che favorisce la separazione del materiale tra quello tagliato e il truciolo. Di fatto in alcune occasioni può essere benefico per il tagliente in quanto diventa uno strato protettivo. La resistenza portata da tale fenomeno diventa di pura deformazione σ .

Al momento non si è ancora approfondita la finalità dell'angolo di spoglia inferiore θ . Idealmente servirebbe ad evitare lo strisciamento tra utensile e lavorato. Siccome nella realtà bisogna considerare anche il ritorno elastico, non è possibile ottenere un perfetto distaccamento tra utensile e lavorando. Dunque un po' di strisciamento si verifica in qualsiasi occasione. Ciò provoca usura dell'utensile. Tra l'altro questo tipo di usura è la più severa per l'utensile.

3.3 Taglio ortogonale realistico

Il taglio del materiale non avviene più nel piano di taglio, bensì sulla zona di taglio detta anche **Zona di taglio primaria** mostrato in figura 3.5a.

Inoltre si osserva una zona deformata plasticamente, per cui si presenta un incremento della resistenza pari a quasi 3 volte la durezza nominale del pezzo lavorato.

Analizzando il comportamento del truciolo si possono verificare delle situazioni, come illustrato in figura 3.5b:

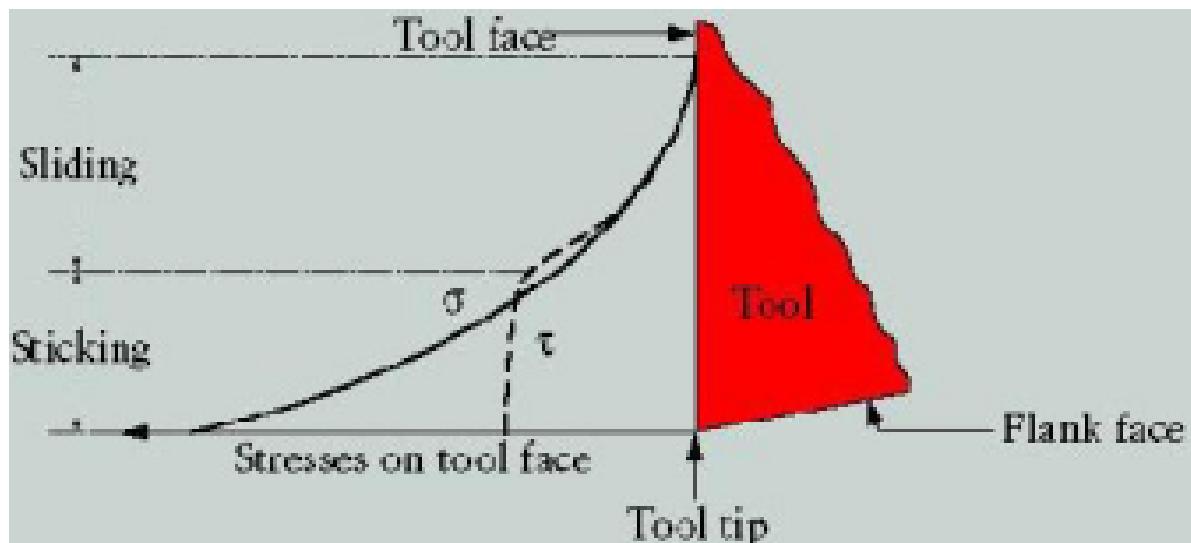


Figura 3.4: Tipologia di forze prementi sulla faccia dell'utensile

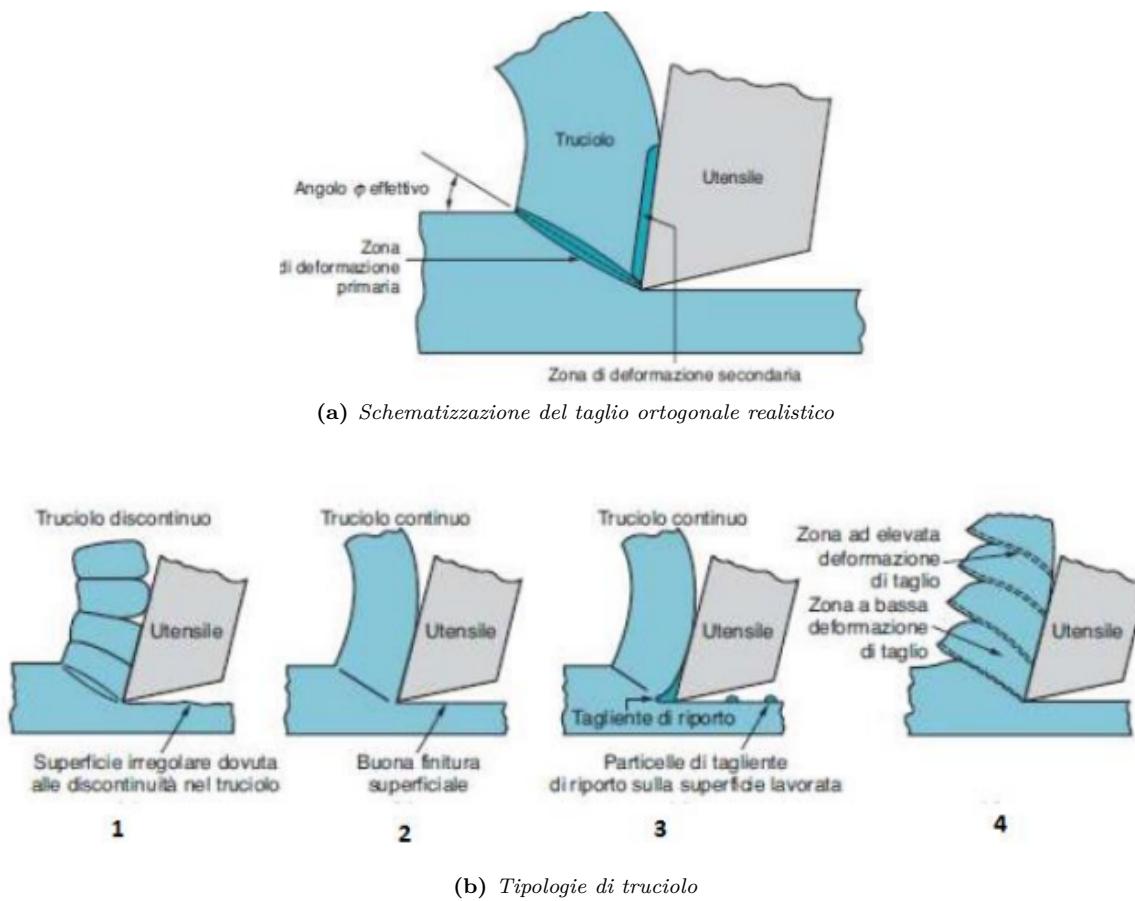


Figura 3.5: Taglio ortogonale reale

3.3.1 Truciolo continuo

Si verifica per velocità abbastanza basse. Come dice il nome Truciolo forma un continuo filamento di materiale. Risulta più semplice lubrificare la faccia dell'utensile, abbassando β come avevamo visto in precedenza per diminuire la dimensione del piano di taglio. Dunque la zona di taglio resta più sottile e la superficie uscirà dalla lavorazione con una finitura migliore.

Se da questa situazione si aumenta la velocità di lavorazione, si va a formare una zona detta: **tagliente di riporto**. Ciò è dovuto all'aumento della velocità con conseguente formazione della zona di ristagno davanti alla faccia dell'utensile. In particolare il tagliente di riporto:

- α aumenta per via per effetto della zona di ristagno, per ciò si abbassa la forza di taglio.
- In qualche misura protegge la faccia dell'utensile.
- Può depositarsi sulla faccia del lavorato intaccandone la finitura superficiale.

Aumentando ulteriormente la velocità; la zona di taglio primario si assottiglia ulteriormente. Comincia ad instaurarsi il fenomeno dello **sticking**. Il fenomeno si deve principalmente al riscaldamento del materiale il quale crea adesione sulla faccia del tagliente. Sarà, dunque, necessario aumentare la forza di taglio.

Si può già intuire che la velocità di taglio sarà strettamente legata alla temperatura generata durante la lavorazione.

Rimanendo nel tema del truciolo continuo si può verificare una situazione di truciolo continuo ma ondulato

3.3.1.1 Truciolo continuo ondulato

È dovuto ad una variazione periodica nella forza di taglio. Possono esserci diversi motivi per cui si verifichi tale variazione:

- Superficie rugosa, limita lo scorrimento del tagliente.
- Presenza di vibrazioni autoeccitate: se le vibrazioni sono dovute a forti variazioni nella superficie di taglio.
- Distacchi del tagliente di riporto che va ad aderire alla superficie del materiale lavorato. Impone una maggiore forza perché l'utensile "deve" far aderire tale riporto sulla superficie.
- Vibrazioni forzate: generate dalla macchina e in genere dovute agli elementi elastici della macchina.
- Quando si rompe il tagliente di riporto, portandosi via anche un pezzo del tagliente vero e proprio.

Altra situazione particolare, di cui tenere nota, è la casistica in cui si forma il truciolo a dente di sega.

3.3.1.2 Truciolo continuo a dente di sega

Costituito da sezioni a diversa deformazione, la successione di zone spesse a bassa deformazione a zone fine di alta deformazione. Le cause di tale comportamento è da imputarsi a:

- bassa conduttività termica del materiale, per cui non riesce a smaltire il calore generato dalla lavorazione.
- Ciò spiega l'alternanza delle zone ad alta deformazione e bassa deformazione: le sezioni a bassa deformazione sono caratterizzate da un'alta temperatura relativa per cui l'utensile taglia più facilmente il materiale. Una volta asportata una sezione di materiale, viene automaticamente smaltito del calore "bloccato" nel materiale. Dunque la sezione successiva trova un calore minore, per cui il tagliente fa più fatica a tagliare e deforma di più il materiale. Per questo motivo le sezioni ad alta deformazione sono più fine.

Ultima casistica di truciolo, è quella del truciolo discontinuo.

3.3.2 Truciolo discontinuo

Si verifica in situazioni di velocità estremamente basse su macchine scadenti a bassa rigidezza. Altre situazioni per cui si va ad avere truciolo discontinuo sono:

- Per materiali che contengono inclusioni e fasi secondarie che alzano le tensioni. Ciò provoca delle continue rotture di truciolo.
- Situazioni di stick-slip.

Sebbene il truciolo continuo sia ricercato per favorire una finitura superficiale migliore, spesso non è possibile tenere trucioli particolarmente lunghi. Durante la lavorazione un truciolo lungo può essere d'intralcio all'operatore e alla macchina.

Allora si ha la necessità di rompere il truciolo.

3.3.3 La rottura del truciolo

È particolarmente facile coi materiali fragili, più complicato per quei materiali duttili che tendono a formare dei trucioli continui. Allora si ricorre a opportuni **rompi-truciolo**, inserti che possono essere fissati all'utensile o già disegnati su esso, per favorire la rottura del truciolo ponendo ulteriore deformazione al materiale asportato. I rompi-truciolo hanno uno specifico valore efficace di rottura del truciolo dipendente dalla profondità dello spessore indeformato: questa è una caratteristica della forma e dimensione geometrica del rompi-truciolo. In figura 3.6 un dettaglio.

3.4 Taglio obliquo

Viene sfruttato maggiormente dalle aziende. Garantisce una lavorazione che necessita di maggiore forza per il taglio, ma la vita del utensile è più lunga.

A differenza del taglio ortogonale dove si veniva a formare un truciolo continuo a forma di spirale. Nel taglio obliquo si forma un truciolo a forma elicoidale, che ha una propria tendenza geometrica a spostarsi via dal punto di lavorazione. Si evita la necessità di rompere il truciolo, anche se è una pratica che comunque viene mantenuta. È opportuno definire un nuovo angolo di spoglia superiore.

$$\alpha_e := \text{Angolo di spoglia efficace} \quad (3.12)$$

$$\alpha_n := \text{Angolo di spoglia normale} \quad (3.13)$$

$$\text{In generale: } \alpha_e > \alpha_n \quad (3.14)$$

Vale che più il tagliente è inclinato, più aumenta α_e e di conseguenza F_c diminuisce.

Nel caso in cui il tagliente non sia più grande del pezzo in lavorazione, lo spessore del truciolo indeformato non è più sufficiente a descrivere i fenomeni legati a questo. Dunque è necessario parlare di **avanzamento** f . Inoltre si introduce la **profondità di passaggio** w .

3.4.1 Tornitura

Un esempio di tornitura è riportato alla figura 3.7c.

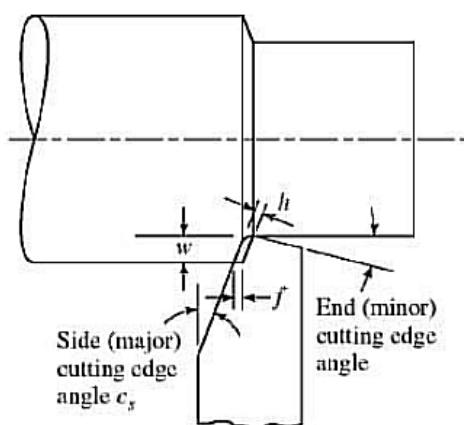
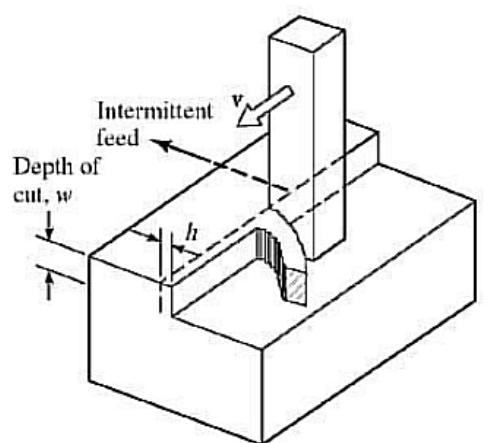
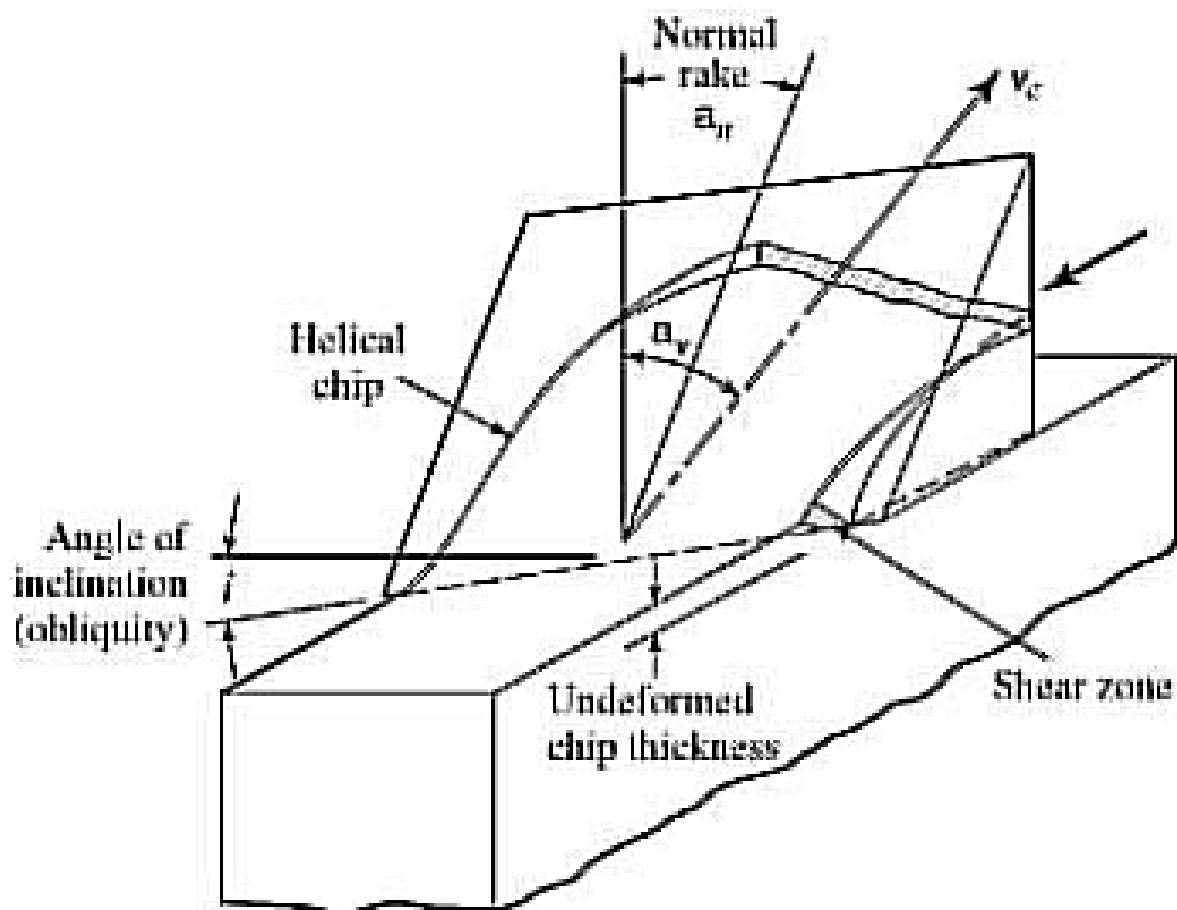
- utensile con tagliente inclinato
- f è ortogonale al tagliente e rappresenta l'avanzamento;
- w è la profondità di passata
- h è lo spessore di truciolo indeformato.

Con l'utensile inclinato si ha una maggiore forza necessaria al taglio, però si aumenta considerevolmente la durata dell'utensile. Indubbiamente la caratterizzazione del tagliente risulta più complicata. Si ha l'ulteriore vantaggio di avere un utensile che può presentare più taglienti.

3.4.2 Calcolo della forza ed energia



Figura 3.6: Esempi di rompi-truciolo



(b) Parametri del taglio ortogonale per confronto

(c) Ulteriori parametri del taglio obliquo

Figura 3.7: Il taglio obliquo

Siccome per via del tipo di lavorazione non siamo in grado di sfruttare la deformazione per flusso plastico a causa della velocità decisamente superiore. È decisamente importante sapere quanta energia o potenza è necessaria per effettuare la lavorazione. Perché tale potenza sarà quella che il motore della macchina deve fornire all'utensile.

A differenza della lavorazione per deformazione plastica in cui la "pressa" deve fornire una certa pressione per permettere la deformazione. Nell'asportazione si possono cambiare alcuni parametri in base anche punto della lavorazione si è. Continuando a lavorare il pezzo.

Resta evidente come la parametrizzazione della lavorazione sia definitivamente importante: in modo da garantire la continuazione della lavorazione, cambiando alcune condizioni senza interromperla. Anche per il fatto che fermando la lavorazione peggiora la finitura.

Nella definizione dell'energia necessaria si sa che si va a commettere un'errore di circa il 20%. Di fatto sarebbe necessario conoscere β , ma non è facile da valutare. Allora si può valutare la **pressione di taglio**.

$$p_c = \frac{\text{Componente parallela alla velocità di taglio}}{h \cdot w} \quad (3.15)$$

Per ottenere una forma di energia basta integrare la pressione o forza per la lunghezza del lavoro eseguito ovvero:

$$l := \text{lunghezza di taglio} \quad (3.16)$$

3.4.1 Definizione (Pressione ed energia di taglio specifica):

$$p_c = \frac{F_c}{h \cdot w} \quad (3.17a)$$

$$E_1 = p_c \cdot \frac{l}{l} [\text{Ws/m}^3] \quad (3.17b)$$

Dove p_c è la pressione specifica di taglio e E_1 è l'energia specifica.

3.4.2 Definizione (Fattore di rimozione): Si può definire anche il Fattore di rimozione del materiale:

$$k_1 = \frac{1}{E_1} \quad (3.18)$$

dove k_1 rappresenta la quantità di materiale asportato da una macchina a motore a potenza unitaria.

I 3 parametri non sono costanti per un materiale perché dipendono anche dai parametri di processo quali spessore di truciolo indeformato, angolo di spoglia e velocità di taglio. L'energia spesa nella zona di taglio primaria e la quantità di materiale rimosso sono proporzionali allo spessore di truciolo indeformato.

$$E = k \cdot h \cdot p \cdot l \quad (3.19)$$

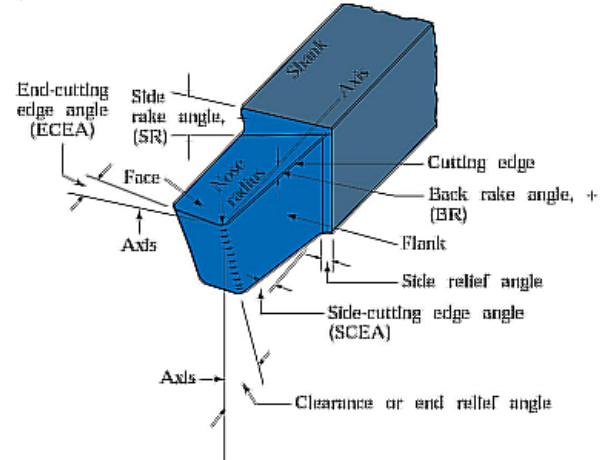


Figura 3.8: Esempio di utensile per tornitura

Nella zona di taglio primaria la pressione specifica, l'energia specifica e il fattore di rimozione del materiale sono costanti del materiale. L'energia consumata sul dorso dell'utensile è indipendente dallo spessore di truciolo indeformato, possiamo ritenerla quasi costante. Quindi vale:

$$\frac{E_d}{h \cdot p \cdot l} \neq \text{cost.} \quad (3.20)$$

A questo punto si è definita una relazione in cui si può già definire la forza necessaria. C'è da tenere in considerazione l'usura dell'utensile: in quanto quest'ultima tende a richiedere una maggiore pressione da parte del tagliente per tagliare. Siccome l'usura del tagliente è un argomento che richiede la considerazione di diversi parametri e che tali non possono sempre essere determinati così facilmente. Semplicemente si aggiunge un 30% in più all'energia necessaria.

Ulteriori parametri derivati dai precedenti sono:

3.4.3 Definizione (Ulteriori Parametri): Sono delle derivazioni dei parametri visti precedentemente.

$$E = E_1 \left(\frac{h}{h_{\text{ref}}} \right)^{-\alpha} = E_1 \cdot h^{-\alpha} \quad (3.21)$$

Dove E è l'energia di lavorazione, $h_{\text{ref}} = 1\text{mm}$ è lo spessore indeformato di riferimento e $\alpha \approx 0.3$. Da cui si può definire la potenza necessaria per la lavorazione:

$$\text{Power}(W) = \frac{E \cdot V_t}{\eta} \quad (3.22)$$

Dove V_t è la velocità di taglio, η il rendimento della macchina. Da cui si può ottenere la forza necessaria per il taglio:

$$F_c = \frac{\text{Power}(W)}{v} \quad (3.23)$$

3.4.3 Temperature

Siccome la lavorazione prevede di "muovere" del materiale dentro se stesso questo provoca un accumulo di energia danti alla faccia dell'utensile. Tale energia rimane nella maggior parte nel truciolo.

Come si vede dalla figura 3.9, le temperature raggiunte non sono da trascurare: si può arrivare a $\approx 1000^\circ\text{C}$ sulla faccia dell'utensile. Sappiamo che con l'aumento della temperatura, aumentano il numero di dislocazioni interne al materiale che diventa più duttile dunque più facile da lavorare.

La maggior parte dell'energia resta interna al truciolo che, portando con sé del calore, abbassa la temperatura del lavorato. Resta il calore trasferito all'utensile, il quale tende ad aumentare la temperatura considerevolmente. Infatti, come si vede proprio dalla figura 3.9, è proprio l'utensile a mostrare le temperature più alte. Ciò impone che il materiale dell'utensile debba essere di un materiale alto resistente a caldo.

Come fatto in precedenza, si è cercato di relazionare la temperatura con la velocità di lavorazione: legame che fisicamente è noto ma non così facile da porre analiticamente.

$$T_t = E \left(\frac{v \cdot h}{k \cdot \rho \cdot c} \right)^{1/2} \quad (3.24)$$

Dove:

- E_1 Energia specifica
- v Velocità di taglio
- h Spessore di truciolo indeformato
- k Conduttività termica
- ρ Densità
- c Calore specifico

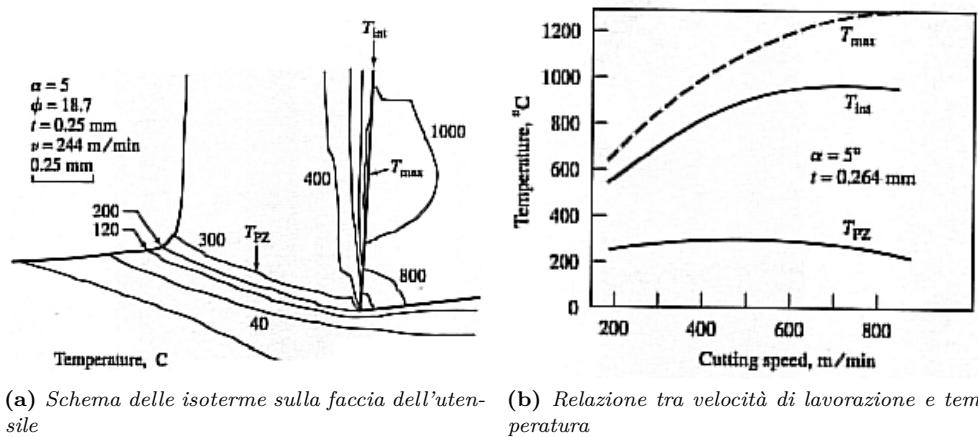


Figura 3.10: Temperature durante le lavorazioni ad asportazione

Se ne ottiene una stima della temperatura media sulla faccia dell'utensile. Come spesso succede nei sistemi fisici reali, tutta l'energia donata dalla macchina al materiale viene trasformata in calore. Indubbiamente durante le lavorazioni non si deve superare la temperatura di fusione del materiale lavorato: altrimenti si va ad ottenere una lavorazione molto grossolana di cui non si riesce a controllarne i parametri. I materiali a bassa fusione risultano più facili da lavorare. Inoltre, per lavorazioni di finitura particolarmente restrittive, bisogna considerare le variazioni dimensionali dovute alla dilatazione termica.

3.4.4 Fluidi da taglio

In industria ed artigianato, queste lavorazioni vengono spesso effettuate con l'assistenza dei fluidi da taglio. Questi hanno diverse funzioni per la lavorazione, tipo:

Lubrificazione si cerca di abbassare l'attrito nella lavorazione, per favorire un'asportazione più agile. Il problema sta nel portare il fluido nella zona di lavorazione, impedito del movimento del truciolo. Però aumentando la velocità di lavorazione di ha una lubrificazione meno efficacie.

Raffreddamento Diminuendo la temperatura sulla faccia dell'utensile si può lavorare a velocità più alte. Al tempo questo rappresenta un problema: se l'utensile non è costantemente immerso nel materiale, il raffreddamento potrebbe diventare uno shock termico per via delle forti variazioni di temperatura.

Rimozione del truciolo Utilizzando dei sistemi ad alta pressione si possono sfruttare gli utilizzi precedenti mentre si spostano i trucioli dalla zona i lavorazione.

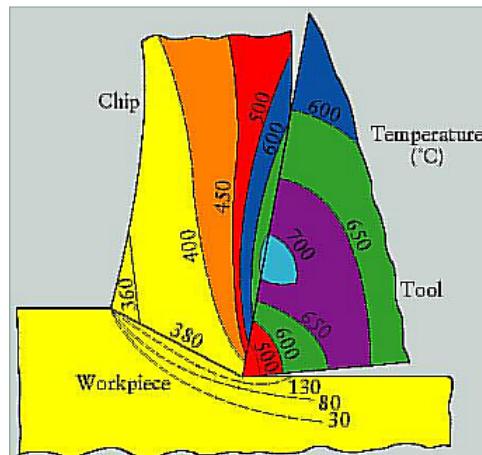


Figura 3.9: Analisi termica dell'asportazione di truciolo

CAPITOLO 4

Lavorazioni al trapano

È una macchina utensile molto diffusa. In realtà realizza una sola lavorazione: crea dei fori. Data la necessità di creare dei fori, se ne capisce la fondamentalità.

dalla figura 4.2a si può vedere che esistono diverse punte da trapano. Si può già fare un confronto tra le punte da trapano e gli utensili monotagliente visti per il tornio. In genere l'utensile monotagliente tende a flettere parecchio, mentre nelle punte da trapano le forze sono bilanciate per via della forma del tagliente. In più le punte presentano delle scanalature elicoidali che dovrebbero assolvere a due funzioni:

- rimuovere il truciolo dalla zona di taglio
- favorire la lubrificazione del tagliente

In realtà non fanno correttamente nessuna delle due operazioni.

Nella foratura le forze sono bilanciate. Più importante è da considerare: Man mano che ci si avvicina all'asse della punta i taglienti lavorano ad una velocità di taglio minore, per cui la finitura superficiale peggiora. È per questo motivo che i taglienti delle punte da trapano non arrivano al centro della punta. Dunque la punta è realizzata con forma conica in modo tale da spostare il materiale in lavorazione verso le zone di lavorazione laterali. Insomma funge da scalpello allontanando il materiale dall'asse di rotazione. Saranno dopo i taglienti ad asportarlo effettivamente. Tra l'altro, la forza per spostare il materiale è la maggiore parte di forza utilizzata per tale lavorazione. Infatti di solito si utilizza prima una foratura più fina per una prima asportazione, poi viene eseguita la foratura principale che porta il foro alla dimensione desiderata.

Ovviamente lo scalpello della punta si usura e dunque si dovrà applicare maggiore forza alla punta. Per cui la forma dello scalpello si è evoluta in modo da rendere minore la forza di spinta da applicare alla punta. In più, sulle scanalature elicoidali sono presenti delle scanalature ulteriori che fungono da rompitrici.

Ulteriore problematica è quella dello spostamento dell'asse della punta. Allora si utilizza una punta da centri per "indicare" alla punta da trapano la direzione di foratura.

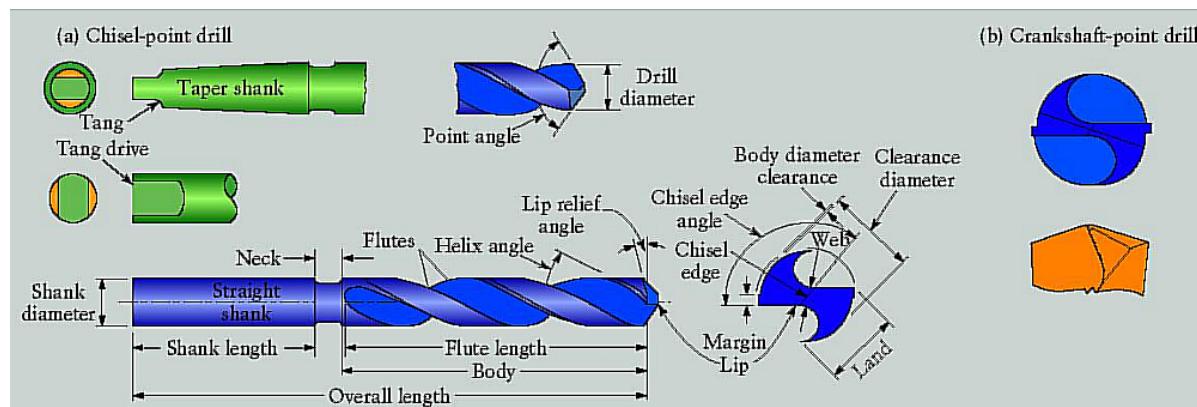
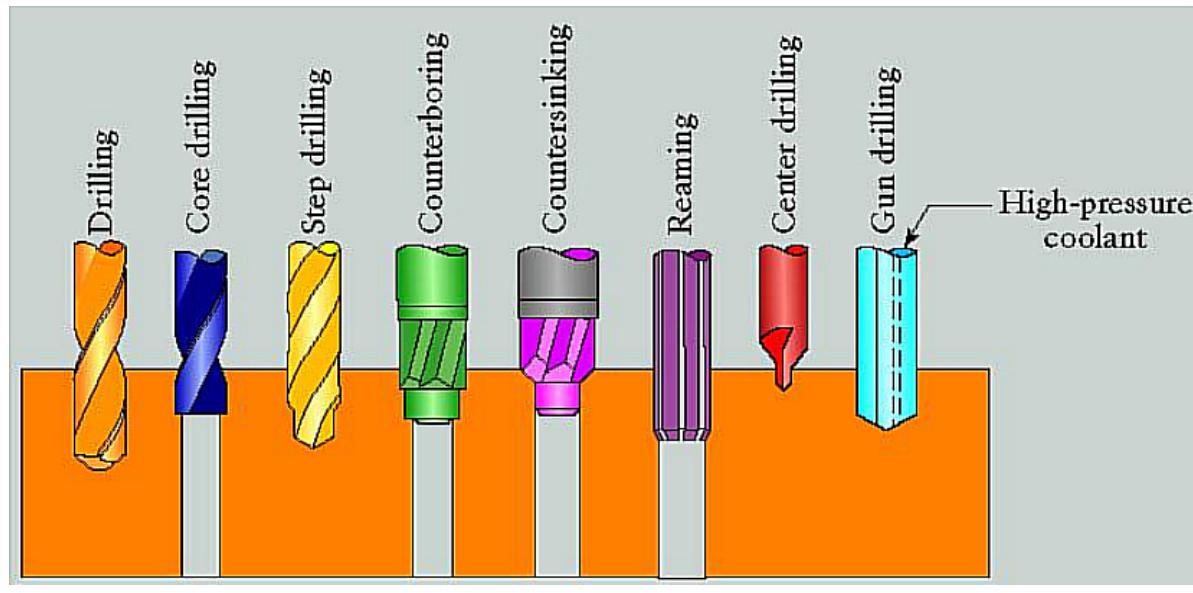
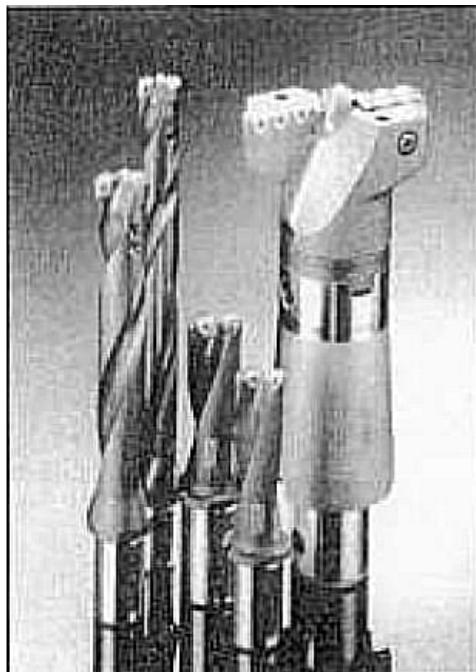


Figura 4.1: Alcune punte da trapano per diverse forature



(a) Principali punte da trapano



(b) Punte per foratura



(c) Esempi di meccie

Figura 4.2: Varie tipologie di punte da trapano

L'angolo dell'elica rappresenta l'angolo di spoglia periferica della punta. L'angolo di spoglia diminuisce avvicinandosi al centro della punta. Per favorire lo spostamento del truciolo, spesso si utilizzano delle punte con angolo d'elica particolarmente elevato.

Dove c'è dello spazio grigio indica il fatto che si deve eseguire un prima foratura prima di usare quell'utensile.

Con riferimento alla figura 4.2a, rispettivamente sono:

1. Punta da trapano classica;
2. Va usato dopo l'utensile precedente e semplicemente allarga il foro
3. Realizza un foro a due diametri detta anche *step-drilling*
4. Realizza un gradino su un foro già realizzato, viene detta anche *lamatura*
5. Stesso obiettivo della precedente *Utensile a lamare*
6. stesso del precedente *Utensile a svasare*
7. Utensile di *alesatura* va semplicemente a rifinire il foro fatto in precedenza.
8. Punta da centri, realizza un piccolo foro per guidare la punta da trapano.
9. È un utensile utilizzato in particolare per lavorazioni su lamiere.

In genere le punte da trapano sono degli utensili di materiali monoblocco. Esistono anche delle punte da trapano che presentano degli inserti. Certo si hanno dei fori un po' magiori per via delle dimensioni degli inserti. Eventualmente si ricorre a dei trattamenti termochimici per aumentare la durata della punta.

Ulteriori utensili sono mostrati in figura 4.2c. Le Mecchie sono utilizzate per realizzare fori di piccola profondità. Le meccie di forma conica permettono di realizzare dei fori in base alla profondità a cui si spinge la punta a diametro variabile. Spesso usate per lavorazioni su lamiere.

4.1 Tipologie di trapani

Alcuni esempi di trapanio sono riportati alle figure 4.4. Risulta molto riduttivo parlare di macchine che eseguono solo trapanature (nonostante esistano e vengano tutt'oggi prodotte) perché ormai soppiantate dai centri di lavoro Flexible Manufacturing Systems (FMS). Di fatto l'evoluzione dei centri FMS

WORKPIECE MATERIAL	SURFACE SPEED m/min	FEED, mm/rev		DRILL DIAMETER 1.5 mm	RPM 12.5 mm
		1.5 mm	12.5 mm		
Aluminum alloys	30-120	0.025	0.30	6400-25,000	800-3000
Magnesium alloys	45-120	0.025	0.30	9600-25,000	1100-3000
Copper alloys	15-60	0.025	0.25	3200-12,000	400-1500
Steels	20-30	0.025	0.30	4300-6400	500-800
Stainless steels	10-20	0.025	0.18	2100-4300	250-500
Titanium alloys	6-20	0.010	0.15	1300-4300	150-500
Cast irons	20-60	0.025	0.30	4300-12,000	500-1500
Thermoplastics	30-60	0.025	0.13	6400-12,000	800-1500
Thermosets	20-60	0.025	0.10	4300-12,000	500-1500

Figura 4.3: Velocità consigliate di trapanatura

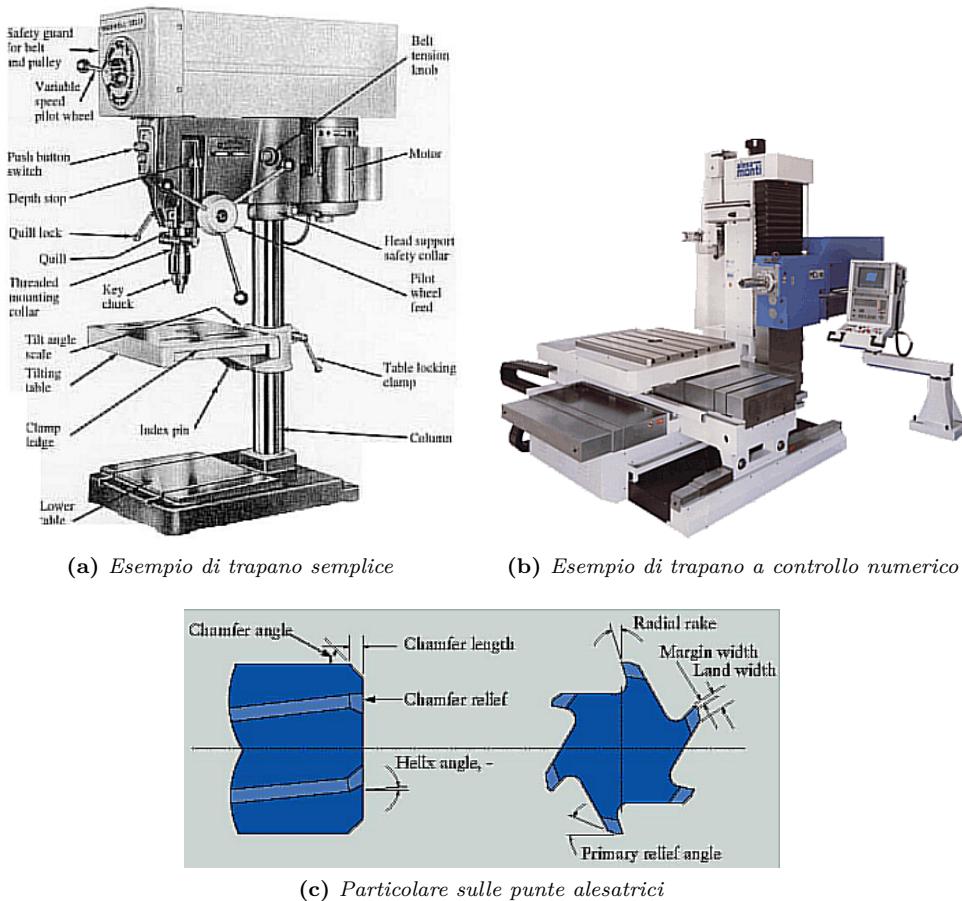


Figura 4.4: Alcuni esempi di trapani e dettaglio punta alesatrice

ha ormai inglobato quasi tutte le possibili lavorazioni per asportazioni di truciolo in un'unica macchina. Di questo se ne parlerà nel capitolo 8 a pagina 50.

Piccolo approfondimento per le punte da alesaggio.

Le punte da alesaggio 4.4c hanno scanalature piccole, questo perché si ha meno materiale da rimuovere, in più si ha una maggiore rigidezza dell'utensile per via del maggiore spessore del centro. In generale gli utensili alesatori hanno angoli di elica sono molto molto piccole o addirittura cilindriche.

CAPITOLO 5

Fresatura

È la lavorazione più versatile che si può trovare in officina, permette di realizzare la più grande varietà di forme. Un esempio è quello della fresatrice orizzontale: 5.1 determinato dall'asse di rotazione dell'utensile. L'utensile può presentare taglienti elicoidali sia cilindrici.

Siccome la varietà di lavorazioni è alta, anche la gamma di utensili è piuttosto ampia.

L'evoluzione della lavorazione ha portato al fatto che gli utensili non sono sostenuti da due "cerniere". Piuttosto si utilizzano utensili fissati a singolo punto. Il tipo ideale di fresatura si chiama *fresatura periferica*.

5.1 Fresatura periferica

Come anticipato, l'utensile può essere ad elica o a scanalature cilindriche. In genere si preferisce il tagliente ad elica perché subisce meno urti e si possono avere più taglienti immersi sul materiale contemporaneamente.

Le eliche possono essere in concordanza 5.2b o opposizione 5.2a. La differenza, oltre che alle direzioni di lavorazione e alimentazione sta anche nel metodo di asportazione. Infatti nella lavorazione in concordanza il tagliente, in figura 5.2d, incontra immediatamente la superficie del lavorato. Ciò provoca urti più alti al tagliente e in potrebbe incontrare pure degli ossidi che rendono il materiale più duro.

Mentre la lavorazione in opposizione, figura 5.2c, presenta un problema di deformazione elastica: siccome lo spessore indeformato è nullo, il tagliente andrà a schiacciare il materiale andandolo a subire il successivo comportamento elastico.

In generale si sfrutta la fresatura in concordanza nel caso in cui si predilige una migliore finitura superficiale e il materiale non è stato trattato a caldo: per cui non presenta ossidi superficiali che potrebbero consumare molto rapidamente i taglienti. Altrimenti si sfrutta la fresatura in opposizione al netto delle peggiori tolleranze dimensionali ottenibili per via del ritorno elastico e la maggiore rigidezza della macchina necessaria per via dello scambio di forze che si va a verificare durante la lavorazione.

La lavorazione in definitiva viene detta anche *spianatura*. A differenza di quanti visto per la piallatrice o levigatrice, la lavorazione risulta più veloce in quanto non è necessaria la corsa di ritorno e l'utensile può essere parecchio largo.

La spianatura può essere realizzata anche tramite utensile a sbalzo monotagliente.

5.2 Fresatura verticale

In questo caso si ha l'asse dell'utensile in verticale rispetto al lavorato. Attenzione che l'utensile è a sbalzo e non più fissato a due punti, quindi generalmente più rigido. Può essere che queste macchine sfruttino una tecnologia ibrida per cui possono realizzare sia lavorazioni in verticale che in orizzontale.

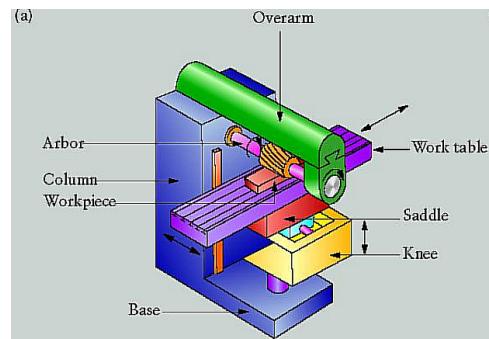


Figura 5.1: Esempio di fresatrice orizzontale

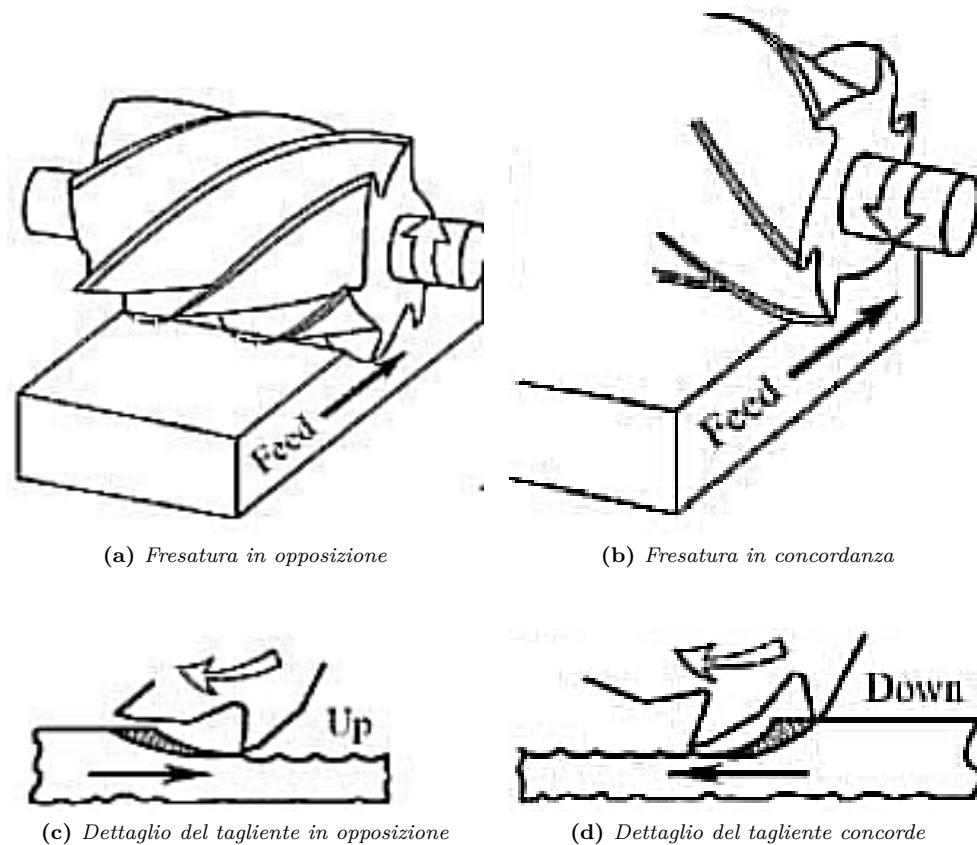


Figura 5.2: Fresatura in opposizione e concordanza

Come mai si preferisce un'utensile a sbalzo rispetto ad uno più rigido magari fissato in due punti?

È più facile cambiare utensile e può essere fatto automaticamente. Anche l'accessibilità alla zona di lavoro non è da sottovalutare. L'affermazione di tali macchinari è, dunque, puramente pratico. Per cui si preferisce che l'utensile sia a sbalzo.

5.2.1 Fresa a codolo

La fresa a codolo, in figura 5.4, è molto simile ad un trapano, ma la punta non presenta lo scalpello in virtù del fatto che l'elica non ha lo scopo di effettuare una foratura. Bensì l'elica ha lo scopo di evitare degli urti del tagliente che teoricamente potrebbe essere perfettamente cilindrico. La tipica lavorazione di questa macchina è l'ottenimento di oggetti a piani paralleli. Si ottengono dei gradini per via della lavorazione a piani paralleli, quindi sarà necessaria una successiva passata di finitura per ottenere una forma continua. Tra l'altro, i piani non per forza devono essere orizzontali.

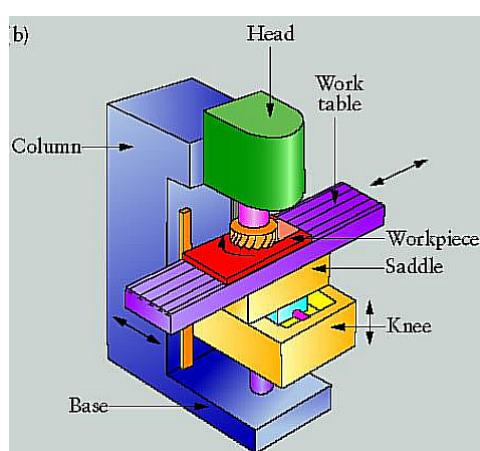


Figura 5.3: Esempio di fresa verticale

tali, possono essere anche verticali o a diversa inclinazione. Indubbiamente l'automazione di queste macchine è fondamentale. Le quali possono realizzare delle forme che non sarebbero ottenibili con altre macchine. In generale macchine ad alta automazione vengono anche chiamate *centro di lavoro*. Sono delle macchine ad alta automazione che uniscono i vantaggi delle principali lavorazioni per asportazione di truciolo. Realizzano lavorazioni su tutte e 5 le facce del pezzo (La faccia di riferimento è quella appoggiata al porta-pezzo). In inglese **FMS**.

Una prodotto tipico di queste lavorazioni sono gli stampi.

Per ridurre tale condizione, evitando di fare più passate successive, si possono usare delle frese a codolo a testa sferica, **5.5**, che evitano il problema della velocità radiale nulla al centro della punta. Vanno usate ad un'inclinazione di circa $15^\circ \div 30^\circ$ per mantenere una buona velocità radiale in qualsiasi punto dei taglienti.

Il controllo numerico

Asse controllato quando di quell'asse se ne può controllare posizione e velocità

Quanti assi controllati per ogni tipo di lavorazione?

Per il trapano ad esempio è sufficiente un solo asse, l'avanzamento della punta. Per il tornio ne bastano due: uno in direzione ortogonale all'asse di rotazione del pezzo e uno in direzione parallela. Per la fresatrice invece sono 3.

Negli assi mandrino, si controllano solamente la velocità quindi non viene considerato come asse controllato.

Quando si parla di macchine a più assi (4,5) si possono avere delle rotazioni dell'utensile. Eventualmente Si possono sfruttare degli utensili a testa sferica (opportunamente inclinati per non avere velocità nulle sull'asse di rotazione).

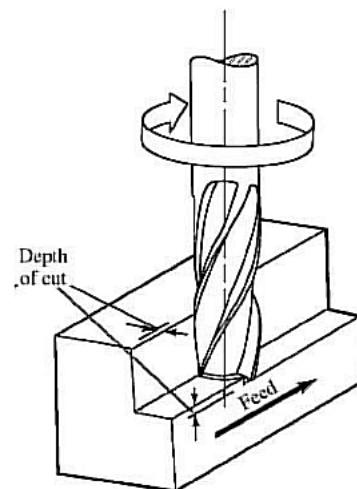


Figura 5.4: Schematizzazione della fresatura a codolo



Figura 5.5: Esempio di frese a testa sferica

CAPITOLO 6

Altre Lavorazioni

6.1 Taglio con sega

Risulta una forma di fresatura, con dei taglienti molto fini. In genere si sfrutta un'utensile cilindrico molto fino al quale vengono attaccati i taglienti che possono essere di materiale diverso da quello dell'utensile stesso. Viene spesso utilizzata per separare due parti di materiale. In figura 6.1a ne sono presentate alcune.

6.2 Brocciatura e taglio di filetti

6.2.1 La brocciatura

si ha sempre un'utensile di forma, di cui se ne controlla solo il moto primario. Ciò è possibile perché l'avanzamento viene realizzato per cui sarà il tagliente ad avanzare autonomamente. La maggior parte del materiale verrà asportata di taglienti detti di sgrossatura per poi essere finiti dai taglienti di finitura. Ad ogni componente da realizzare il suo utensile.

Solitamente si eseguono dei fori non circolari. Si effettua da prima un foro circolare per poi passare con la *broccia*, in figura 6.2a, che realizza forme particolare come richiesto.

Si tratta di un utensile parecchio costoso per via del fatto che è un'utensile massiccio. Viene utilizzato solitamente per la produzione in grande serie, per ammortizzare meglio il costo. I taglienti asportano il materiale in maniera progressiva, in figura 6.2b, a differenza di quanto visto per altri utensili precedenti. Da considerare l'eventuale deflessione dell'utensile posta dalla resistenza meccanica del materiale lavorato, soprattutto per brocciature esterne. Per quelle interne non sussiste il problema. La boccia può essere spinta nel materiale oppure tirato. Se spinto si sfruttano delle brocce piuttosto corte per via dell'ampia deflessione che si va a generare. Discorso diverso nel caso in cui l'utensile viene tirato, per cui si possono avere brocce fino a 2m.

6.2.2 Filettature

L'operazione non è molto diversa da quella precedente: cambia il tipo di moto applicato all'utensile: nella filettatura si ha un moto di rotazione elicoidale per cui l'utensile avanza radialmente e longitudinalmente.

Normalmente la filettatura viene realizzata tramite deformazione plastica, si ha incrudimento per lavorazione a freddo, non si asporta materiale e dunque le fibre del materiale non vengono tagliate orientandole in senso assiale rispetto alla filettatura dando ulteriore resistenza meccanica.

6.3 Aspetti conclusivi

Alla figura 6.4, vengono riportate quali sono le principali lavorazioni ottenibili per asportazione di truciolo. Vengono anche specificate le tolleranze minime ottenibili. Mentre alla figura 6.5, sono indicati quali siano le produttività.

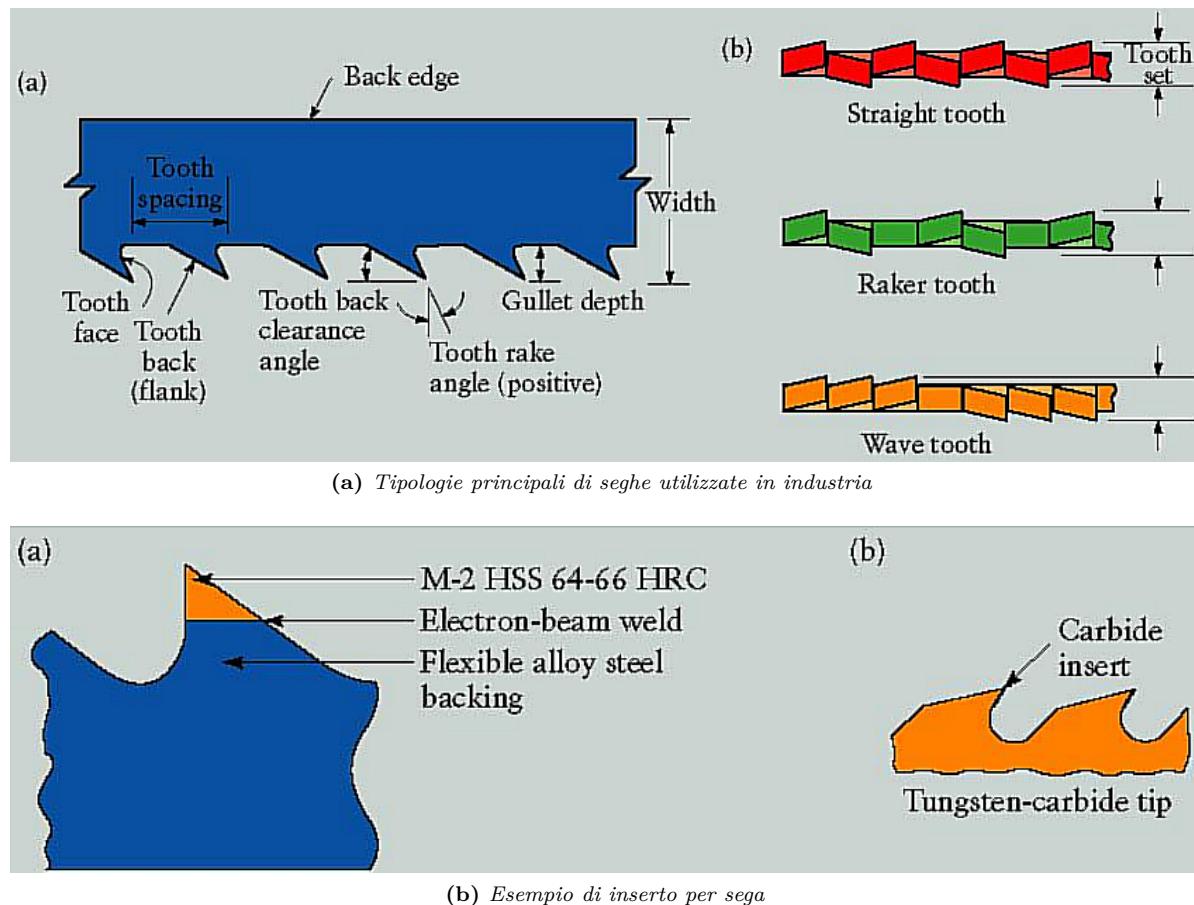


Figura 6.1: Breve descrizione delle seghe industriali

6.4 Produzione di ingranaggi

Per la produzione di ingranaggi si sfruttano quasi tutte le lavorazioni che si sono viste in precedenza come evidenziato dalla figura 6.6. In particolare, gli ingranaggi per applicazioni critiche, sono ancora realizzati tramite lavorazioni per asportazione di truciolo. Ciò garantisce un'ottima finitura di forma, arrivando a tolleranze molto restrittive. Spesso sono lavorazioni di forma, con moto alternativo (caso della lamatura), oppure rotativo (caso della fresatura).

Più complicata è la realizzazione di ingranaggi conici. Si devono utilizzare degli utensili di forma, su macchine più adatte per tale scopo.

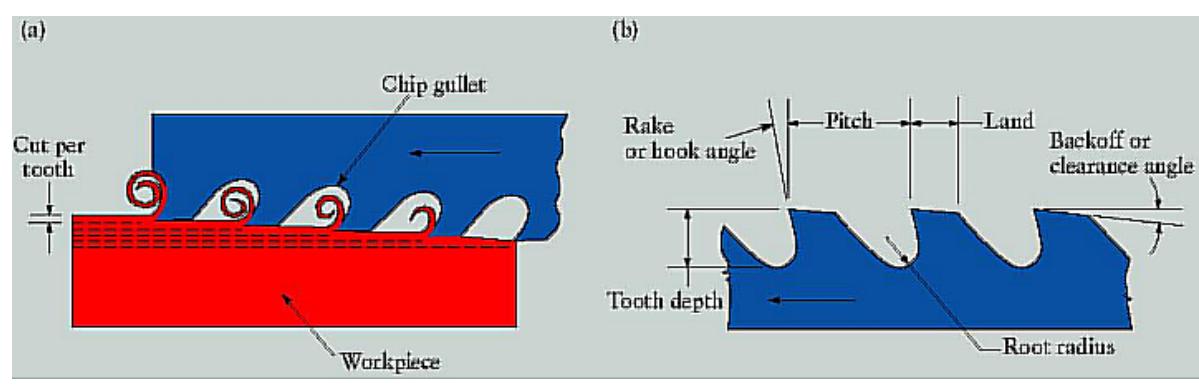
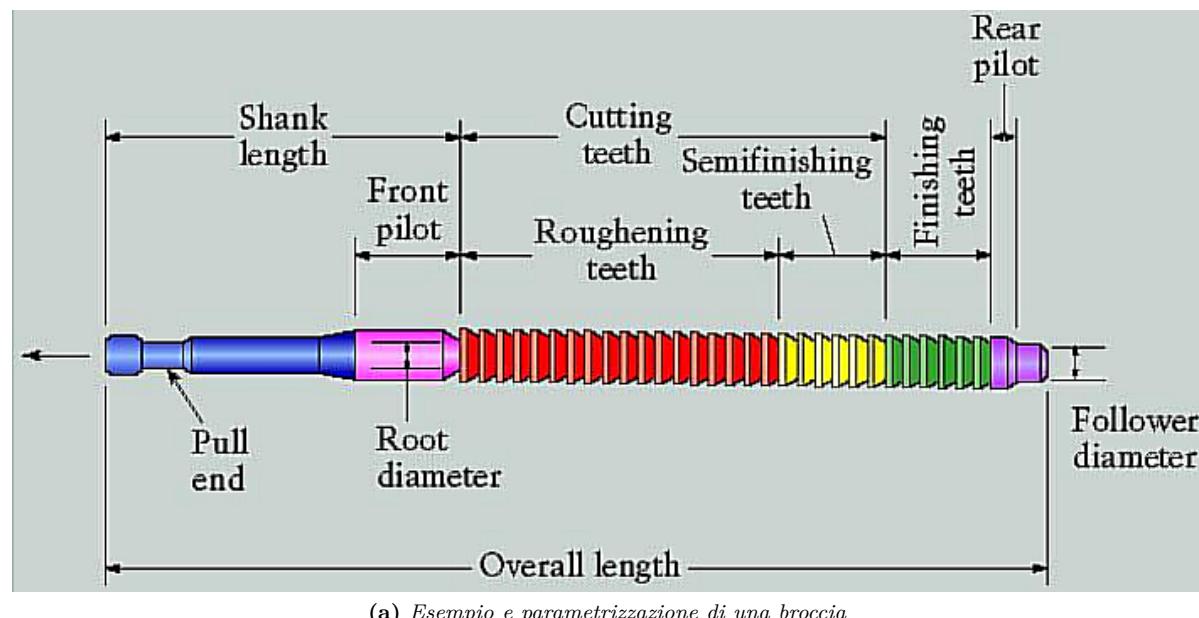


Figura 6.2: Brocciatura

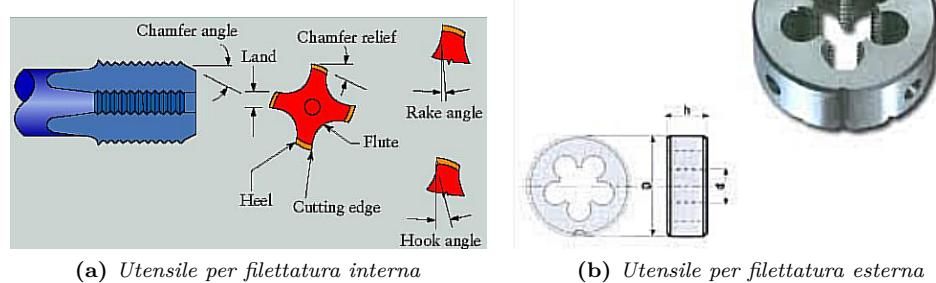


Figura 6.3: Utensili per filettature

Process	Characteristics	Commercial tolerances (±mm)
Turning	Turning and facing operations on all types of materials; requires skilled labor; low production rate, but medium to high with turret lathes and automatic machines, requiring less-skilled labor.	Fine: 0.05-0.13 Rough: 0.13 Skiving: 0.025-0.05
Boring	Internal surfaces or profiles, with characteristics similar to turning; stiffness of boring bar important to avoid chatter.	0.025
Drilling	Round holes of various sizes and depths; requires boring and reaming for improved accuracy; high production rate; labor skill required depends on hole location and accuracy specified.	0.075
Milling	Variety of shapes involving contours, flat surfaces, and slots; wide variety of tooling; versatile; low to medium production rate; requires skilled labor.	0.13-0.25
Planing	Flat surfaces and straight contour profiles on large surfaces; suitable for low-quantity production; labor skill required depends on part shape.	0.08-0.13
Shaping	Flat surfaces and straight contour profiles on relatively small workpieces; suitable for low-quantity production; labor skill required depends on part shape.	0.05-0.13
Broaching	External and internal flat surfaces, slots and contours with good surface finish; costly tooling; high production rate; labor skill required depends on part shape.	0.025-0.15
Sawing	Straight and contour cuts on flats or structural shapes; not suitable for hard materials unless saw has carbide teeth or is coated with diamond; low production rate; requires only low labor skill.	0.8

Figura 6.4: Riepilogo lavorazioni per asportazione di truciolo

OPERATION	RATE
Turning	
Engine lathe	Very low to low
Tracer lathe	Low to medium
Turret lathe	Low to medium
Computer-control lathe	Low to medium
Single-spindle chuckers	Medium to high
Multiple-spindle chuckers	High to very high
Boring	Very low
Drilling	Low to medium
Milling	Low to medium
Planing	Very low
Gear Cutting	Low to medium
Broaching	Medium to high
Sawing	Very low to low

Note: Production rates indicated are relative: *very low* is about one or more parts per hour; *medium* is approximately 100 parts per hour; *very high* is 1000 or more parts per hour.

Figura 6.5: Indicazioni sulla produttività delle specifiche lavorazioni per asportazione di truciolo

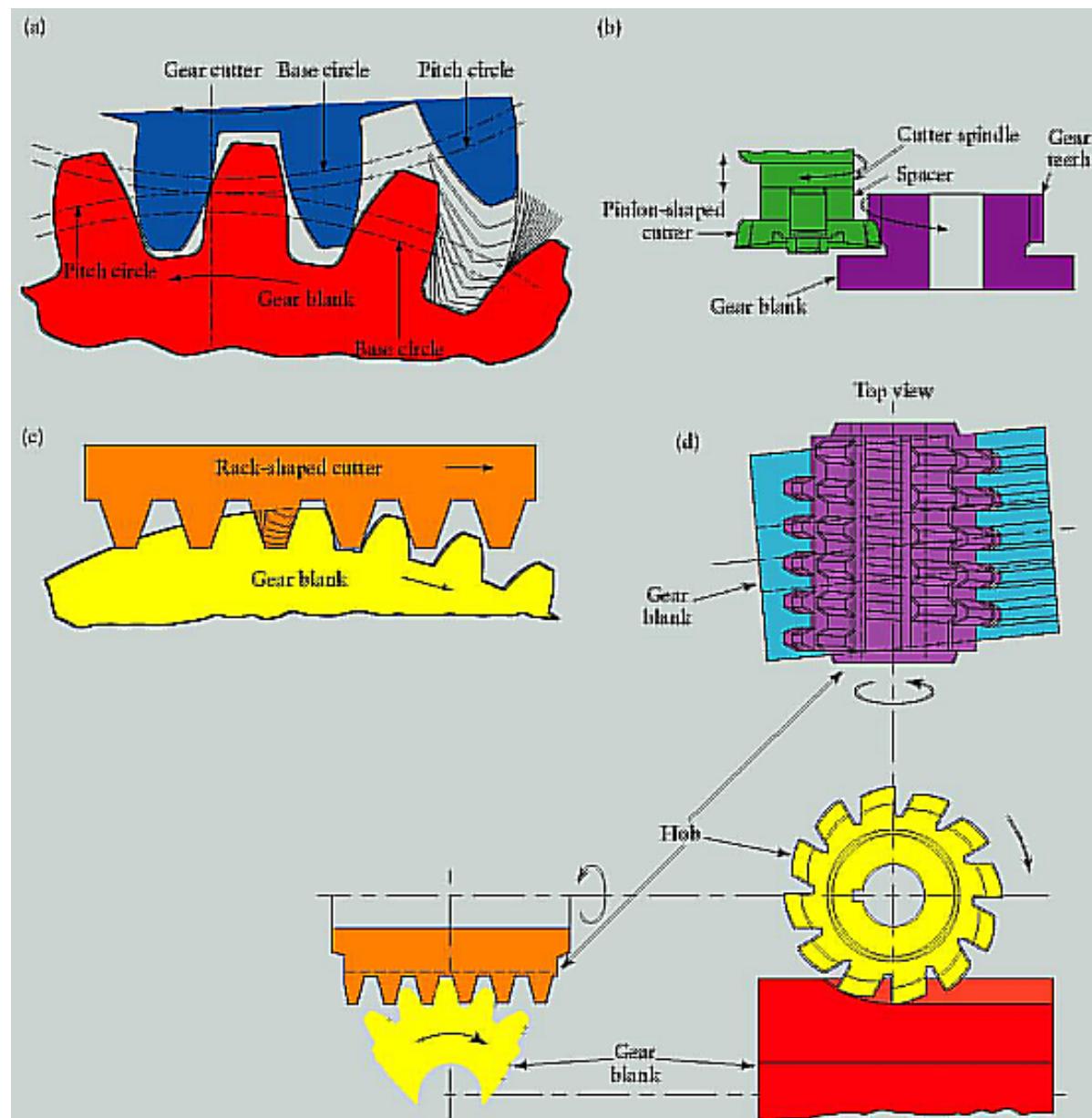


Figura 6.6: Alcuni utensili per la produzione di ingranaggi

CAPITOLO 7

Variabili di processo per lavorazioni in asportazione di truciolo

GLi aspetti principali da considerare per tali lavorazioni sono:

- Finitura superficiale
- lavorabilità,
- forma,
- dimensioni,
- tolleranze,
- tipo di lavorazione,
- macchine disponibili,
- valutazioni economiche

La prima decisione necessaria è la sequenza delle operazioni da eseguire. Per ogni lavorazione bisogna scegliere velocità di taglio e avanzamento in funzione dei materiali del pezzo e utensile. Anche la fase della lavorazione va tenuta in conto, sgrossatura e finitura hanno due obiettivi diversi e necessitano considerazioni diverse.

La finitura superficiale e le tolleranze dimensionali richieste vengono ottenute eseguendo un taglio di finitura con valori piccoli di avanzamento e profondità di passata. Per cui in caso di oggetti near net-shape, che possono presentare degli ossidi per via di lavorazioni a caldo precedenti, deve tenere in considerazione che un'operazione di finitura andrà a consumare maggiormente l'utensile: sapendo che il cambio utensile può essere svantaggioso in termini di finitura superficiale.

In una piccola officina il tempo non è un fattore eccessivamente importante. Spesso ci si basa sull'esperienza dell'operatore per gestire la lavorazione. Diverso è il discorso per un'azienda ad alta produttività, in cui per tenere basso il tempo ciclo di produzione è critico. In questo caso, il set-up può essere particolarmente problematico, allora alcuni enti hanno costituito col tempo, dei manuali da cui prendere spunto per realizzare una lavorazione abbastanza rapidamente e senza eccessivo consumo dell'utensile. Alcuni esempi sono alle figure 7.1 e 7.2.

Ricordiamo che l'usura dell'utensile è determinata dalla temperatura raggiunta dall'utensile. La temperatura, a sua volta, dipende dalla velocità di taglio.

Alla figura 7.1 è mostrato un grafico che da una prima indicazione su come eseguire un tornitura per materiali ferrosi a diversa durezza.

Nello specifico l'operazione di riferimento è una sgrossatura al tornio, con taglienti che sono in acciai HSS oppure in carburo di titanio (non meglio specificati). Il funzionamento è semplice: dato un lavorato

di una certa durezza, si può ottenere una prima velocità di lavorazione sulla base di questo grafico. la velocità dipende dal tipo di utensile sfruttato.

Altri grafici simili a 7.2 vengono disposti per lavorazioni simili alla precedente ma su materiali non ferrosi, come indicati nella didascalia del grafico.

I grafici 7.1 e 7.2 aiutano a scegliere i principali 3 parametri per le operazioni di sgrossatura. Gli avanzamenti vanno scelti in funzione delle durezze dei materiali in cui si va a lavorare. Si ha un'indicazione generica, un punto di partenza prudente, per la lavorazione. Le stime si basano sul portare la durata dell'utensile accettabile per circa 1-2 ore. Tramite prove tecnologiche, si può accelerare la lavorazione se l'utensile arriva ad un tempo superiore alle 2 ore. I riferimenti sono per un'operazione di tornitura. I manuali danno, in genere, i parametri di riferimento per altre operazioni come: fresatura, piallatura ecc...

Alla figura 7.3 sono riportati alcuni fattori di confronto rispetto alla lavorazione di riferimento. L'applicazione di tali coefficienti è riportata in descrizione alla figura. Importanti sono: Z_p e Z_f sono dei coefficienti da moltiplicare ai riferimenti ottenuti dalla tornitura alle altre lavorazioni. In generale valgono le seguenti:

$$v = Z_v * v_s \quad (7.1)$$

$$f = Z_f * f_s \quad (7.2)$$

$$w = \text{Depth of cut} * w_s \quad (7.3)$$

La foratura con punta da trapano viene trattata a parte per via della sua natura. in generale si hanno dei valori piuttosto simbolici tipo $v = 0.7 * v_s$ per il ferro e $v = 0.5 * v_s$ per materiali non ferrosi. Per esempio anche la profondità del foro gioca un ruolo importante nel controllo della temperatura. Gli altri parametri dipendono dall'elica della punta, dal materiale della punta e dalla profondità come detto prima. Anche la brocciatura ha dei parametri diversificati per cui viene descritta a parte.

Altri miglioramenti, in termini di velocità, si differenziano in base al materiale dell'utensile: per utensili ceramici si possono quasi raddoppiare le velocità di lavorazione (ovviamente da vedere nel caso specifico).

Non bisogna dimenticare anche altri aspetti tipo: rigidezza della macchina, il pezzo da ottenere, elementi di fissaggio, ecc... Una macchina di alto livello riesce ad assorbire le vibrazioni non cedendole all'utensile: ottenendo un controllo migliore sulla lavorazione.

7.1 Durata lavorazione e potenza macchina

Una volta scelti i parametri di velocità e avanzamento di solito si stimano in sequenza:

1. la quantità di volume da rimuovere.
2. la velocità di rimozione del truciolo
3. Dai parametri precedenti si può stimare la durata della lavorazione come

$$t_c = \frac{\text{velocità di taglio}}{\frac{v_c}{V_t}} \quad (7.4)$$

volume rimosso

4. Si stimano energia specifica e successivamente la potenza richiesta dalla macchina.

Si ricorda che la velocità di asportazione è data dalla velocità di taglio per la sezione trasversale del truciolo: spessore indeformato e profondità di passata.

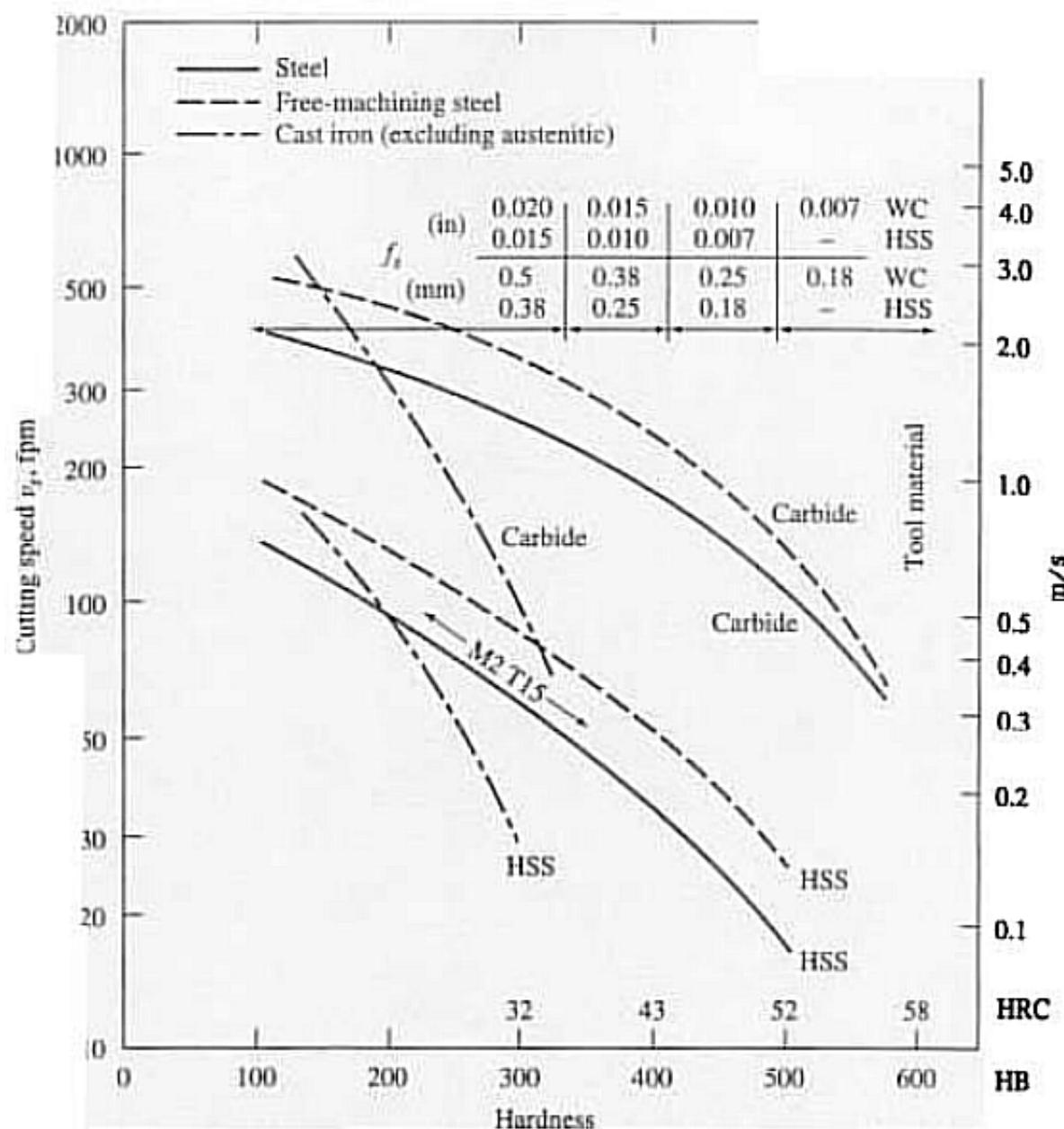


Figure 16-45 Typical speeds and feeds for roughing ferrous materials with a 3.8-mm (0.150-in) depth of cut. Increase speed by 20% for throwaway carbide inserts; reduce speed by 20–30% for austenitic stainless steels and for tool steels containing over 1% carbon.

Figura 7.1: Relazione tra durezza del materiale lavorato, velocità della lavorazione e avanzamento dell'utensile.

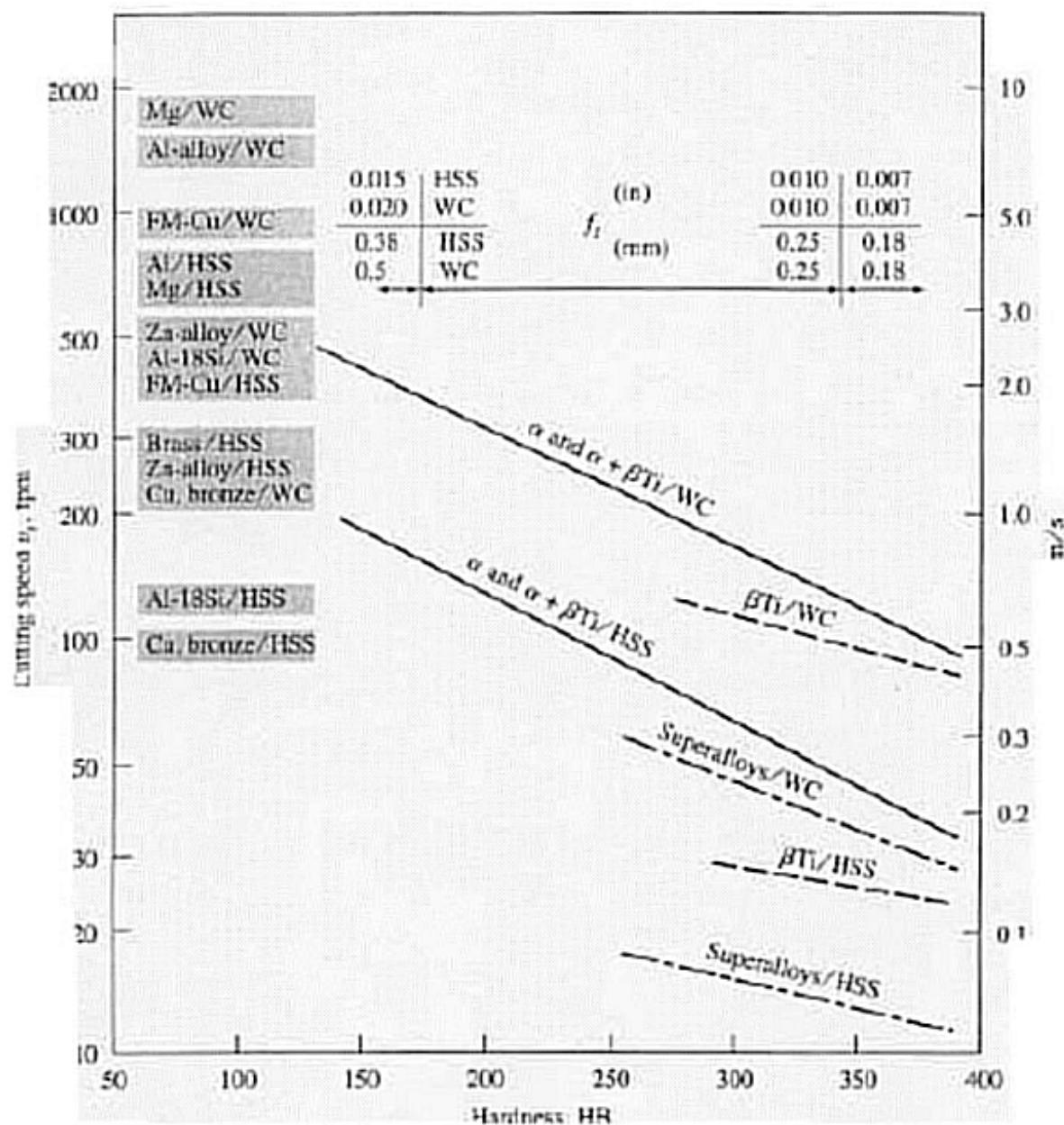


Figure 16-46 Typical speeds and feeds for roughing nonferrous materials with a 3.8-mm (0.150-in) depth of cut (FM stands for free-machining metal, WC for carbide tool).

Figura 7.2: Prima velocità per materiali non ferrosi

Table 16-5 Speeds and feeds in various metal-cutting operations*

Process	Z_v	Depth of Cut, mm	Z_f	Other
Rough turning	1	4		
Finish turning	1.2–1.3	0.65	0.5	
Form tools, cutoff	0.7			In-feed 0.1 f –0.2 f
Shaping	0.7	4		Feed: HSS, 1.5–0.5 mm WC, 2–1 mm ($\times 2$ on Cu, Al, and Mg)
Planing	0.7	4		
Face milling	1	4	0.8–1 [†]	
Slab milling		4	0.5 [†]	
Side and slot milling	0.5–0.7	4	0.5 [†]	
End mill, peripheral		1.2	0.5–0.25 [†]	For 25-mm-diameter cutter
End mill, slotting		1.2	0.2 [†]	
Threading, tapping	0.5–0.25			Slower for coarser thread

*Extracted from *Machining Data Handbook*, 3d ed., Machinability Data Center, Metcut Research Associates, Cincinnati, Ohio, 1980.

[†]Feed per tooth.

NOTE: Speed $v = v_s Z_v$ and feed $f = f_s Z_f$; take v_s and f_s from Fig. 16-45 or 16-46.

Figura 7.3: Parametri modificatori per lavorazioni diverse da quelle di riferimento (tornitura in sgrossatura)

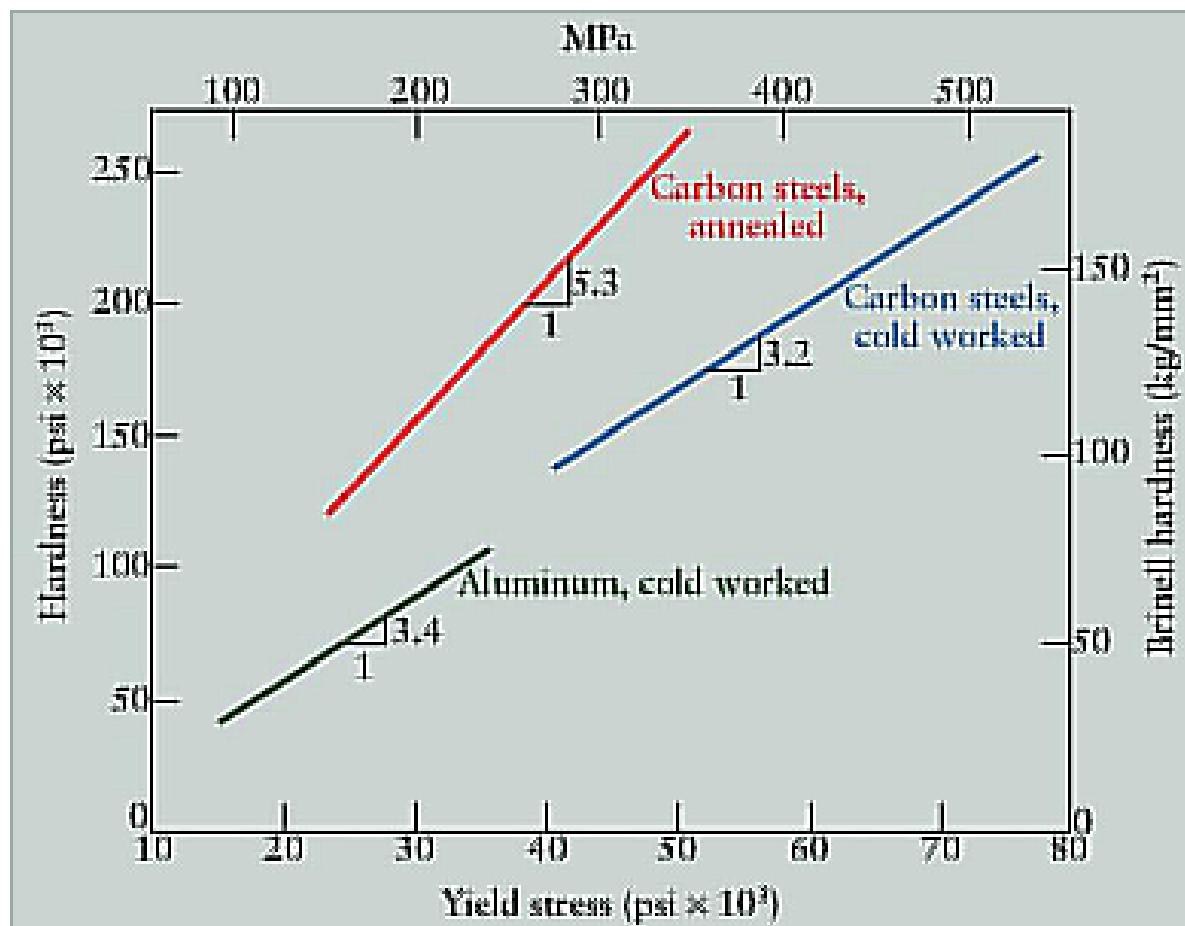


Figura 7.4: Specifiche durezza dei materiali

7.1.1 Esempio applicativo

Esempio. 7.1.1: Esempio applicativo

Si vuole allargare un foro in un getto in acciaio con un utensile in carburo. Il diametro iniziale è $D_i = 130\text{mm}$ a $D_f = 138\text{mm}$. Si vuole suggerire velocità di taglio e avanzamento, profondità e potenza necessaria.

Da manuale (7.1), (7.3) e (7.4) si ottengono:

- UTS del materiale: in questo caso UTS = 485MPa.
- da cui si ricava HB = $3 * 485 * 9.8 = 150\text{kg/mm}^2$.

Allora possiamo stimare;

- Profondità di passata: $w = (138 - 130)/2 = 4\text{mm}$,
- Dal grafico otteniamo: $v_s = 1.8\text{m/s}$ che può essere aumentata del 20% per via dell'utensile usa-e-getta al carburo da cui: $v_s = 1.8 * 1.2 = 2.16\text{m/s}$

Siccome stiamo trattando una tornitura di interni:

- avanzamento: $f_s = 0.5\text{mm}$
- siccome $Z_f = 1$ allora $f = 0.5\text{mm}$
- Area trasversale truciolo: $A = f * w = 0.5 * 4 = 2\text{mm}^2$
- Volume asportato: $V_t = A * v_s = 4320\text{mm}^3/\text{s}$

Per calcolare la potenza:

- Dalla tabella: $E_1 = 2.1\text{Ws/mm}^2$

CAPITOLO 8

Macchine Utensili

Spesso il cliente chiede delle macchine con delle specifiche particolari in base alle lavorazioni che necessita. In generale sono le dimensioni che differenziano le macchine. Può capitare che ci siano delle necessità particolari per delle operazioni molto particolari.

Un caso particolare è rappresentato dalle macchine esapodi: presentano sei colonne che possono allungarsi e accorciarsi. Il vantaggio è che data la geometria impedisce alle colonne di flettere ma solo di porsi in trazione e compressione. Ciò dovrebbe garantire altissima precisione e accuratezza nella lavorazione ma non hanno avuto grande successo per via del grande ingombro rispetto al volume lavorabile. Dunque poco adatte per una lavorazione industriale.

Si era già accennato lo sviluppo delle macchine Controllo Numerico Computerizzato (CNC). La diffusione di tali macchine è dovuta all'integrazione tra macchina e processore. La programmazione di queste macchine è in linguaggio ISO, in figura 8.1a. Non è un linguaggio particolarmente comprensibile. Dunque gli sviluppi successivi hanno portato allo sviluppo del linguaggio APT, in figura 8.1b. Grazie all'evoluzione dei successivi sistemi CAD-CAM, si è sviluppato un metodo di programmazione più efficace. Si parte dal modello solido sviluppato tramite CAD, da cui vengono aggiunte delle geometrie semplici e poche istruzioni viene generato il linguaggio ISO da un compilatore. Il risultato viene fornito alla macchina che potrà, dunque, lavorare.

Ulteriore problematica ed eventuale miglioramento delle macchine sta nella capacità di assorbire le vibrazioni. In generale le vibrazioni non sono ben volute durante queste lavorazioni per via del fatto che peggiorano la finitura. In più possono essere dannose per la componentistica abbordo macchina.

Passando ad un altro aspetto: ovvero la stabilità termica. In generale una macchina provoca calore nella lavorazione. Dunque è necessario considerare l'eventuale dilatazione termica dovuta all'incremento della temperatura. Allora sono state sviluppate delle tecniche di controllo adattativo: ovvero le macchine riescono a compensare delle variazioni durante la lavorazione, proprio come la dilatazione termica. Per esempio può essere rilevata la variazione dimensionale di un pezzo proprio per dilatazione termica, allora si può adattare la profondità dell'utensile per compensare tale variazione. Per questo scopo devono essere montati dei sensori abbordo macchina. Eventualmente è necessario scegliere dei motori della macchina che possano compensare eventuali errori nel posizionamento come i motori a passo.

```
%  
:0001 { BOX 24/32/12 FASE 1°)  
N1 G17  
N2 G54  
N3 (T1 - FRESA A CANDELA DIAM. 25)  
N4 (T2 - PUNTA DIAM.12)  
N5 (OPERAZIONE INDEX)  
N6 (OPERAZIONE SPIANATURA)  
N7 T01 M06 (FRESA A CANDELA DIAM. 25)  
N8 G00 G90 X-49.556 Y113.033 S4000 M03  
N9 G43 H01 Z5  
N10 G1 Z0.0 F2000 M08  
N11 G1 G42 D01 X-61.917 Y74.991  
N12 G1 X-94.17 Y-24.275  
N13 G1 X-99.546 Y-40.818  
N14 G3 X-96.737 Y-46.331 R20.3  
N15 G1 X-88.52 Y-49.001  
N16 G3 X-83.007 Y-46.192 R20.3  
N17 G1 X-40.003 Y86.16
```

Esempio di programma in APT

```
.....  
P1=POINT/-40,0,0  
P2=POINT/0,0,0  
C1=CIRCLE/0,0,0,30  
C2=CIRCLE/0,60,0,10  
L1=LINE/LEFT,TANTO,C1,LEFT,TANTO,C2  
.....  
FROM/P1  
INDIRP/P2  
TLLFT,GOLFT/C1,TANTO,L1  
GOFWD/L1,TANTO,C2  
.....
```

(a) Esempio di programmazione in codice ISO (b) Esempio di programmazione in codice APT

Figura 8.1: Esempi di programmazione per macchine CNC

8.0.1 Esempio di controllo numerico

Si evidenziano come i tempi di fissaggi sia la maggior parte di tempo persa durante una lavorazione per asportazione.

8.1 Ottimizzazione delle lavorazioni per asportazioni di truciolo

L'obbiettivo dell'ottimizzazione ha come obiettivo la massimizzazione dell'utile generato. Possono sorgere altri fattori che cambino gli scopi dell'ottimizzazione, come arrivare a produrre un quantitativo di pezzi entro una certa data.

Premesse:

1. Si assume che la capacità della macchina sia adeguata alla lavorazione.
2. Il livello di finitura richiesto deve essere in linea col tipo di lavorazione che si va ad eseguire.
3. I fattori di costo devono essere noti.
4. Si assume che le costanti della formula di Taylor.

$$vT^n = \text{cost.} \quad (8.1)$$

Le costanti note devono essere: n e cost.

Parametri che verranno considerati:

t_c durata lavorazione pezzo [s],

R_t costo unitario [\$/min]



Figura 8.2: Esempio di Macchina CNC

C_t costo di utensile [\\$]

T_{ch} durata cambio utensile [s]

N_t Numero dei pezzi lavorati da un utensile

C_{tp} costo utensile per pezzo lavorato [\\$]

C_{pr} costo per produrre un pezzo [\\$]

Il costo della materia prima e i tempi di carico e scarico non influiscono sui costi di lavorazione. Si va a valutare il costo dell'utensile per pezzo prodotto tramite la formula di Taylor descritta in (8.2).

$$C_{tp} = \frac{1}{N_t} (T_{ch} R_t + C_t) \quad (8.2)$$

a cui verranno sostituite le descrizioni dei vari parametri richiesti dalla stessa formula. Per ottenere il costo di produzione complessivo bisogna aggiungere il costo di lavorazione:

$$C_{pr} = t_c R_t + \frac{1}{N_t} (T_{ch} R_t + C_t) \quad (8.3)$$

Siccome la lavorazione dura:

$$t_c = \frac{l}{v} \quad (8.4)$$

e il numero di pezzi prodotti:

$$N_t = \frac{\overbrace{t}^{\text{Durata utensile}}}{t_c} \quad (8.5)$$

Allora:

$$C_{pr} = \frac{l}{v} R_t + \frac{t_c}{t} (t_{ch} R_t + C_t) \quad (8.6)$$

La durata utensile è rappresentata da:

$$t = t_{ref} \left(\frac{C}{v} \right)^{1/n} \quad (8.7)$$

Definitivamente si ottiene la formula di Taylor adattata per la lavorazione del caso:

$$C_{pr} = \frac{l}{v} R_t + \frac{l}{t_{ref} C^{1/n}} (t_{ch} + r_t) v^{(1-n)/n} \quad (8.8)$$

per trovare il costo di produzione minimo derivo nella velocità la formula di Taylor opportunamente costruita (8.8):

$$\frac{dC_{pr}}{dv} = 0 = -\frac{l}{v} R_t + \frac{1-n}{n} \frac{l}{t_{ref} C^{1/n}} (t_{ch} R_t + C_t) v^{(1-2n)/n} \quad (8.9)$$

Si può esprimere a partire da (8.8) un'espressione della velocità minima della lavorazione per garantire il raggiungimento del target della (8.9):

$$v_{c,\min} = C \left[\frac{n}{1-n} \left(\frac{t_{ref} R_t}{t_{ch} R_t + C_t} \right) \right] \quad (8.10)$$

La velocità di taglio cresce al crescere di n , il quale dipende dal materiale dell'utensile: più pregiato più $n \nearrow$. Inoltre la velocità di taglio ottimale cresce col crescere di R_t : il quale dipende dai vari costi per la gestione dell'azienda, costo operatore, ammortamento macchina ecc...

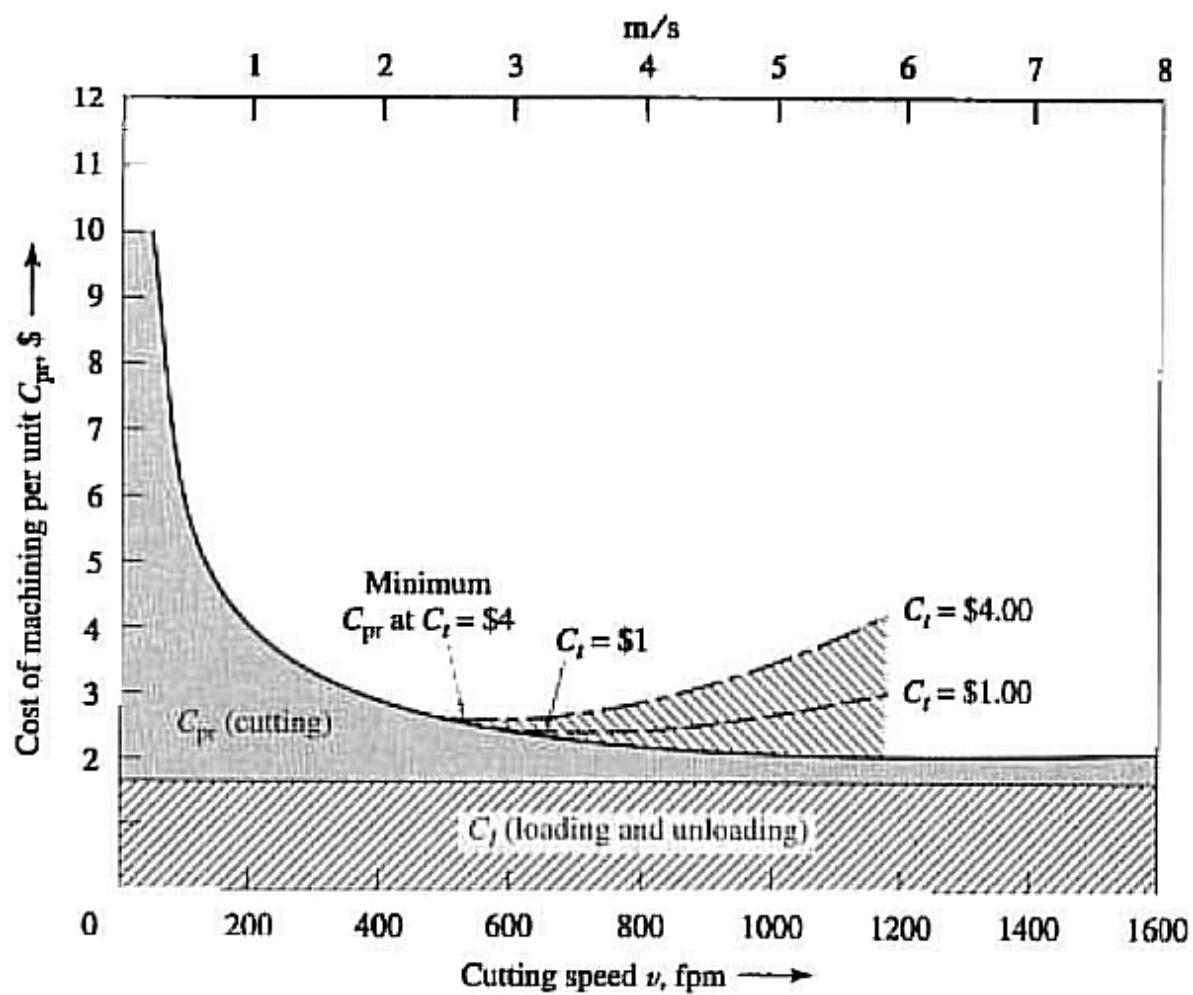


Figura 8.3: Rappresentazione della funzione (8.8)

CAPITOLO 9

Abrasione

Nell'abrasione, a differenza dell'asportazione di truciolo, i taglienti sono piccoli e dispersi casualmente nell'utensile. In più i trucioli sono piccoli, come delle polveri. Si ha per forza una profondità di passata molto piccola, per cui l'energia specifica della lavorazione è molto alta. Dunque sono molto inefficienti per via del fatto che devo spendere tanta energia per rimuovere il materiale. Siccome l'energia dipende dallo spessore di truciolo indeformato, il fatto che venga asportato pochissimo spessore motiva l'alata energia specifica. Per fortuna se ne deve rimuovere molto poco.

In generale queste lavorazioni (9.1) si cerca un'ottima finitura superficiale, a rugosità controllata combinata con una distribuzione desiderabile di tensione residue e uno strato superficiale esente da difetti. Sono processi spesso utilizzati per la finitura dei materiali duri.

Data la tipologia dei taglienti: dispersi e con forma variabile, non c'è sicurezza che il tagliente effettivamente tagli. C'è la possibilità che la particella tagliente tocchi il materiale ma non lo penetri, caso in figura 9.2a per cui impone solamente una deformazione elastica. Se invece capita che l'angolo di spoglia superiore è fortemente negativo può succedere che il tagliente sposti solamente il materiale senza effettivamente asportarlo, caso della figura 9.2b. Se siamo fortunati allora il tagliente riesce effettivamente a rimuovere il materiale e tagliare come in figura 9.2c.

Molto lavoro è concentrato in un piccolo spazio, quindi le temperature aumentano di molto. Si rende necessario l'utilizzo di fluidi da taglio in funzione di raffreddamento. Si possono avere pure delle scintille per via della combustione del carbonio.

Come si vede dalla tabella 9.3, si nota l'inefficienza di tale lavorazione. Come conseguenze si possono avere: ossidazioni, possibili trasformazioni di fase, formazioni di cricche, tensioni residue, ecc...

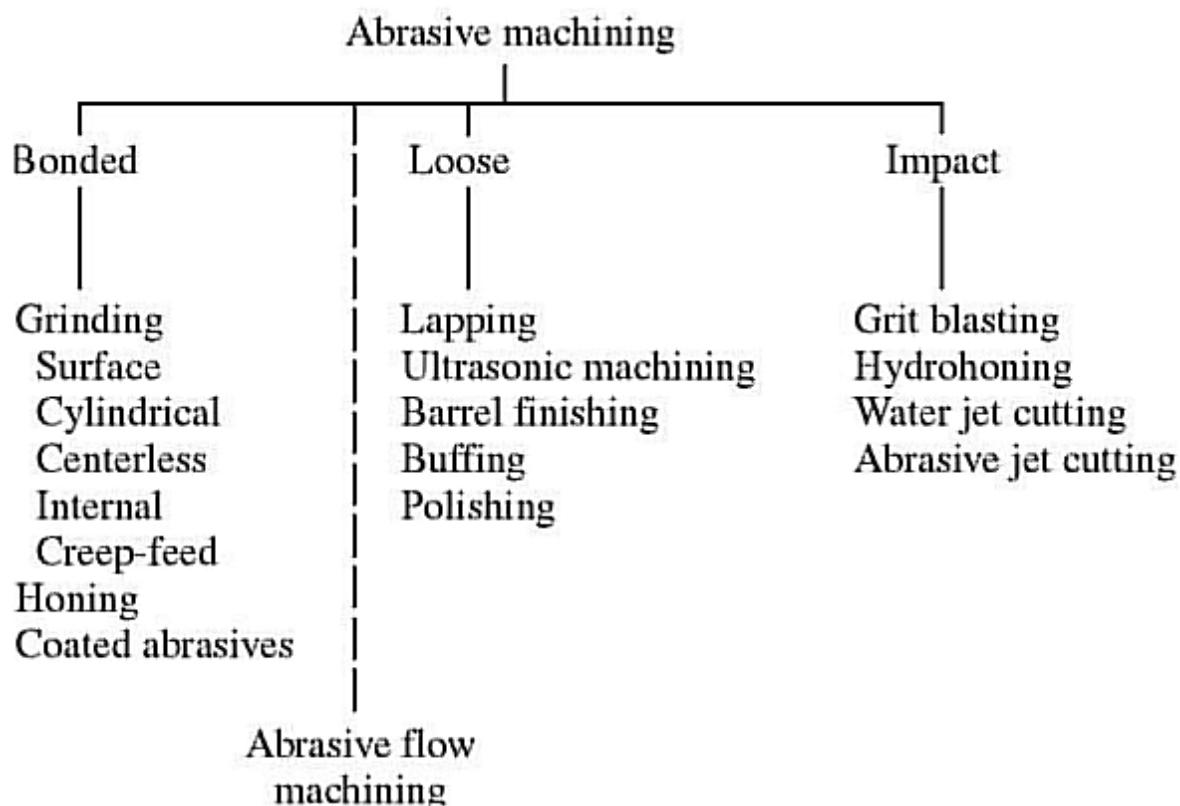
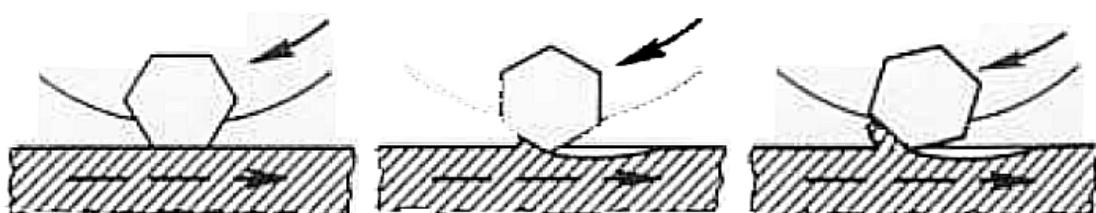
Le particelle devono essere particolarmente dure, soprattutto alle alte temperature. Si richiede che tali taglienti siano fragili, in questo caso è una caratteristica apprezzata. La friabilità è necessaria per via dell'arrotondamento dei taglienti: man mano che si consumano i taglienti non tolgono più materiale. Se però questi si rompono allora vengono in superficie nuovi taglienti. Si vuole una bassa adesione del materiale lavorato per evitare che i taglienti si attacchino al materiale lavorato. Però l'adesione all'utensile deve esser decisamente elevato. Altre caratteristiche delle particelle è che devono essere a stabilità chimica e di forma spigolosa, proprio per garantire la minore usura e maggiore presenza di taglienti.

Alcuni materiali usati per le particelle taglienti sono: allumina in varie gradazioni di durezza. Si sfrutta allumina più tenera per lavorare materiali più duri, quella dura per materiali teneri. Carburo di silicio che non può essere usato per gli acciai per via della presenza del carbonio. Eventualmente vengono sfruttati dei materiali *superabrasivi* come il CBT e C (diamanti), sempre non sugli acciai data la presenza di carbonio.

9.1 Rettifica

La categoria di lavorazioni abrasive più diffusa in industria. Si ha l'utensile che viene realizzato tramite l'adesione delle particelle taglienti a forma di una ruota che in italiano viene detta **mola**.

Sebbene lo scopo della mola sia quello di asportare del materiale, si preferisce che a perdere materiale

**Figura 9.1:** Principali lavorazioni abrasive

(a) Tagliente tangente al lavorato (b) Tagliente in angolo di spoglia negativo (c) Tagliente immerso nel materiale

Figura 9.2: Casistiche in cui si può trovare la particella tagliente

Material	Hardness, HB	Specific W. s/mm ³
1020 steel	110	13
Cast iron	215	11
Titanium alloy	300	13
Superalloy	340	14
Tool steel (T15)	67 HRC	15
Aluminum	150 (500 kg)	6

Figura 9.3: Tabella delle energie specifiche di lavorazione per diversi materiali

siano entrambi gli attori, sia materiale lavorato che mola. Da qui si può realizzare il rapporto di rettifica:

$$G = \frac{\text{Materiale rimosso dalla mola}}{\text{materiale asportato dal pezzo}} \quad (9.1)$$

Le mole devono essere equilibrate per diversi motivi: le vibrazioni peggiorano le finiture superficiali, essendo in rotazione tali vibrazioni potrebbero essere amplificate ed arrivare al punto da spezzare pezzi di mola.

Nelle lavorazioni di materiali di materiali più duri si preferisce che il legante sia meno forte.

I rapporti di rettifica arrivano alla decina per acciai per utensili, sulle centinaia per acciai temprati, alle migliaia per con CBN e diamante.

Le mole hanno un certo grado di porosità, ciò permette di raccogliere le polveri generate. Eventualmente può fungere da canale per apportare fluido da rettifica.

Il legante più usato è il vetro, ciò dipende da che tipo di mola si sta utilizzando e per quale tipo di lavorazione di deve eseguire. Altri leganti possono essere delle sostanze organiche che risultano meno forti del vetro. Il vetro non si usa per i *superabrasivi*, in quel caso viene utilizzato il bronzo sinterizzato. Altri leganti possono essere materiali termoindurenti che però vengono spesso rinforzati da fibre di vetro, acciai ecc...

Per aumentare la velocità di rotazione, senza che la forza centrifuga sia eccessivamente alta, si utilizzano delle mole con parte centrale molto leggera che può essere in metallo o composito. Tenendo lo strato abrasivo superficiale di circa 3 ÷ 5mm.

La realizzazione delle mole non è così semplice, non è remota la possibilità che si stacchino dei pezzi di mola. Per cui devono sempre essere utilizzate con dei sistemi di protezione. Esiste una normativa che definisce nel dettaglio come deve essere realizzata una mola. Le mole vengono descritte tramite opportune scritte, normate, che ne definiscono diversi parametri che sono stati testati dal costruttore. In figura 9.4 si vedono i parametri.

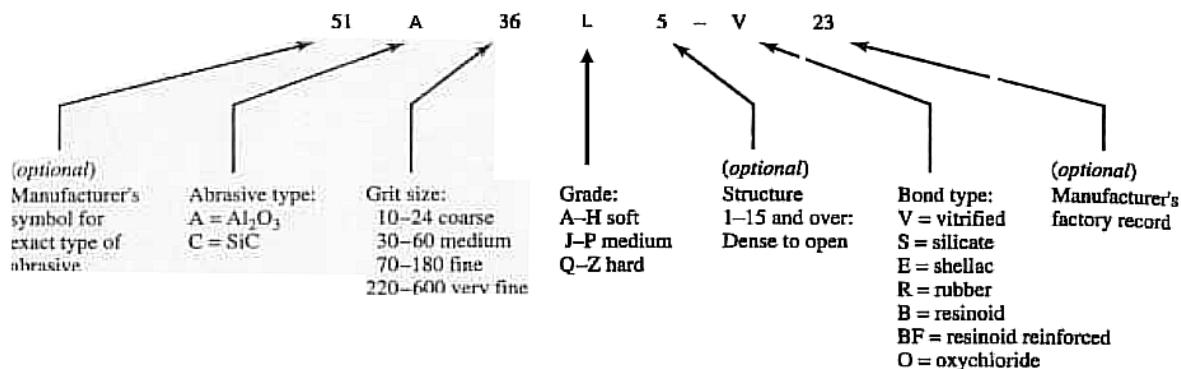


Figura 9.4: Descrizione della sigla per le mole

Le particelle abrasive spesso non tolgono materiale. La velocità di rimozione può essere modificata da altri aspetti tipo la forza di schiacciamento: più si preme il materiale contro la mola più materiale si asporta. Questo però modifica anche il rapporto di rettifica: in particolare lo cala drasticamente.

Sia la scelta della durezza delle particelle, che la scelta del legante deve essere calibrata in modo da favorire la generazione di nuovi taglienti. Spesso è necessario ravvivare la mola: asportando da essa lo strato più superficiale in modo da portare alla luce nuovi taglienti più affilati. L'operazione non è gradita: si sta lavorando non sul materiale per cui si perde tempo. In più, si abbassa lo spessore della mola. Può essere necessaria l'operazione anche nel caso in cui il materiale lavorato diventi particolarmente pastoso alle alte temperature, per cui il materiale aderisce alla superficie della mola e si salda sopra di essa.

La ravvivatura si realizza tramite la pressione di un utensile piuttosto semplice.

9.1.1 Fluidi da rettifica

Vengono principalmente per raffreddare il lavorato per i problemi che sono stati evidenziati in precedenza, tra cui combustione, cricche a caldo ecc... Si ritrova l'utilizzo della lubrificazione per avere meno carico sulla mola. Non si ha la necessità di asportare il truciolo perché viene generata una polvere molto fine di materiale asportato che si infiltrerà nella porosità della mola.

Si cerca di limitare l'utilizzo di tali fluidi perché creano poltiglia tra fluido da rettifica e polvere del materiale asportato. Grazie ai fluidi si abbassa di molto l'energia specifica per la rettifica la quale spesso viene trasformata, durante la lavorazione, in energia termica che può essere problematica visto l'ammontare di scambio termico.

Altro aspetto per cui si limita l'utilizzo dei fluidi da taglio è legato al loro smaltimento. Essendo fluidi particolari non è semplice smaltirli una volta consumati.

9.1.2 Lavorazioni di rettifica

Missing figures

9.1 (3) Aggiungere le figure delle lavorazioni di rettifica

La lavorazione al lapitello, consiste in una macchina con un portapezzo magnetico in cui la mola ha una traslazione invece di una rotazione

Anche nella rettifica esistono delle mole di forma, in cui la mola ha una forma specifica in funzione della forma da ottenere. Ovviamente il tutto dipende allo specifico prodotto da lavorare.

9.1.2.1 Obiettivi della rettifica

Rettifica di precisione : migliora le tolleranze e finitura superficiale

Rettifica di sgrossatura : I grani usurati vengono espulsi, la velocità è più alta e l'energia specifica più bassa. Indubbiamente si sta aumentando lo spessore di truciolo indeformato. Si usa per eliminare alimentazione e materozze dai getti e la bava dai forgiati.

9.1 (4) Aggiungere i dettagli

Creep-feed Con una sola passata, grande spessore di truciolo indeformato, piccolo avanzamento per giro. Aumentando lo spessore indeformato dunque si abbassa l'energia specifica impiegata per la lavorazione.

High-efficiency deep grinding Si usano delle mole di forma con un po' strato di CBN per asportare materiale ad alta velocità. Ci si avvicina maggiormente all'asportazione di truciolo vera e propria per via delle particelle rimosse di più grandi dimensioni.

Una buona finitura non garantisce qualità superficiale elevata. La qualità della superficie aumenta con mole tenere, frequenti ravvivature e abbondante lubrificazione.

Esempio

Si vuole migliorare il livello di finitura di un blocco di acciaio in superficie piana tramite mola a tazza con diametro di $d_m = 150\text{mm}$. Si userà l'avanzamento di traslazione.

Il materiale in lavorazione H13 con durezza 55HRC con area $A = 50 \times 100\text{mm}^2$. Con velocità $V = 1500\text{m/min}$, $f_v = 0.05\text{mm}$, $f_l = 30\text{m/min}$

9.1 (5) Aggiungere dati

Soluzione

$$\begin{aligned} \text{Corsa totale} &= 100 + 150 = 250\text{mm} \\ \text{la velocità superficiale} &: D = \pi \end{aligned}$$

9.1.2.2 Nastri e carte vetrate

particelle abrasive attaccate a carta o stoffa, sono utilizzate per operazioni di finitura a bassa velocità. Usando colle e supporti più forti è possibile aumentare la velocità, arrivando fino a sostituire l'asportazione di truciolo più comune. In particolare per i nastri non è raro il fatto di trovare dei macchinari che presentano delle ruote non continue, ovvero delle ruote a settori. Ciò fa sì che il nastro non sia sempre in lavorazione, permettendo di abbassare la temperatura. Il prezzo da pagare è il maggiore tempo ciclo.

9.1 (6) Completare l'esercizio

I grani vengono depositati su uno strato di adesivo applicato al supporto e vengono tenuti in posizione da uno secondo strato. I bordi affilati dei grani e di forma allungata possono essere allineati per ottenere un angolo di spoglia leggermente negativo. Contribuendo ad aumentare l'efficienza di queste lavorazioni.

anche in questo caso si possono sfruttare i fluidi da taglio per abbassare la temperatura di lavorazione.

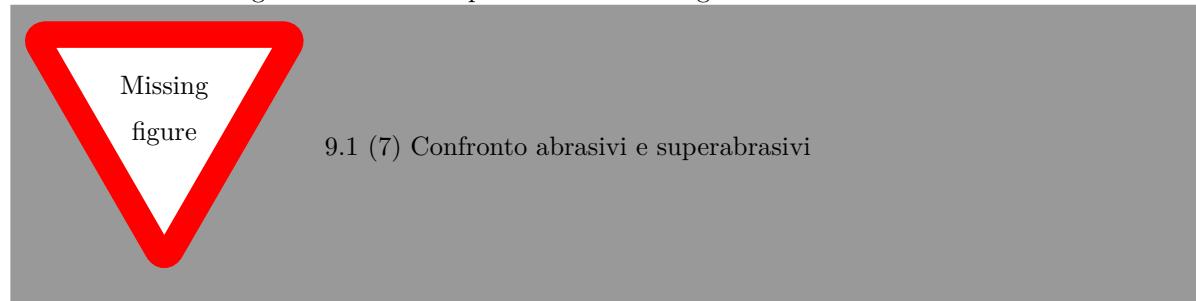
Un'ulteriore tipologia di utensile sono i fili. Vengono incollate sul filo le particelle taglienti che messo in movimento permette l'asportazione di materiale. Ciò taglia il materiale.

9.1.2.3 Levigatura

Si presenta un utensile con dei settori abrasivi. I quali hanno anche un ulteriore movimento in senso radiale. L'operazione viene utilizzato per migliorare ulteriormente la finitura di fori in particolare.

L'utensile deve essere messo in pressione affinché i taglienti aderiscano alla superficie del foro da lavorare.

Il livello di finitura è superiore alle precedenti perché si tratta di un'operazione di superabrasione. Risulta costosa e lunga. le differenze si possono vedere in figura.



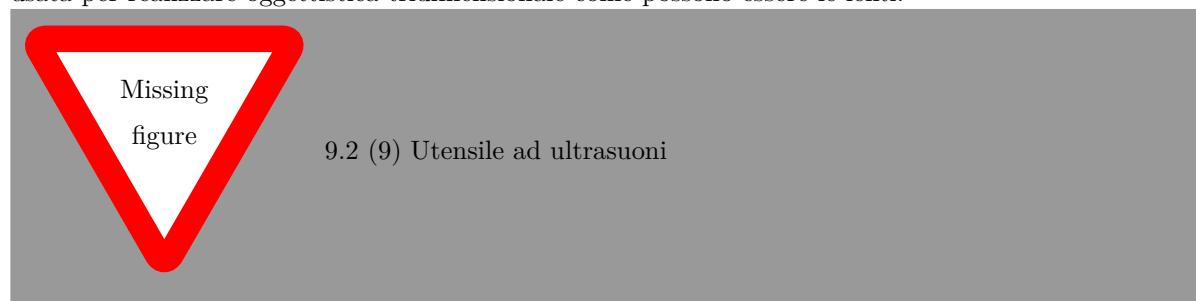
9.2 Abrasione non legata

9.2.1 Lappatura

Tramite una soluzione oleosa abrasiva posta tra il pezzo da lavorare e una superficie che è il negativo del pezzo da ottenere.



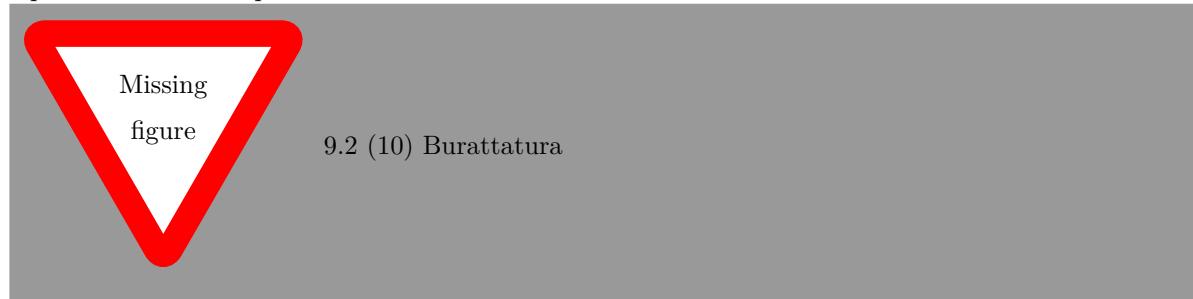
Tramite movimento planetario, rotazione del supporto più la rotazione dei singoli contenitori applicanti una certa pressione al pezzo in lavorazione, si ottiene il livello di finitura desiderato. Viene spesso usata per realizzare oggettistica tridimensionale come possono essere le lenti.



Lavorazione particolarmente adatta per amateriali fragili.

9.2.2 Burattatura

Si tratta di un'operazione che viene eseguita sia a secco che a liquido. Vengono messi in un contenitore vibrante contenente: dei buratti e i pezzi da sbavare. la vibrazione mette in movimento relativo i buratti e pezzi che verranno puliti da trucioli residui e altre sbavature.

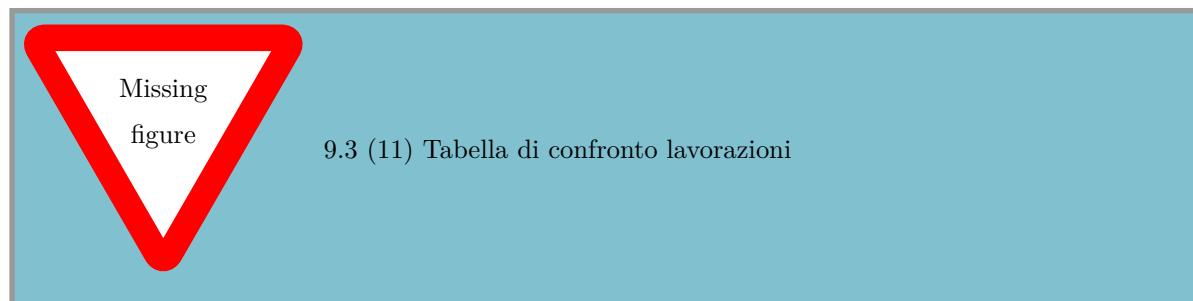


Si tratta di una lavorazione molto apprezzata per la capacità di pulire dei pezzi. Ciò è dato dal fatto che i buratti possono avere forme e dimensioni variegate in base alla geometria del pezzo da pulire.

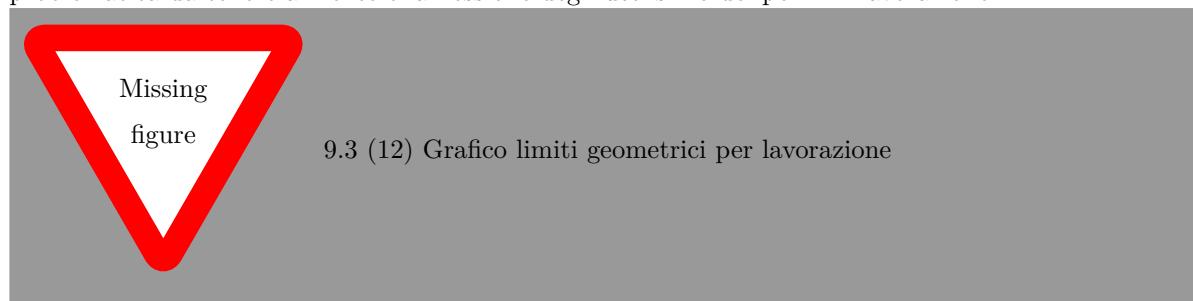
9.2.3 Sabbiatura

Si tratta di un'operazione che viene spesso usata per rimuovere film superficiali o per sbavare come già visto. Vengono scagliate delle particelle abrasive sul pezzo da ripulire

9.3 Considerazioni finali



L'asportazione di truciolo si apprezza per tutti i materiali mentre quelle di tipo abrasivo solo per materiali duri. Mentre l'asportazione di truciolo permette la realizzazione di praticamente tutte le forme possibili, a parte quelle in cui l'apertura di ingresso sia più piccola dell'utensile. Mentre le abrasive non vedono tutti questo campo. In termini di dimensioni l'asportazione di truciolo non ha limiti. L'unica problematica da tenere a mente è la flessione degli utensili o dei pezzi in lavorazione.



9.3.1 Aspetti progettuali

Punti da tenere presente durante la progettazione:

- Scegliere un materiale ad alta lavorabilità;
- Siccome le lavorazioni possono indurre alterazioni e produrre stati di tensione residua.
- Bisognerebbe usare il minor numero di fissaggi possibili.
- I raggi dovrebbero essere compatibili con l'utensile più piccolo a disposizione
- I sottosquadri possono essere lavorati se non troppo profondi.
- Le deflessioni degli utensili limitano il rapporto profondità/diametro.
- Caratteristiche di forma angolate rispetto alla normale direzione di funzionamento della macchina dovrebbero essere evitate.
- Fori ciechi su facce opposte andrebbero evitati.
- Caratteristiche di forma angolate rispetto alla superficie deflettono l'utensile e richiedono un'operazione separata.
- Tapanatura, fresatura ed altre operazioni producono bave.
- La sbavatura è molto costosa.

9.3 (13)
Completare
elenco

Parte IV

Lavorazioni non convenzionali

CAPITOLO 10

Lavorazioni non convenzionali

Sono caratterizzate dal fatto che non usano l'energia meccanica per modellare il materiale. Dato questo, la durezza del materiale non costituisce un limite a tale problema. Per cui ci sono diverse possibilità anche per materiali non normalmente lavorabili. Alla figura 10.1 sono riportate le principali lavorazioni secondo una classificazione in base all'agente tramite il quale si lavora.

Attacco chimico Si vuole rimuovere del materiale tramite azione chimica. Allora il problema non è più come togliere il materiale, piuttosto controllarla.

Elettroerosione Si sfrutta il movimento degli atomi per separarli dal lavorato.

Scarica elettrica Si sfrutta un arco elettrico per separare il materiale. Se ne era già parlato per la generazione delle polveri per la sinterizzazione

lavorazioni ad alto contenuto energetico Si parla di trasmettere elettroni ad alta energia per la separazione del materiale.

Altre tipologie in cui si includono il taglio ad acqua (anche se potrebbe rientrare tra le tecniche abrasive), lavorazioni ad ultrasuoni ecc...

Di solito sono lavorazioni realizzati nelle fasi finali della produzione.

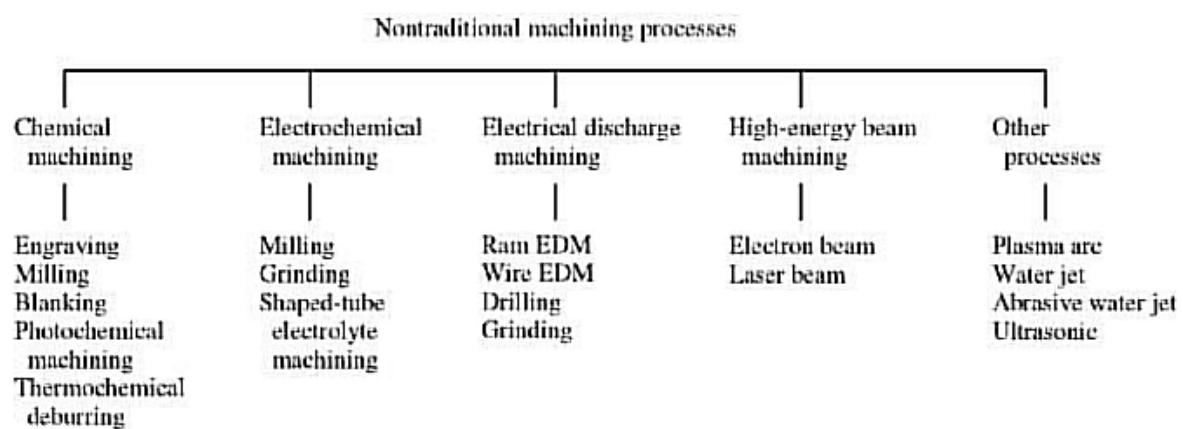


Figura 10.1: Classificazione lavorazioni non convenzionali

10.1 Lavorazioni chimiche

Si provoca una corrosione controllata sul materiale da lavorare. Si proteggono le superfici che non si vuole corrodere detta *maschera*, mentre le parti che devono essere rimosse vengono esposte all'ambiente corrosivo. Perciò il metallo viene convertito in un composto solubile che rimarrà nell'attaccante corrosivo.

Alla figura 10.2 ne sono presentate alcune.

Data la natura della lavorazione, si nota che si può avere della corrosione anche al di sotto della maschera. Per cui si formano dei sottosquadri. Tra l'altro, gli stessi, risulteranno non rettilinei ma curvilinei per il fatto che quella superficie rimane esposta per più tempo all'agente corrosivo, a differenza del piano che si vorrebbe lavorare. Si tratta di un'operazione che può essere ripetuta più volte. Il risultato è una superficie piana. Il livello di rugosità può essere piuttosto modesto come illustrato in figura 10.3, in virtù del fatto che il materiale può essere polifasico, con diversa velocità di corrosione delle fasi presenti nel materiale.

Parlando delle maschere: ne esistono di diverse forme e materiali. In genere si crea un film di materiale resistente alla corrosione che semplicemente viene tagliato per esporre il materiale da corrodere. La massima accuratezza può essere ottenuta con i film sensibili alla luce usati nella tecnologia dei semiconduttori.

Un esempio di applicazione sta nei pannelli rinforzati dove viene esposta la maggior parte del materiale coprendo una struttura rinforzante. Ne risulta un materiale particolarmente resistente senza dover saldare un'armatura. Si tratta di applicazioni in cui si ha alto valore aggiunto visto che spesso si spreca molto materiale.

Queste lavorazioni vengono favorite, accelerandole, tramite il controllo della temperatura. Questo aspetto può essere sfruttato anche per operazioni di sbavatura. Non si creano problemi al restante materiale a patto che la bava sia molto più fine del materiale totale. In modo tale che si scaldi più facilmente di tutto il materiale e risulti più facile attaccarla.

Traciatura chimica La traciatura chimica viene usata per tagliare lamiere sottili. Quando la maschera viene ottenuta tramite tecniche fotochimiche, il processo viene chiamato lavorazione fotochimica.

10.2 Lavorazioni elettrochimiche

Vengono sottratti degli atomi (ioni) dal materiale da lavorare considerabile come anodo. Il tutto viene messa in bagno elettrochimico. Viene poi messo un catodo che funge da utensile per captare tali ioni separati dall'anodo. Entrambi i materiali devono essere conduttori altrimenti tutto ciò non ha senso. Su alcuni metalli può costituirsì uno strato di ossido, ma può essere facilmente rimosso tramite scintille. Il funzionamento è illustrato alla figura 10.4.

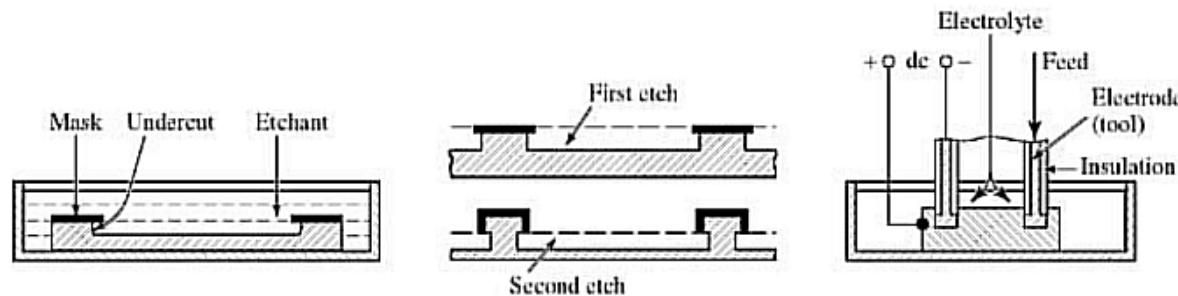


Figura 10.2: Modalità di attacco chimico

	Chemical Machining	Electrochemical Machining	Ram-EDM	Wire-EDM
Metal removal rate	0.012–0.07 mm/min	1.5 cm ³ /1000 A·min	0.15–400 cm ³ /h	200 cm ³ /h steel 450 cm ³ /h Al
Surface finish, $\mu\text{m } R_a$	2 on Al 1.5 on steel 0.6 on Ti	0.1–1.4	0.2 at 0.15 cm ³ /h 5 at 8 cm ³ /h 10 at 50 cm/h	0.1 skim cut 1–2 roughing cut
Electric current				
Volts		4–24	< 300	45–60
Amperes		50–40 000	0.1–500	1–32
Frequency	DC		0.5 MHz–200 Hz	180–300 000

Figura 10.3: Risultati ottenibili con le lavorazioni chimiche

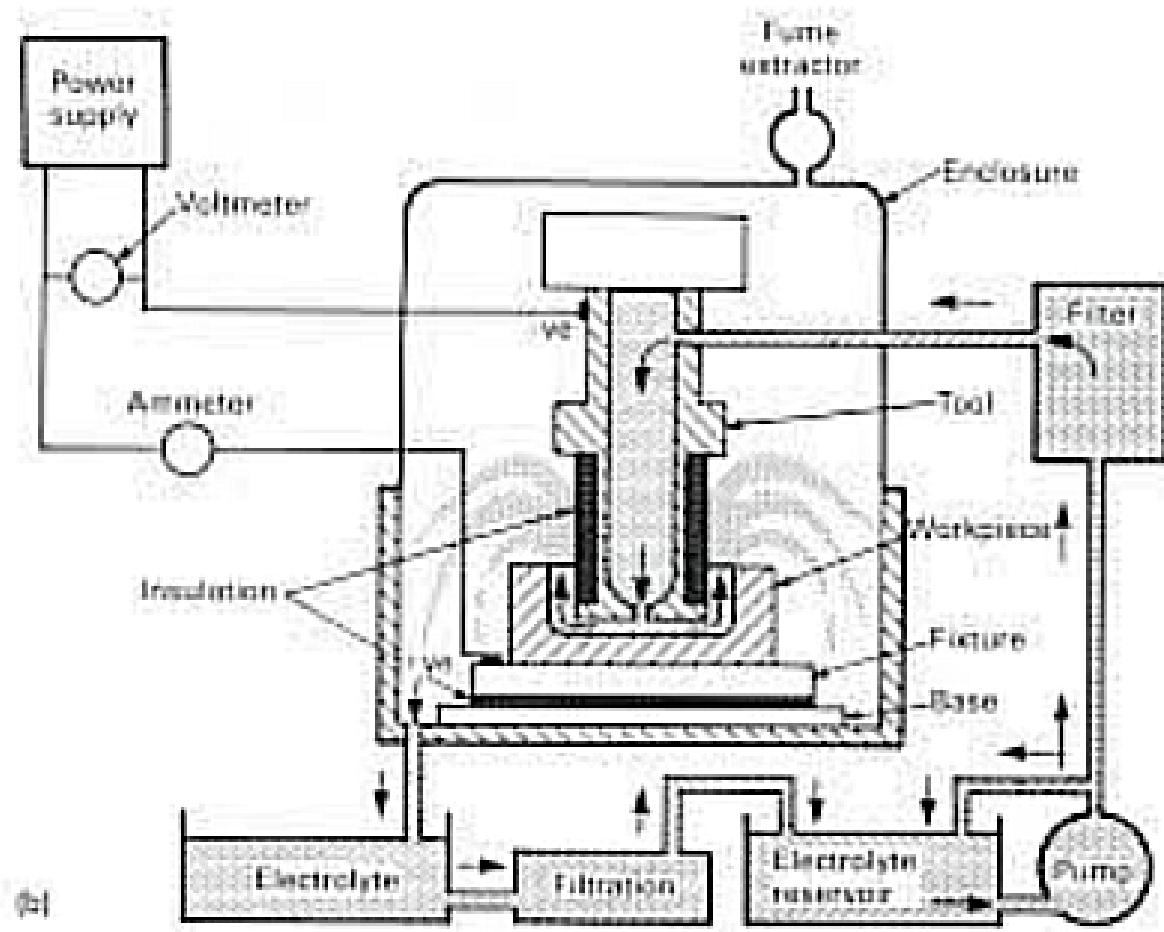


Figura 10.4: Schema generale delle lavorazioni elettrochimiche

10.2.1 Elettroerosione

Si tratta di una lavorazione molto importante perché permette di finire gli stampi. Anche se ultimamente sta perdendo dispiego. Alle figure 10.5 sono rappresentate le principali modalità con cui si lavora con tale tecnica. Rispetto alla precedente, in cui il liquido è conduttore per chiudere il circuito elettrico. In queste lavorazioni il liquido è un isolante: impedisce la chiusura del circuito elettrico.

I due elementi sono ad una certa distanza col liquido che fa da isolante. Si avvicina l'elettrodo fino a che l'isolante non riesce a tenere la rigidità elettrica e fa passare una scintilla tra i due elementi. Sarà la scintilla stessa che permette l'asportazione del materiale. La lavorazione consiste nei successivi avvicinamenti e allontanamenti dell'utensile e lavorato. La scintilla vaporizza il materiale asportato, che risolidificherà nel liquido, il quale ha il compito di spostare il più velocemente possibile il solidificato. Altrimenti fungerebbe da conduttore.

Molto importante è l'elettronica di controllo per la corretta esecuzione di tale lavorazione. Infatti queste lavorazioni, che sono molto lente, sono completamente automatizzate: sia per la natura pericolosa della lavorazione che per il corretto funzionamento. Ciò non occupa un operatore per tutta l'operazione.

Il dielettrico: isola, raffredda e sposta i residui. Risulta essenziale che sia in continuo movimento affinché lavori correttamente. Oltre tutto deve essere continuamente filtrato per evitare che le particelle asportate rimangano in circolo.

In termini di finitura, la densità di corrente ha un ruolo importante: da un lato si vorrebbe una densità di corrente elevata per asportare più materiale possibile e accelerare la lavorazione; però ne risente la finitura superficiale che ne risulta peggiore all'aumentare della stessa densità di corrente. Poiché elettrodo e pezzo non vanno a contatto si ha un overcut. Ovvero non c'è la necessità che l'utensile abbia la stessa forma in negativo del pezzo da lavorare. L'elettrodo va comunque dimensionato correttamente proprio per evitare che tale overcut sia problematico. Inoltre l'overcut si riduce al diminuire della densità di corrente. Infatti, in passato si utilizzavano elettrodi consumati per effettuare sgrossature più importanti e poi elettrodi nuovi per migliorare la finitura. Ad oggi si preferisce effettuare una fresatura come operazione di sgrossatura, mentre si lascia la finitura all'elettroerosione. In alcune aziende viene addirittura soppiantata da eventuale fresatura con utensili ad inserti CBN. Tale per via dello sviluppo dei materiali superduri come CBN e diamante ove utilizzabile.

Gli elettrodi possono essere consumarsi, in genere sono fatti in rame o grafite, con un rapporto di erosione che va dai 3 : 1 del rame fino a 100 : 1 della grafite.

10.2.2 Elettroerosione a tuffo

L'elettrodo ha un movimento alternato tra avvicinamento e allontanamento. Ha la forma che si vuole ottenere in negativo. Uno schema generico di funzionamento è riportato alla figura 10.5a.

I dielettrici più usati sono

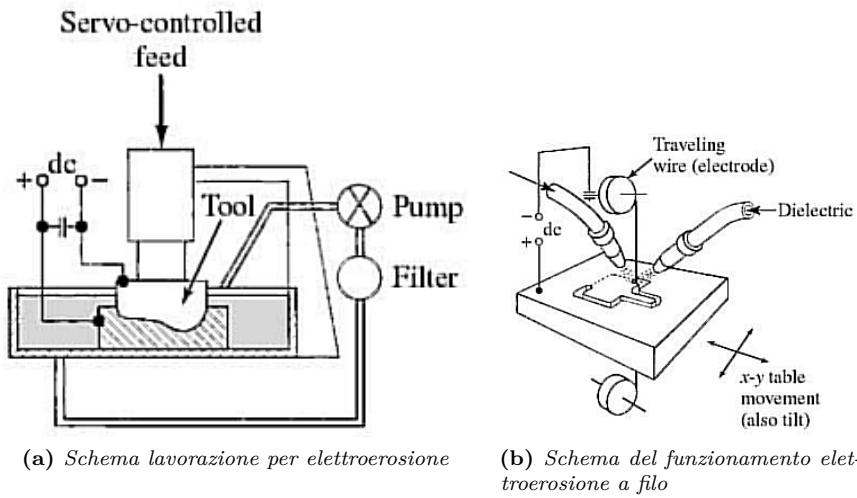
- olio dielettrico
- Eventualmente acqua

In qualche caso, l'elettrodo ha movimento laterale ma è una casistica molto rara. In più, grazie all'avvento delle macchine CNC è possibile realizzare forme parecchio complesse con degli elettrodi piuttosto semplici.

10.2.3 Elettroerosione a filo

Si parte da un blocco di materiale e tramite l'elettroerosione a filo , 10.5b, si va a scontornare il materiale. Si realizzano dei fori di forma qualsiasi a pareti ortogonali rispetto al piatto. Il risultato è simile ad una lappatura o tranciatura.

Viene sfruttata questa operazione per realizzare il sistema punzone-matrice per le operazioni di tranciatura.

**Figura 10.5:** Possibilità dell'elettroerosione

In questo caso il dielettrico non è in bagno ma viene spruzzato direttamente sul filo, o sul luogo in cui il filo sta tagliando. Di fatto il sistema diventa analogo alla sega a nastro. In generale è il portapezzo che si muove con traslazioni planari. Può essere che le spolette abbiano un loro movimento, in quel caso si possono realizzare delle superfici inclinate.

Anche per questa lavorazione c'è il problema dell'overcut.

L'elettroerosione può essere sfruttata anche in altre situazioni: ad esempio la si può sfruttare per realizzare dei fori a qualsiasi profondità di piccola sezione trasversale. Basta realizzare degli elettrodi dedicati.

10.3 Lavorazioni con fasci alto contenuto energetico

I materiali possono essere lavorati o forati mediante fusioni o vaporizzazioni controllate. Per via della natura della lavorazione può essere utilizzata su materiali che sono difficilmente lavorabili come: alcune plastiche, ceramici e compositi.

10.3.1 A fascio elettronico

Si tratta di una lavorazione effettuata tramite fascio elettronico. Di solito si tratta di tagli o forature tramite queste lavorazioni. Per generare il fascio elettronico avviene su tubi catodici come quello illustrato alla figura 10.6. In genere il tubo catodico è a vuoto spinto per garantire migliore precisione del fascio di elettroni. Si susseguono una serie di avvolgimenti elettrici che permettono di concentrare e direzionare il fascio elettronico. Gli elettroni escono dalla camera, vanno ad urtare il materiale lavorato. L'energia cinetica degli elettroni viene trasformata in energia termica che va a fondere e addirittura a vaporizzare il materiale del lavoro.

Maggiore è il livello di depressione dove il pezzo viene lavorato, maggiore energia viene trasportata sul pezzo. Altrimenti, le molecole presenti a pressione atmosferica deviano gli elettroni del fascio deviandoli dal punto di lavorazione.

Dunque è altrettanto importante la sessione di pompaggio a vuoto del tubo catodico o pistola elettronica. Ciò richiede del tempo, per cui a inizio lavorazione si decide quanto vuoto realizzare dentro la pistola. Più vuoto implica maggiore energia trasmessa ma maggior tempo ciclo.

Queste lavorazioni vengono spesso utilizzate per realizzare delle filiere per materiali polimerici.

10.3.2 Taglio Laser

Il funzionamento non è troppo diverso dalla lavorazione precedente, però si sfruttano emissioni di luce laser per tagliare il materiale come si vede alle figure 10.7. Il vantaggio è che non c'è la necessità di concentrare elettroni ma fotoni. Ciò non viene influenzato dalla presenza di altre particelle presenti in atmosfera.

In più il laser è estremamente preciso in quanto il cono in cui vengono sparati i fotoni è molto piccolo. In più essendo che la luce laser è concorde e monocromatica, rende il controllo di tale tecnologia più efficace. Le sostanze che vengono utilizzate per produrre luce laser sono ben definite e conosciute. Inoltre, essendo che è possibile orientare il fascio di raggi laser, è possibile lavorare anche in punti nascoste. Un esempio è riportato alla figura 10.7b.

Come primo materiale si è sfruttato il rubino, che viene utilizzato per sistemi di puntamento. Infatti l'energia concentrabile tramite rubino non è eccessivamente elevata, ma si può estendere per lunghezze considerevoli.

la dimensione del punto che si va a realizzare dipende da:

- Lunghezza d'onda: più è alta più si riesce a controllare lo spot.
- L'ottica: migliore è l'ottica e più energia si riesce a concentrare energia.

Industrialmente parlando, viene utilizzata l'anidride carbonica come materiale emettitore. La luce emessa è nell'intervallo degli infrarossi lontani: alta lunghezza d'onda e bassa frequenza. Perciò la concentrazione non è molto alta, però si raggiungono potenze nell'ordine dei 40kW con efficienza del

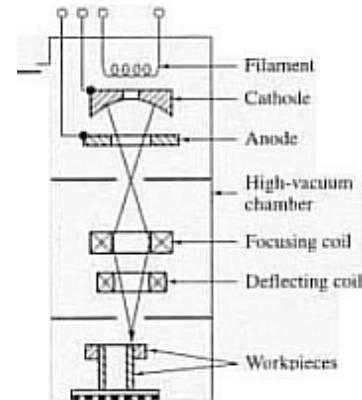


Figura 10.6: Schema funzionamento tubo catodico

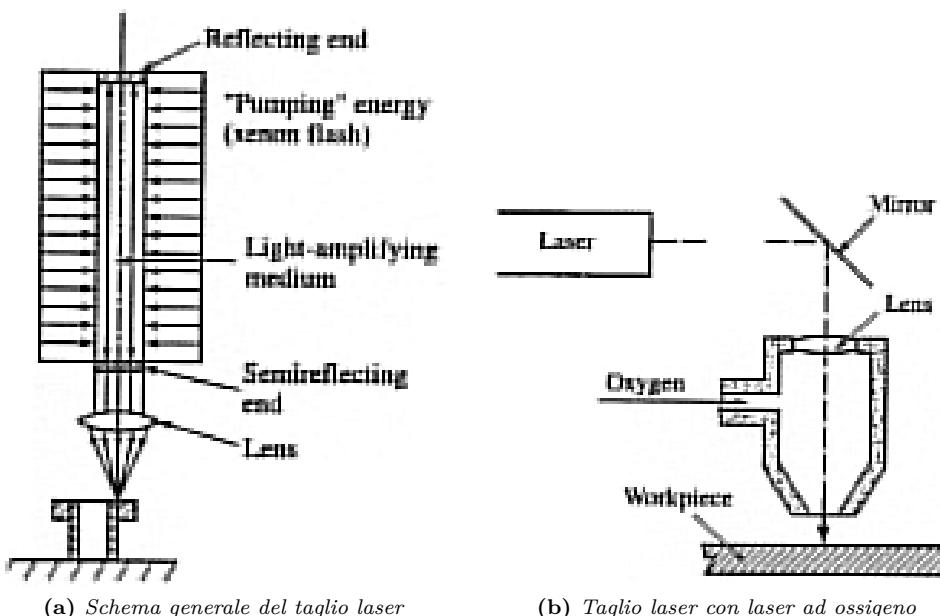


Figura 10.7: Esempi di taglio laser

15% che sembra poco ma nel campo dei laser è considerevole. Si può direzionare il fascio attraverso degli specchi che riescono a riflettere la specifica lunghezza d'onda. Non si tratta di specchi convenzionali.

Altro materiale emettitore è il Nd:YAG, produce degli infrarossi vicini: si hanno migliori concentrazioni di energia ma con valori di potenza di molto inferiori rispetto al precedente. Dunque non si raggiungono gli stessi valori di temperatura raggiunte con la CO₂. Di certo, essendo più concentrata l'energia si può trasmettere a distanze maggiori. In più con opportune ottiche si può suddividere in più fasci.

Altra casistica è quello del **laser a eccimeri**. Si ha una lunghezza d'onda molto piccola ed alta frequenza, arrivando allo spettro degli ultravioletti. Ciò permette di avere una grandissima precisione, infatti vengono impiegati per la realizzazione di pezzi in minuteria, in chirurgia. Si possono utilizzare in modalità continua o pulsata.

In generale per le lavorazioni a taglio laser non ha controllo della profondità di lavorazione. Allora si utilizzano per realizzare dei fori passanti. Spesso viene fornito ossigeno per aumentare l'assorbimento di energia. Ciò peggiora la finitura superficiale. Viste le temperature raggiunte si possono lavorare dei materiali altofondenti. Non c'è il problema di mettere sottovuoto il pezzo.

la lunghezza d'onda influisce sul diametro minimo del più piccolo foro realizzabile: 0.5mm per la CO₂, fino ad arrivare al 1µm per il laser ad eccimeri.

10.3.3 Taglio al plasma

Cos'è il plasma?

Si tratta di un gas ionizzato, viene definito così perché le proprietà fisiche del plasma sono considerevolmente differenti dallo stato di gas per via delle ionizzazioni delle particelle. Viene usato in industria per tagliare lamiere ed effettuare saldature ad alta velocità per via delle più alte temperature raggiunte. Il taglio al plasma ha una finitura peggiore di quelle ottenibili tramite laser. Un esempio di taglio al plasma è questo [10.8a](#).

10.3.4 Taglio al cannello ossiacetilenico

Si sfrutta una fiamma ossiacetilenica per scaldare il materiale per tagliare lamiere. Anche in questo caso si hanno delle finiture peggiori delle precedenti. Infatti si preferisce usarlo per effettuare delle saldature come si vede in figura [10.8b](#).

10.4 Taglio ad acqua

Si usa l'energia meccanica generata da un getto d'acqua contenente delle particelle abrasive come in figura [10.8c](#). Non è una vera e propria lavorazione non convenzionale per via del fatto che in questo caso si sta sfruttando l'energia cinetica dell'acqua o particelle abrasive per rimuovere il materiale.



(a) Effettivo taglio al plasma su macchina CNC (b) Taglio/Saldatura ossiacetilenica (c) Lavorazione per taglio ad acqua

Figura 10.8: Altre lavorazioni non convenzionali

A differenza delle precedenti non provoca il riscaldamento del materiale. Si può usare anche per materiali particolarmente fragili come vetro e marmo. Non è una lavorazione molto efficiente per via della molta energia da imprimere all'acqua. Inoltre è particolarmente rumorosa.

Parte V

Tecniche di giunzione

CAPITOLO 11

Tecniche di giunzione

Prevede di unire più componenti meccanici ne caso in cui non sia possibili ottenere un prodotto finito solo tramite le lavorazioni convenzionali e non convenzionali. Le principali tecniche sono:

Fissaggio meccanico : si tratta di fissaggi non removibili, quindi niente bulloneria piuttosto rivettature.

Saldatura a freddo Creazione di un legame metallurgico mediante adesione e diffusione. Viene anche detta saldatura a freddo.

Saldatura a caldo Unione tramite fusione con l'uso di varie fonti di calore. Detta saldatura a caldo

Brasatura legami con l'aggiunta di metalli bassofondenti.

La giunzione viene utilizzata perché non siamo in grado di realizzare un prodotto complessivo in un unico colpo ma in successivi assemblaggi. In genere si parla di giunzioni su metalli, non sono da escludere tecniche su ceramici e polimerici.

11.1 Classificazione delle tecniche

Le principali tecniche di fissaggio sono quelle della figura 11.1a.

Le tecniche di giunzione sono tra le tecniche che maggiormente si tende ad automatizzare. In genere perché:

1. Il personale deve essere altamente formato.
2. In particolare per le saldature a caldo possono generarsi dei fumi nocivi o comunque ambienti pericolosi.

arc welding Si sfrutta un arco elettrico per portare il materiale apportato a fusione.

Resistance Welding la modalità non è diversa dalla precedente ma si sfrutta la legge di Ohm per scaldare il materiale.

Brasatura Si apporta del materiale bassofondente per legare i componenti.

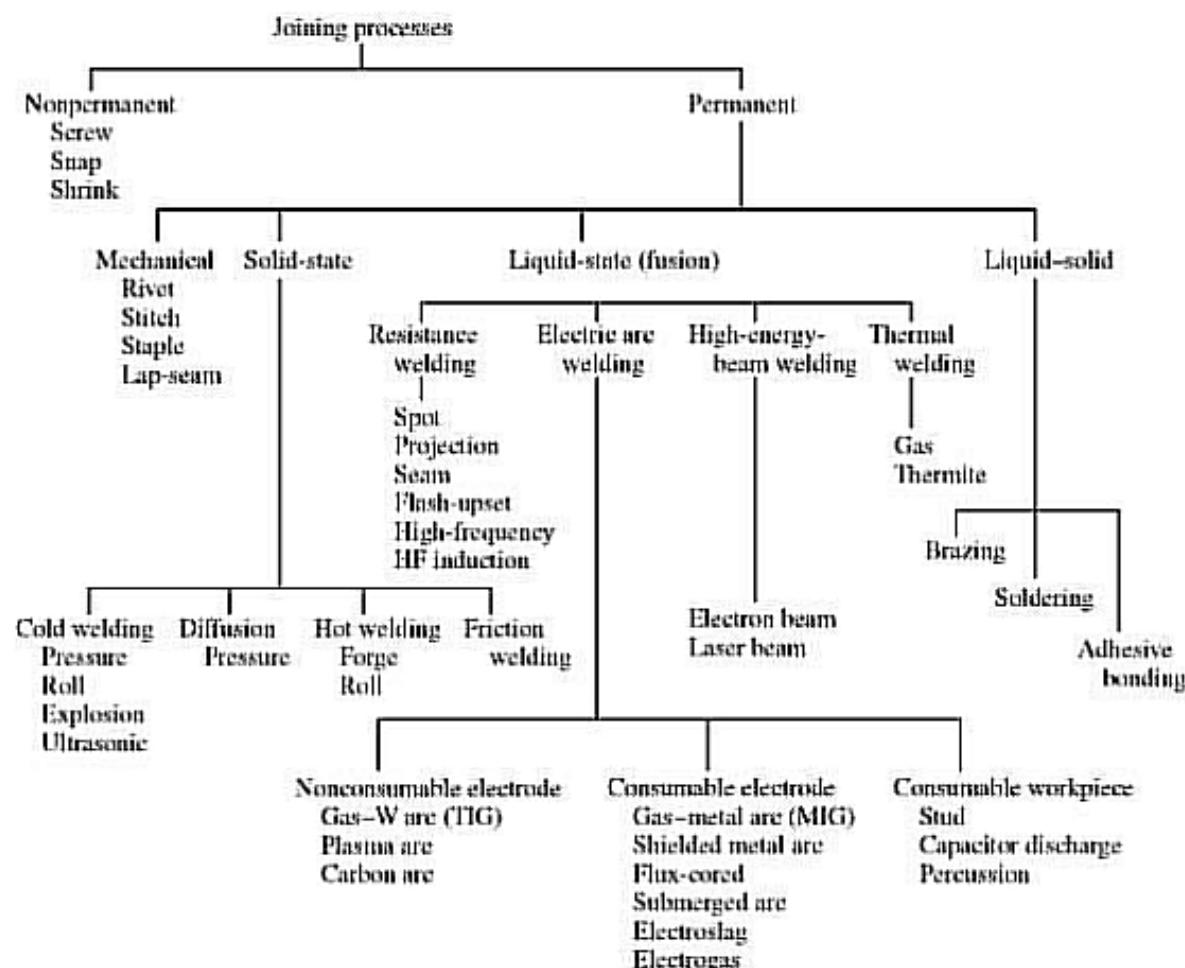
Bullonatura Si sfruttano dei componenti meccanici per mantenere uniti più pezzi.

Ritevettatura Come prima ma non removibile

Grafettatura Si usano delle graffette per mantenere uniti più componenti.

Aggraffatura Specifico per lamiere, prevede di utilizzare delle specifiche forme per unire le lamiere, se ne era già parlato quando si è parlato nella piegatura delle lamiere al capitolo 1 a pagina 2.

Incollaggio Si utilizza un collante per tenere uniti più pezzi.



METHOD	Strength	Design Variability	Small Parts	Large Parts	Tolerances	Reliability	Ease of Maintenance	Visual Inspection	Cost
Arc welding	1	2	3	1	3	1	2	2	2
Resistance welding	1	2	1	1	3	3	3	3	1
Brazing	1	1	1	1	3	1	3	2	3
Bolts and nuts	1	2	3	1	2	1	1	1	3
Riveting	1	2	3	1	1	1	3	1	2
Fasteners	2	3	3	1	2	2	2	1	3
Seaming, crimping	2	2	1	3	3	1	3	1	1
Adhesive bonding	3	1	1	2	3	2	3	3	2

Note: 1, very good; 2, good; 3, poor.

(b) Confronto tra le tecniche di fissaggio

Figura 11.1: Fissaggi

11.2 Giunzioni meccaniche

11.2.1 Rivettatura

Si tratta di una giunzione realizzata tramite una specie di chiodo che poi viene opportunamente lavorato per permettergli di mantenere giuntate le componenti, tramite la realizzazione di due teste aderenti ai componenti. Si chiamano rivetti e alcuni sono mostrati in figura 11.2.

La più comune tra le rivettature è a **Rivetti ciechi** come quelli in figura 11.3.

Il fatto che la rivettatura sia costosa rispetto ad altre giunzioni per il fatto che i componenti da giuntare devono già essere forati. Per cui si deve aggiungere una lavorazione aggiuntiva per poter rivettare. In più la foratura è una fonte di incertezza sul comportamento a fatica del prodotto rivettato. In più c'è il problema di dover sbavare i fori, in quanto le bave sono fonte di tensioni residue.

I casi che possono portare alla rivettatura a fallire prematuramente possono essere: scegliere correttamente la dimensione del rivetto perché si rischia di piegare il gambo piuttosto di realizzare la testa, caso 11.4a. Bisogna lasciare il giusto spazio affinché la macchina che crea la testa possa lavorare correttamente, caso 11.4b. Anche il fatto di forare vicino ai bordi può essere fonte di pessimo comportamento a fatica, caso 11.4d.

11.2.2 Grafettatura

Si possono realizzare giunzioni tramite una graffetta per lamiera, 11.5a. Non hanno alti carichi di giunzione ma vengono alle volte usate per la realizzazione di mobili.

11.2.3 Aggraffatura

Si era anticipato l'argomento al capitolo 1 a pagina 2. Comunque in figura 11.5b è riproposto il processo per realizzare tale tipo di giunzione.

11.2.4 Giunzione a deformazione plastica

Si realizzano delle piccole deformazioni del materiale per poter alloggiare delle giunzione tra un nucleo e manicotto. Si possono sfruttare le variazioni dimensionali tramite variazione termica per poter facilitare la giunzione. È una tecnica particolarmente usata in ambito elettrotecnico per realizzare gli ancoraggi ai morsetti ed eventuali collegamenti tra metalli diversi (tipo rame-alluminio). Alcuni esempi sono alla figura 11.6.

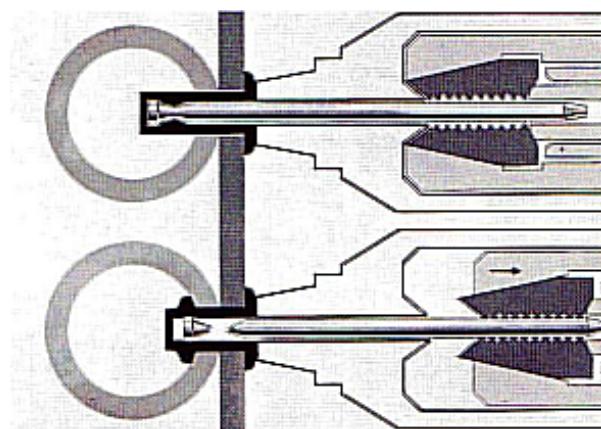
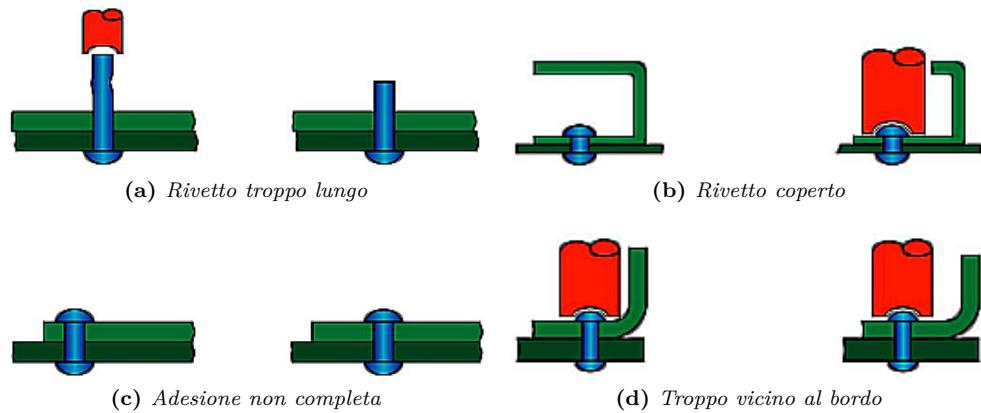
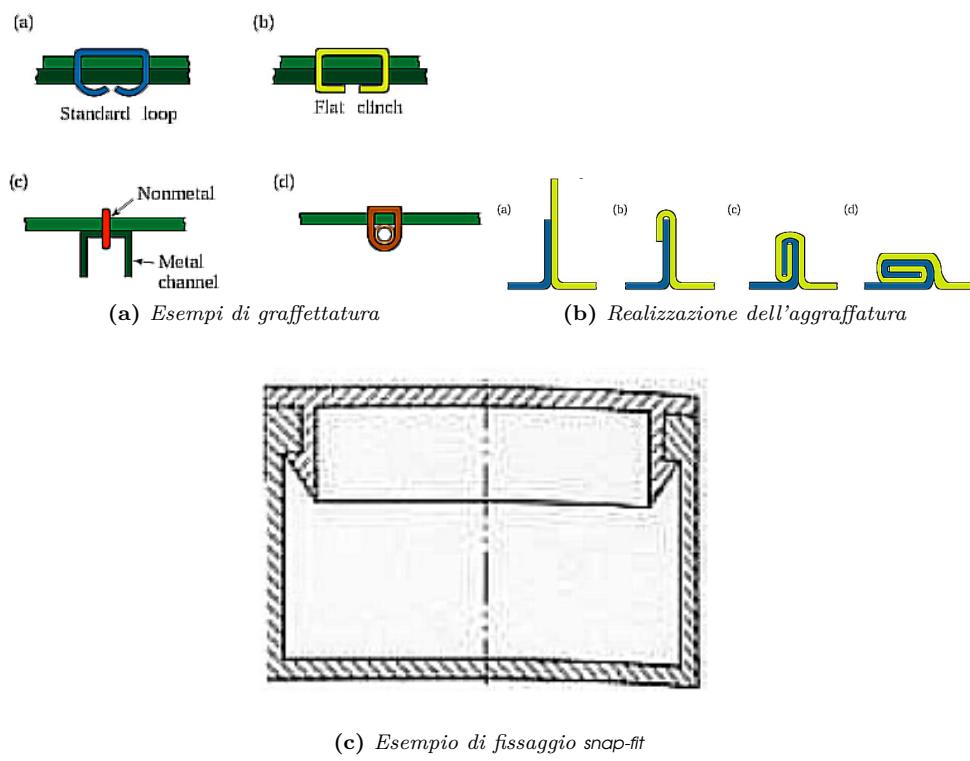


Figura 11.3: Rivettatura cieca



Figura 11.2:
Tipologie di rivetti

**Figura 11.4:** Considerazione sulla corretta rivettatura**Figura 11.5:** Fissaggi meccanici di graffettatura, aggraffatura e snap-fit

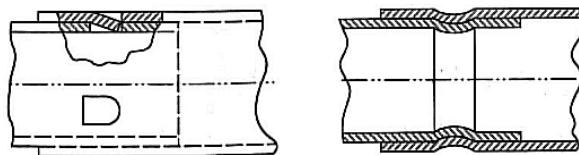


Figura 11.6: Alcuni esempi di fissaggio per deformazione plastica

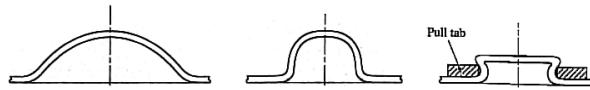


Figura 11.7: Processo di ribattitura

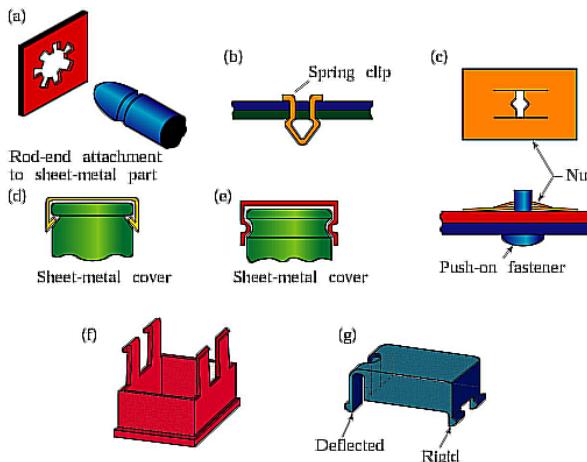


Figura 11.8: Ulteriori metodi di fissaggio meccanico utilizzati

11.2.4.1 Sanp-fit

Detta anche chiusura a scatto, [11.5c](#). Viene molto apprezzata per:

- Basse forze di montaggio,
- elevate forze di smontaggio,
- semplici movimenti di montaggio,
- feedback sonoro o tattile,
- facilità di automazione,
- assenza di minuteria,
- omogeneità dei materiali.

11.2.4.2 Ribattitura

Si "gonfiano" le lamiere e successivamente viene deformata per poter fissare entrambe tramite la deformazione di entrambe. Il processo è riportato alla figura [11.7](#). Viene usata per la realizzazione dell'accoppiamento tra lattina e aprilattina.

Invece, alla figura [11.8](#) sono riportati ulteriori metodi di fissaggio meccanico.

11.3 Saldature allo stato solido

Le principali tecniche per giunzione allo stato solido vengono eseguite su:

- di testa,
- ad angolo,
- per sovrapposizione,
- a spigolo

Mentre le principali tecniche sono quelle della figura 11.9a.

Vengono realizzate senza portare a fusione il materiale. La saldatura a freddo svincola dalla necessità di avere dei materiali che hanno temperature di fusione vicine. Si prenda come esempio il caso di giuntare dei profili di rame con quelli di alluminio per la realizzazione di trasformatori elettrici.

Nella saldatura a freddo non si scalda il materiale, per cui è necessario avere un'ottima preparazione della superficie. In particolare è opportuno che il substrato di entrambi i materiali debba esser preparato per poter eseguire correttamente la giunzione. Deve venire a contatto senza che vi sia presenza di ossidi, polveri, impurezze, ecc... Per rimuovere i contaminanti si possono pulire tramite solventi per rimuovere le impurità. Anche spazzolare contribuisce ad aumentare la rugosità superficiale con conseguente aumento dell'estensione della superficie del substrato, cioè l'area su cui realizzare il legame. Poi si usa il moto relativo, che aiuta a rimuovere eventuali film di ossido e avvia il processo di fusione. Con una successiva deformazione plastica si apre il film ossido portando alla luce il substrato duttile. In teoria non sarebbe necessaria alcuna pressione per effettuare questo tipo di saldature. Viene comunque usata per deformare plasticamente i materiali, facendo in modo che le superfici si conformino l'una all'altra. Favorendo la reciproca saldatura tramite l'ottenimento di un impasto dei due materiali.

Per queste saldature il calore serve per favorire la duttilità dei materiali, facilitando l'intimo contatto dei due substrati. Infatti, non è una necessità scaldare ma una conseguenza.

11.3.1 Saldature a freddo

Le possibilità della saldatura a freddo, come illustrato dal grafico 11.9b, sono:

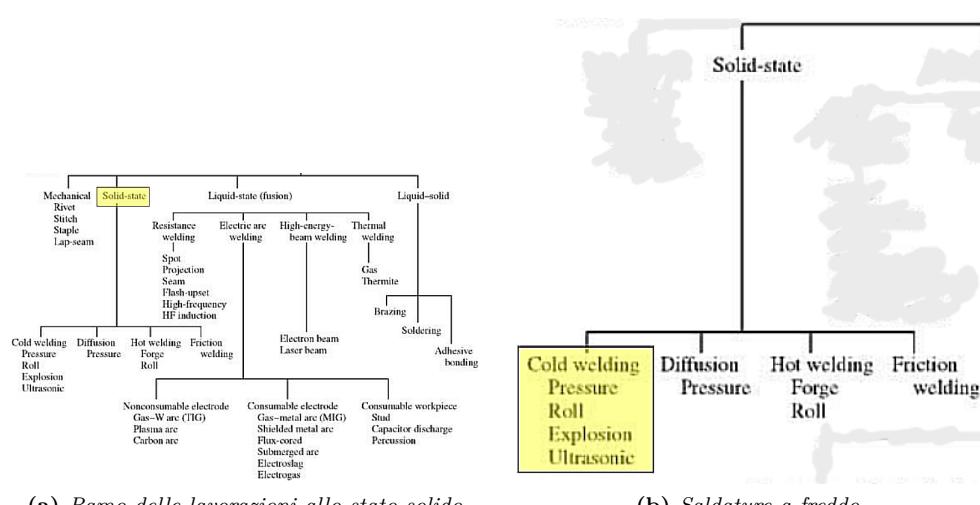


Figura 11.9: Saldature allo stato solido col dettaglio delle lavorazioni a freddo

Saldatura a freddo per sovrapposizione Si basa su una forte dilatazione delle superfici come illustrato alla figura 11.10a.

Saldatura a freddo di testa generalmente usata per fili, si ha una forte pressione sulla testa dei componenti per poterli "impastare" dando deformazione alla superficie del substrato, ne è un esempio la seconda figura 11.10a.

Saldatura a freddo per laminazione Con forti riduzioni di spessore della saldatura a rulli si ottiene una grande espansione della superficie. Il legame può essere impedito localmente con un distanziale. Alla figura 11.10b viene presentato il metodo di funzionamento.

Saldatura a freddo per esplosione Si genera un'onda d'usto che provoca delle deformazioni all'interfaccia dei due materiali portandoli alla saldatura. Come si vede dalle figure 11.10d e 11.10e, si può operare in due maniere ottenendo la saldatura in entrambi i casi.

Saldatura a freddo ad ultrasuoni Si tratta di una lavorazione non convenzionale, anche se l'energia trasmessa è di tipo meccanico, grazie alle alte frequenze degli ultrasuoni si creano onde d'urto che portano anche in questo caso alla saldatura dei due materiali. Vedi la figura 11.10f.

11.3.2 Saldature per diffusione

Si potrebbero eseguire anche senza avere temperature eccessivamente alte $\approx 0.5T_m$. Nella pratica vengono comunque sfiorate le temperature normali per favorire la corretta avvenuta della giunzione. Di fatto favorendo la diffusione degli atomi dei due materiali. Tale tecnica si usa da secoli per realizzare oggetti placcati in oro. Si era anticipato l'argomento quando si era accennato alla *superplasticità*. Tale aiuta a unire la saldatura a freddo come le precedenti che la diffusione. Ciò realizza un giunto di altissima qualità. Si raggiunge tale stato per poter deformare molto semplicemente e a ridotto impiego di forze, dei materiali che risulterebbero decisamente molto duri. Anche la saldatura per diffusione è un processo molto lento. Nella pratica, oltre alle alte temperature si preferisce porre un peso sopra alle zone da giuntare per ottenere una qualità migliore. Tale tecnica permette di realizzare degli oggetti saldati alternativamente senza dover subire ulteriori lavorazioni. Ciò viene realizzato interponendo dei distanziali di nitruro di boro che impediscono la diffusione tra i due materiali, di fatto evitando la saldatura.

Si mette il tutto in un forno, si sovrappone al materiale una foglia d'oro e poi viene applicato un peso per garantire la diffusione.

Alla figura 11.11 viene presentato il processo produttivo di alcuni materiali generalmente utilizzati in ambito aeronautico. In genere si tratta di prodotti in lamiera che tramite questo processo è possibile produrli grazie a questa tecnica. Si evita di utilizzare delle giunzioni rivettate che avrebbero un costo molto elevato, peso maggiore e tempo di produzione altrettanto elevato.

11.3.3 Saldature a caldo

Si rifanno direttamente alle lavorazioni per deformazione plastica a caldo già viste in precedenza. Risulta essere la più antica forma di saldatura per materiali ferrosi. C'è stata un'evoluzione nella tecnica di tali la

Fondamentalmente si può praticamente tutte le tecniche di riscaldamento, L'importante è la successiva pressione da dare ai materiali. Con questo tipo di saldatura, in trazione si rompe il materiale base non il giunto.

11.3 (14)
Aggiungi

11.3.4 Saldatura a frizione

Si tratta di una tecnica con cui scaldiamo gli elementi da giuntare.

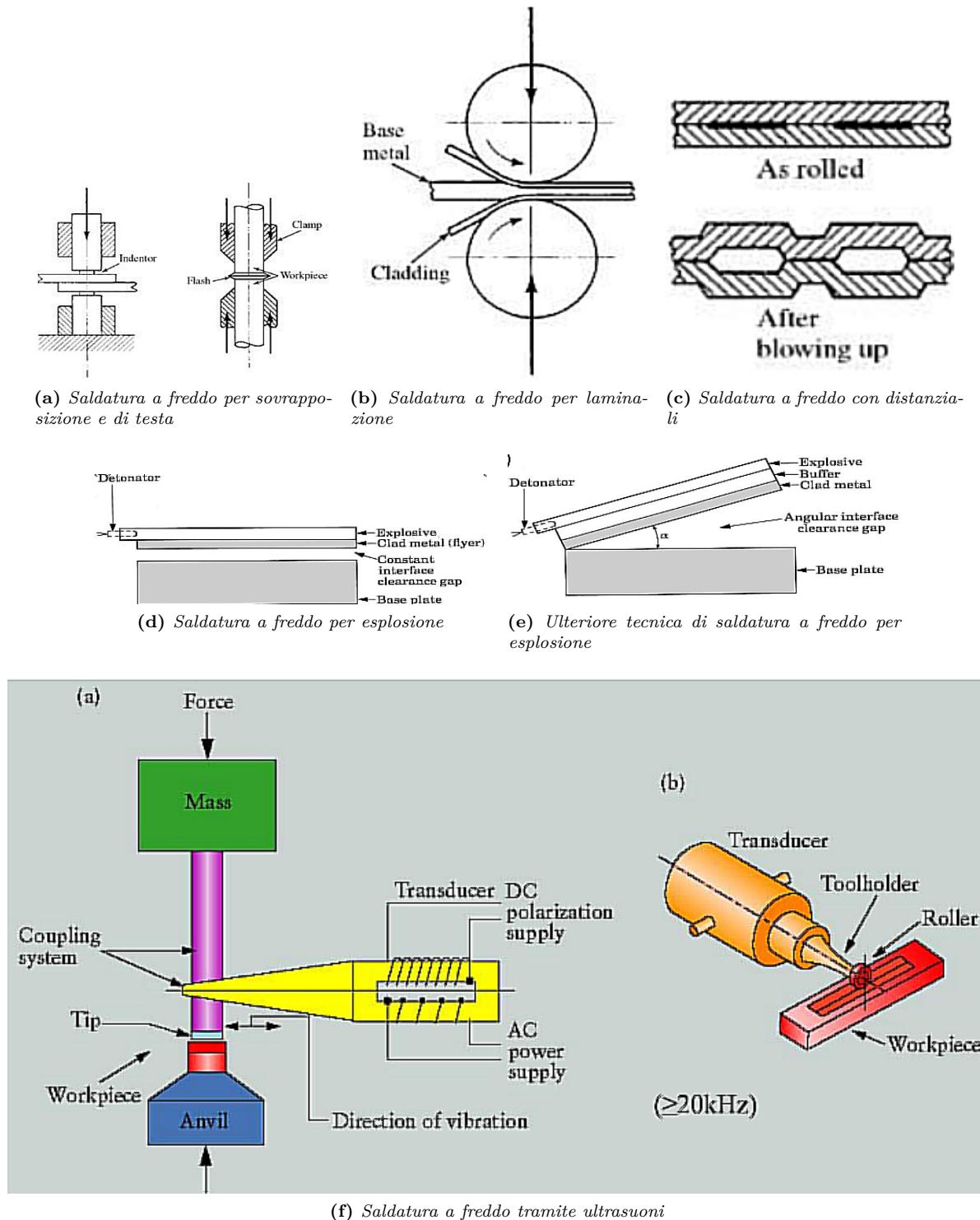


Figura 11.10: Principali tecniche di saldatura a freddo

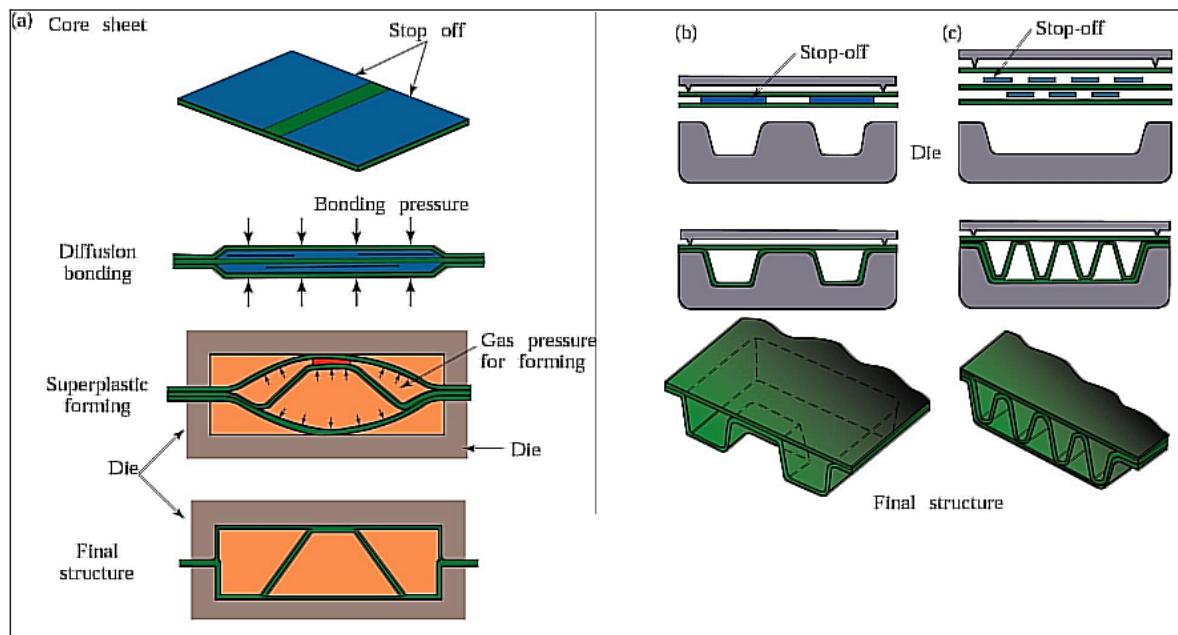
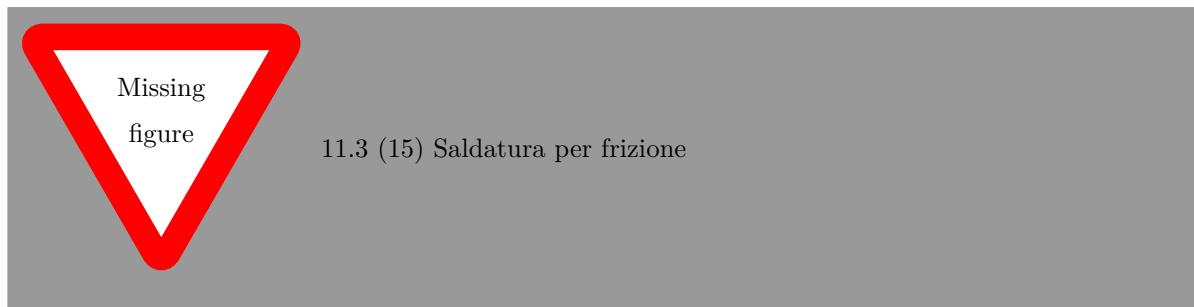
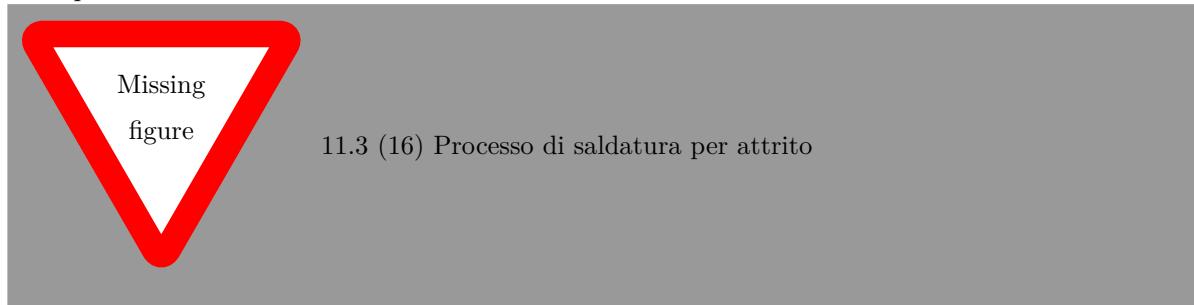


Figura 11.11: Realizzazione per saldatura a diffusione di profili utilizzati in aeronautica



L'attrito determina il riscaldamento dell'interfaccia in più la pressione simultanea andrà a giuntare i due pezzi. Si forma un colletto di bava



Si presenta un piccolo errore nella figura perché si dovrebbe mettere in rotazione, premere poco. Poi fermare la rotazione, aumentare la forza in cui si genera anche la bava. Per poi finire finché la zona pastosa non si raffredda.

11.3.4.1 Friction Stir Welding

Si tratta di una tecnica che si è sviluppata per la saldatura di teste per lamiere di spessore piuttosto pronunciato. Risulta interessante per via del fatto che la macchina necessaria per il raggiungimento

dello scopo basta una fresa a controllo numerico.

L'utensile ruota, scalda il materiale delle due lamiere avvicinate, percorre un qualsiasi percorso di saldatura come se fosse una fresa.

11.4 Saldature a fusione

Vengono definite come le uniche tecniche vere e proprie di fusione. Si tratta delle tecniche di saldature più ampio ed utilizzato in ambito meccanico.

Si parla di saldatura eterogena se si apporta un terzo materiale per effettuare la saldatura, altrimenti omogenea.

Le principali categorie di saldatura sono:

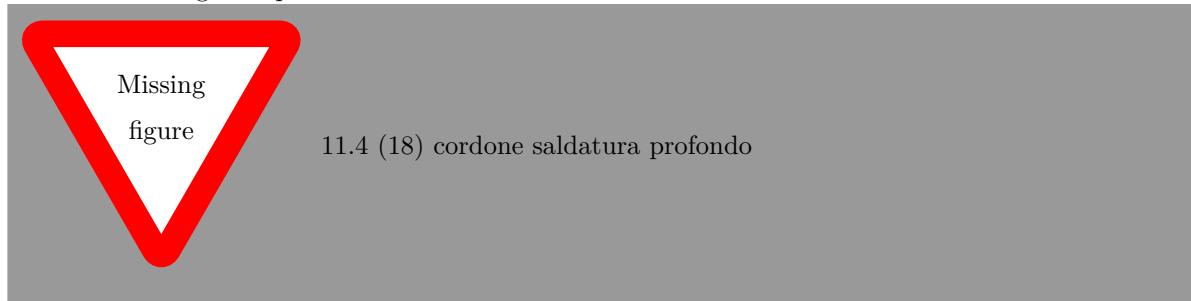
Saldatura a resistenza

Saldatura arco elettrico

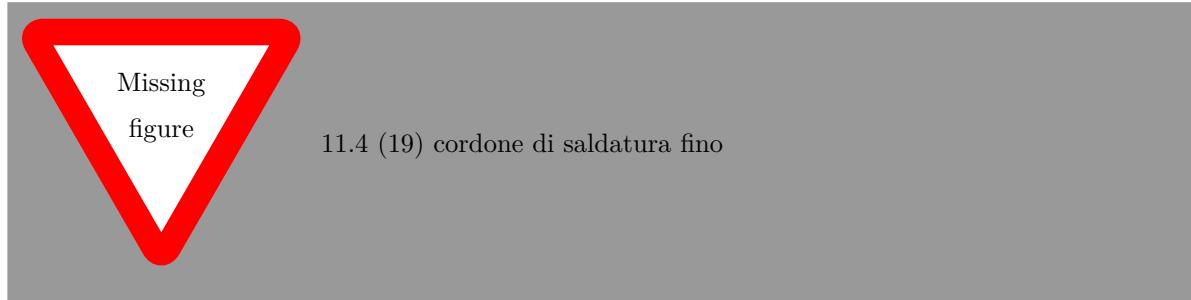
...

Le velocità di raffreddamento sono alte, superiori a quelle della fonderia in stampo permanente. Dunque si possono ottenere delle zone che restano amorfe, oppure si hanno degli effetti di ingrossamento del grano per via del ciclo termico imposto tramite la saldatura. Il grado di disomogeneità cresce passando dai metalli puri alle leghe multi fase e dipende anche dalla concentrazione di energia.

Un'aspetto importante durante una saldatura è l'**intensità di energia**: ovvero un parametro energia/area. Con un'elevata intensità di energia si ottiene una saldatura profonda. Avendo una zona termicamente alterata è particolarmente stretta: per via del calore che ha meno tempo di diffondersi. Inoltre, si hanno minori cambiamenti nella struttura metallurgica e minori sollecitazioni sul cordone di saldatura durante il raffreddamento. Si riscontra anche una maggiore produttività. Riuscire ad avere un'elevata intensità di energia ha parecchi benefit in termini di riuscita della saldatura.



Al contrario si ha un cordone di saldatura particolarmente fino e disteso



Considerando dei materiali monofasici: si suppone di giungere due lembi dello stesso metallo puro con stesso materiale d'apporto. In parte fondono anche i lembi. Il materiale base adiacente alla zona fusa cambia proprietà.

11.4 (17)
aggiungere



Se il materiale era incrudito c'è il rischio di ricristallizzazione e la dimensione dei grani e la dimensione dei grani cresce con la permanenza ad alta temperatura. Se il materiale era ricotto i grani crescono di dimensioni. In ogni caso ci sono grani grandi al bordo della zona fusa.



La pozza di saldatura: ovvero dove si concentra la maggior parte dell'intensità di energia avrà una ben specifica forma. In generale se si avesse solo un punto di saldatura questo avrebbe una pozza di forma circolare. Aumentando la velocità di traslazione della fonte di energia si avrà una forma della pozza prima ellittica e poi maggiormente allungata all'aumentare della velocità.

Altri parametri che permettono di stimare la velocità di saldatura sono:

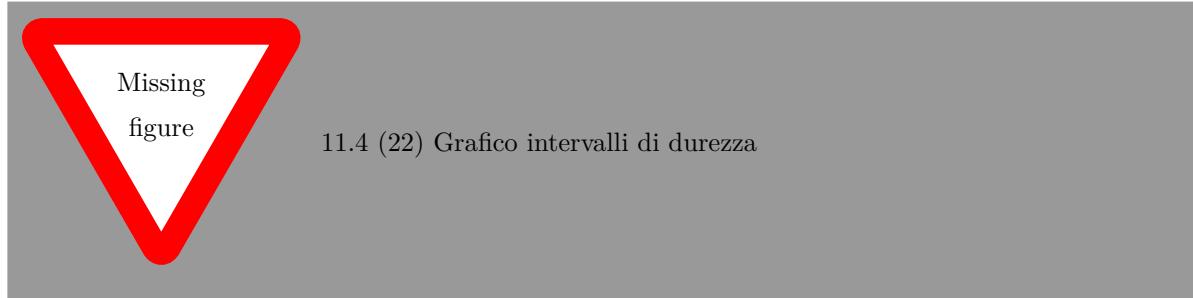
- Spessore del materiale
- Conduttività del materiale
- Temperatura e tempo di fusione
- Calore latente del materiale

11.4.1 Caratteristiche del giunto

Passando da due materiali monofasici a delle leghe. In corrispondenza del condone di saldatura si avranno delle dendriti colonnari particolarmente lunghe e fine per via dell'alta velocità di raffreddamento. Tra la temperatura di Liquidus (T_L) e quella di Solidus (T_S) si ha una zona pastosa. Elementi basso fondenti segregano ai bordi della zona fusa.

Oltre alle leghe, altra situazione comune è quella dei sistemi a più fasi. I materiali a composizione eutettica non danno particolari problemi. L'unico punto cui fare attenzione è quella della formazione di strutture lamellari particolarmente fragili. I problemi durante la solidificazione si presentano soprattutto nella Zona Termicamente Alterata (ZTA). Infatti, nello specifico degli acciai, la diversa velocità di raffreddamento da delle trasformazioni formando martensite e per temperature più basse la bainite. La martensite è particolarmente problematica perché oltre alla fragilità da dei problemi di tensioni residue nella ZTA. Per quanto riguarda la trasformazione delle fasi: l'eventuale materiale d'apporto si è supposto che avesse la stessa composizione del materiale base. In generale questo non è vero: il materiale d'apporto non è quasi mai lo stesso materiale, ciò per evitare che ci siano delle trasformazioni di cricche e trasformazione di fasi. Si evitano le cricche ma si complica di più lo studio del comportamento della saldatura. In più, non si ha un equilibrio per via del fatto che non si sta raffreddando omogeneamente.

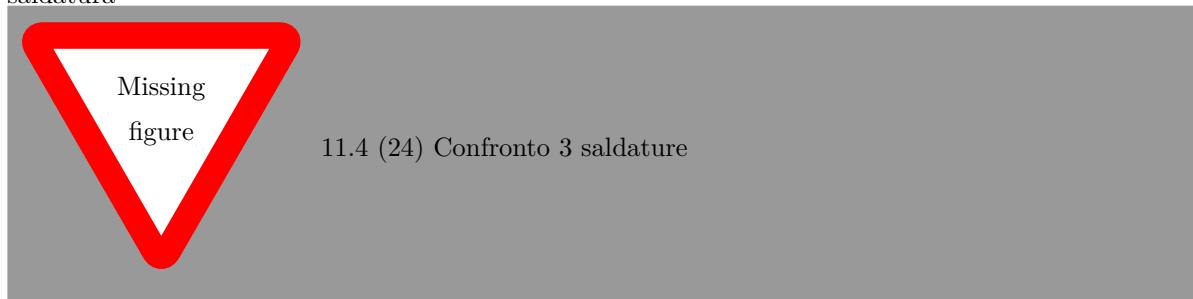
Le soluzioni solide in genere non danno problemi. Gli eutettici tendono ad essere fragili, ma hanno buone qualità quando le due fasi sono duttili. Composti intermetallici sono da evitare per via della loro fragilità. Se la differenza tra le temperature di fusione è alta allora si parla di brasatura. Perciò si parla di saldatura quando le due temperature di fusione sono abbastanza vicine.



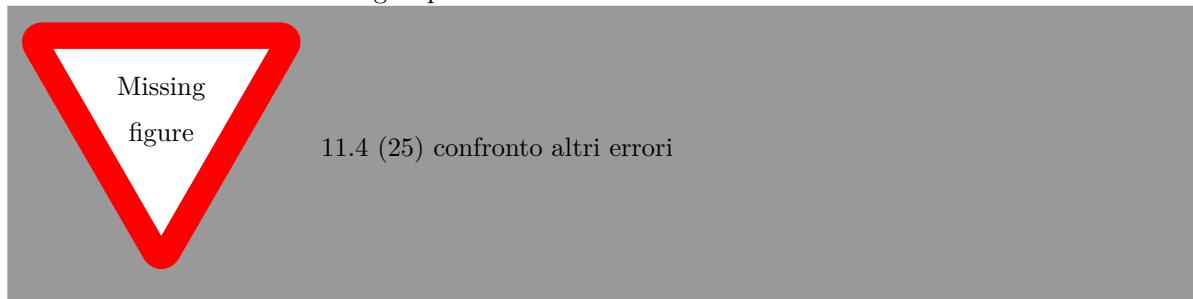
Il grafico dimostra quanto una saldatura a caldo possa influenzare la durezza del materiale base. Perciò per le applicazioni critiche si cerca di evitare l'utilizzo delle saldature. Dunque, è un aspetto da tenere bene a mente durante il processo produttivo.

11.4.2 Difetti e qualità della saldatura a fusione

Nella realizzazione della saldatura a fusione possono verificarsi dei difetti. Si farà riferimento ad una saldatura



Quando l'apporto di calore è insufficiente: perché ci si muove troppo rapidamente o per altri motivi, si forma un **underfill** per cui si formano dei riempimenti non completi di materiale d'apporto ed eventualmente delle mancanze di fusione per cui non si ha un mescolamento dei due materiali. Altro caso è quello dell'**Overfill**: si ha un eccesso di materiale d'apporto. Ciò è dovuto alla troppo bassa velocità di traslazione in confronto all'energia specifica donata al materiale.



Anche la posizione dove apportare il materiale è cruciale, infatti si possono avere delle mancanze locali di materiale: per cui la saldatura ha un risultato pessimo anche se eseguita a regola d'arte. Come per le saldature a freddo, anche per queste giunzione è opportuno preparare correttamente i due materiali da saldare. Perciò è opportuno rimuovere, in varie forme, i contaminanti sugli strati superficiali sui materiali base. le reazioni chimiche indesiderate sono evitate isolando la zona del fuso col vuoto, con un'atmosfera protettiva o con delle scorie che si formano in superficie al cordone di saldatura. Per

tale scopo si aggiungono dei materiali che legano con le impurità e le portano in superficie. Bisogna prestare attenzione alle scorie: sono materiali fragili e bisogna eliminarle nel caso in cui la saldatura vada eseguita in più passate. I gas rilasciati o formati durante la saldatura possono portare a una porosità che indebolisce il giunto e aumenta le tensioni; particolarmente pericoloso è l'idrogeno: si trova nell'umidità dell'aria. la fluidità del fuso permette alle scorie e ai gas di raggiungere la superficie, liberandole dal cordone. Le segregazioni bassofondenti provocano la formazione di cricche in quanto vengono respinte durante la solidificazione delle dendriti.

Le strutture saldate dovrebbero essere progettate tenendo conto delle dilatazioni termiche imposte durante il riscaldamento per la saldatura. Ricordando che il cordone di saldatura impone una distorsione una volta raffreddato, lasciando tensioni residue sul materiale. Peggiorando il comportamento a fatica del materiale. Queste tensioni residue sono tanto maggiori quanto l'intervallo di solidificazione del materiale è ampio. In più questi fenomeni di tensioni residue favoriscono la corrosione per *tensocorrosione*. Dunque si cerca di saldare delle leghe che presentano intervallo di solidificazione particolarmente rastremato.

Un accorgimento per ridurre gli effetti peggiorativi della saldatura è il **preriscaldamento**. Riduce l'energia necessaria per il completamento della saldatura. Riduce la velocità di raffreddamento permettendo la saldatura di materiali in cui il raffreddamento rapido provoca la formazione di fasi fragili. Aiuta ad allontanare l'idrogeno. Riduce il ritiro differenziale, le distorsioni e le tensioni residue. Inevitabilmente si ha una tendenza alla formazione di grani cristallini più grandi per via della temperatura. altro beneficio è dato dalla **pallinatura**. Imponendo delle tensioni di compressione sul materiale base si migliora il comportamento del materiale saldato. In più, grazie alla pallinatura si possono rimuovere delle scorie presenti sulla superficie del cordone precedente: utile per saldature successive.

Si può pensare di eseguire dei trattamenti termici post-saldatura: ad esempio una ricottura di distensione aiuta a rimuovere eventuali tensioni residue. Può portare a dei fenomeni di sovrainvecchiamento per le leghe che hanno indurimento per precipitazione. Eventualmente anche la normalizzazione può avere degli effetti benefici. Eventualmente trattamenti di tempe e simili permettono di gestire opportunamente il metallo dopo la saldatura.

11.4.3 Intensità di energia

L'intensità di energia è:

$$I_e = \frac{\text{Energia ceduta al sistema}}{\underbrace{E_c}_{\text{Area di saldatura}}} \quad (11.1)$$

Cannello ossiacetilenico ha un'intensità di risaldamento di $1 \div 10 \text{W/mm}^2$ particolarmente apprezzato perché non è richiesta l'alimentazione elettrica, per cui è possibile saldare anche in zone dove non arriva la rete elettrica.

Saldatura ad arco $10 \div 1000 \text{W/mm}^2$

Fascio laser o elettronico $1000 \div 10000 \text{W/mm}^2$ ne risulta una saldatura di qualità molto alta. Vengono anche definite come saldature *kayhole*.

Negli altri metodi di saldatura, il metodo di riscaldamento avviene tramite corrente elettrica. Perciò anche il sistema di controllo deve essere di buona qualità. Alcuni sistemi di saldatura elettronica prevedono dei sistemi di retroazione per ottenere un migliore risultato.

11.5 La saldabilità

Acciai ferritici Sono materiali facilmente saldabili bisogna prestare attenzione all'eventuale formazione di martensite. Comportamento tipico per gli acciai altamente temprabili. Il preriscaldamento e il post riscaldamento possono aiutare a migliorare la situazione.

Lamiere rivestite Nella saldatura a resistenza lo zinco evapora, crea un plasma e porta a polverizzazione e porosità. Perciò lo zinco presenta una criticità nella saldatura di materiali zincati. Perciò il contenuto di zinco non deve essere eccessivo e la temperatura controllata.

Acciai inossidabili Le condizioni di saldatura devono essere scelte per impedire la formazione di Cr_2O_3 e carburi di cromo. Negli austenitici la formazione degli ossidi di cromo ed eventuali carburi è ostacolata con varie tecniche. Per evitare la formazione di ossidi e carburi vengono aggiunti degli elementi che formano dei carburi stabili.

Zinco Ossida e vaporizza molto facilmente, per cui è essenziale avere un accurato controllo della temperatura di saldatura.

Alluminio e magnesio Entrambi sono facilmente saldabili ma in genere devono essere protetti tramite atmosfera a gas inerte data la facilità di entrambi ad ossidare. Entrambi sono caratterizzati dalla formazione di ampie tensioni residue, per cui è opportuno effettuare dei Trattamento Termico (TT) dopo il processo di saldatura.

Leghe a base di rame Il rame puro si ossida piuttosto bene se deossidato

Nichel L'aspetto critico è lo zolfo perché se presente in percentuali bassissime infragilisce molto la struttura a base di nichel.

Leghe di titanio e refrattarie Tanto più alta è la temperatura di fusione tanto è la facilità di creare ossidi: per cui si preferisce usare delle tecniche di saldatura ad alta intensità di energia.

11.6 Saldatura a resistenza

Si sfrutta l'effetto Joule per portare a fusione il materiale. Per cui i due materiali vengono premuti tra loro. Si applica per un certo numero di cicli una specifica intensità di corrente che andrà a riscaldare i due componenti.

Il problema principale è quella per cui la massima resistenza elettrica sia tra gli elementi da giungere. Altrimenti si ha il massimo riscaldamento in altri punti del materiale che non sono coinvolti nella saldatura. Perciò si esclude per tale tecnica la giunzione di leghe di rame e alluminio, essendo buoni conduttori non presenterebbero delle resistenze tali da generare effetto Joule interessante.

Infatti tale tecnica viene particolarmente usata per saldare le lamiere delle automobili.

Missing
figure

11.6 (26) Saldatura a resistenza

Le differenze di tensione sono piuttosto basse. Saranno le intensità di corrente ad essere decisamente alte. Ricordando che:

$$J = I^2 R t \quad (11.2)$$

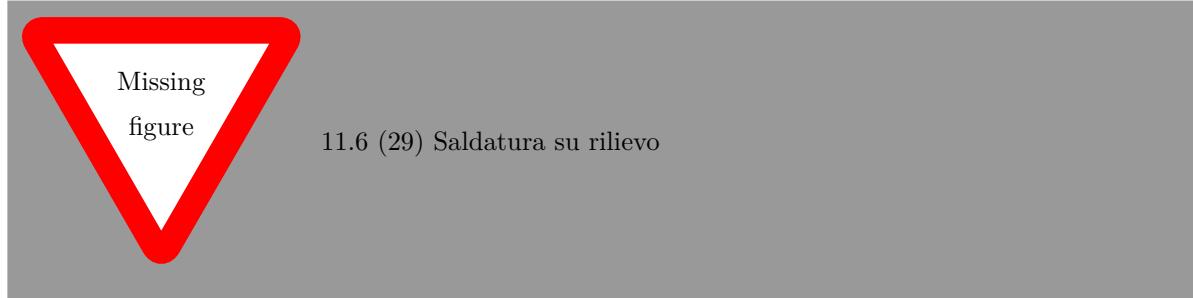
La massima resistenza elettrica **dove** essere tra le due lamiere. Altrimenti si salderebbero gli elettrodi alle lamiere e non le due lamiere. In generale gli elettrodi devono essere di materiale altamente conduttivo (rame, alluminio) e spesso raffreddato per garantirne la durata. L'affermazione di tale tecnica è data dal fatto che la pulizia superficiale è relativamente importante. Per selezionare i migliori parametri vengono spesso realizzate delle prove tecnologiche distruttive per valutare la riuscita della saldatura.

Questo tipo di saldatura non realizza un vero e proprio cordone di saldatura. In generale si realizzano dei punti di saldatura. Per realizzare una specie di cordone si realizzano più punti di saldatura ravvicinati, garantendo anche la tenuta ai liquidi.

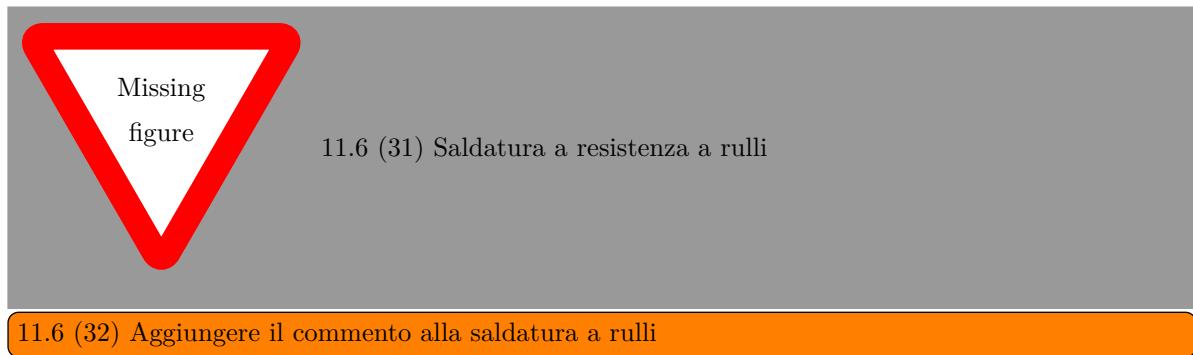


11.6.1 Saldatura su rilievo

Si tratta di una tecnica utilizzata per controllare meglio il punto di saldatura. Per quanto riguarda il resto, non cambia nulla rispetto alla precedente.



11.6 (30) Le figure devono essere poste come sottofigure commentate

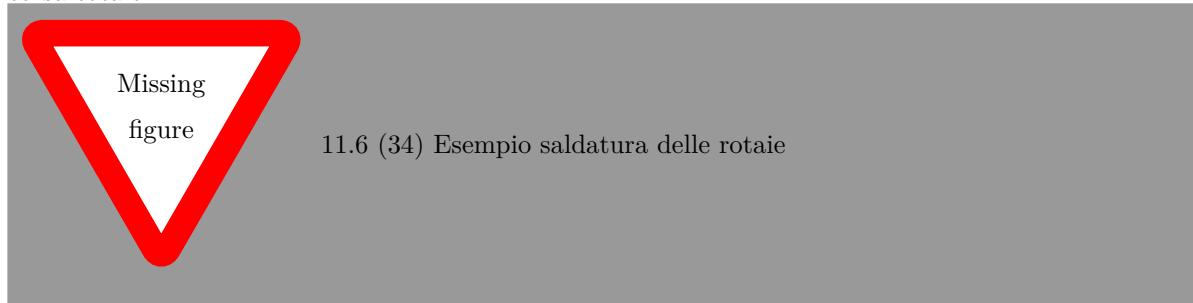


11.6.2 Saldatura a scintillio

viene anche chiamata Flash Upset Weld, si differenzia rispetto alle precedenti per:

- Geometria: questa è una saldatura di testa
- Processo: la differenza di potenziale viene applicata prima che i due elementi vengono a contatto.
- Il metallo fuso viene espulso

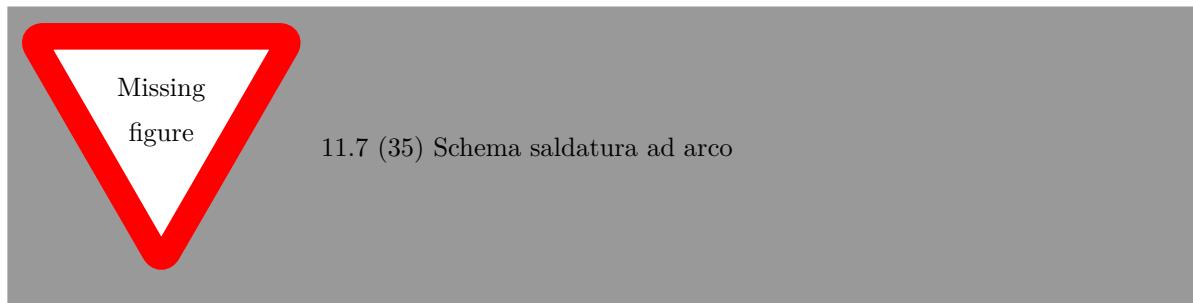
In questo caso il metallo fuso viene espulso. La saldatura si forma ricalcando le superfici calde e solide. Una buona saldatura verrà prodotta solo de la velocità di avvicinamento, corrente e tensione, corsa totale



11.7 Saldature ad arco

L'arco si riferisce al fatto che la scintilla che si crea è prolungato nel tempo: una scintilla stabile. Tale genera il calore che porta a fusione il materiale. In generale ha un'ottima resistenza, sono adatte per componenti di grosse dimensioni e le tolleranze sono limitate. Lo sviluppo delle tecniche si ha per sopperire a diversi aspetti negativi di tali saldature.

L'arco elettrico fornisce il calore per fondere il metallo, il polo collegato all'elettrodo negativo è detto catodo e sarà lui ad essere saldato all'altro elemento, infatti dal catodo partono gli elettroni per realizzare l'arco elettrico che di fatto diventa un plasma. alle volte si sfruttano dei gas inerti per salvaguardare gli elettrodi. Il flusso degli elettroni è responsabile de 85% del trasferimento dell'energia.



Risulta fondamentale il flusso di elettroni in quanto da quello si hanno diversi cordoni di saldatura. Ad esempio con le lamiere sottili si usa invertire i due poli in quanto non si è interessati ad avere una saldatura profonda.

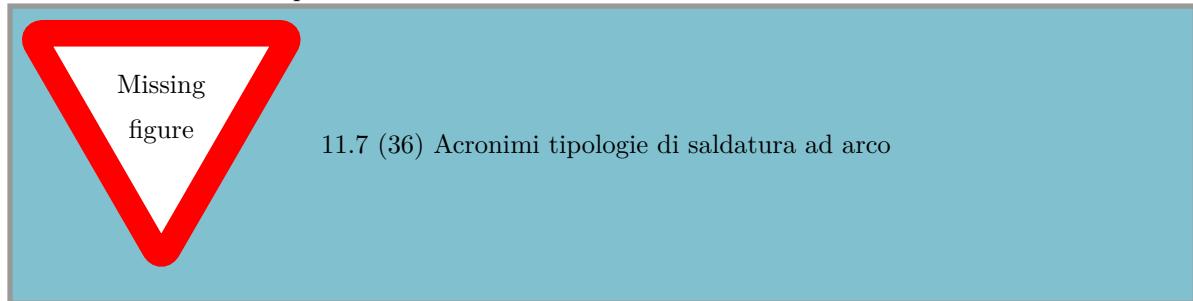
Nel caso di alluminio e magnesio si usa invertire la polarità per favorire lo strappo degli strati di ossido dai metalli. Si può anche pensare di usare una corrente alternata per tale scopo.

Il calore prodotto è in parte disperso nell'ambiente circostante, soprattutto in presenza di correnti molto basse.

La protezione del cordone di saldatura si effettua tramite gas inerte oppure tramite la formazione di scorie che emergono dal cordone di saldatura, facendo in modo che le impurità salgano in superficie piuttosto di rimanere dentro il cordone.

L'elettrodo può essere permanente o consumabile.

Quindi delle suddivisione può essere fatta tra 4 parametri: Metodo di protezione: gas inerte o scorie; elettrodo consumabile o permanente.



vediamo ora le due tecniche di saldatura ad arco tramite elettrodo permanente.

11.7.1 Saldatura ad arco con elettrodo permanente

è detta saldatura **GTAW** o **TIG**. Il materiale che fonde è il materiale base detta **saldatura autogena** oppure con materiale d'apporto. Nella GTAW elettrodo e saldatura sono protetti da gas inerte.

In generale il catodo è l'elettrodo, soprattutto se di tungsteno, mentre si preferisce invertire la polarità quando il materiale base è alluminio o magnesio.

Per attivare l'arco: l'elettrodo viene allontanato a velocità controllata p si usa in arco ausiliario. Una corrente ad alta frequenza aiuta l'attivazione e il mantenimento di tale arco.

In genere si ottengono delle saldature di alta qualità. In più, la saldatura è visibile per successive ispezioni.

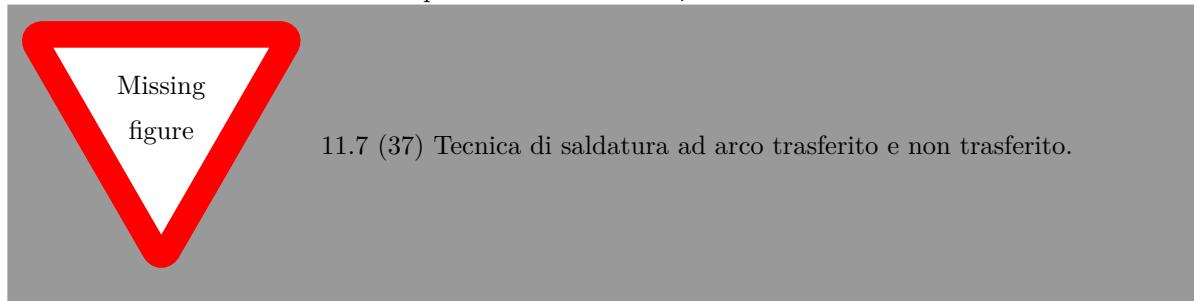
Bisogna prestare attenzione al mantenimento dell'elettrodo: non può surriscaldarsi e non deve entrare in contatto col pozzo di fuso.

11.7.2 Saldatura ad arco al plasma

In questo caso, a differenza della precedente, sia hanno 2 gas: uno di protezione della saldatura e l'altro che verrà ionizzato per realizzare il plasma. Di solito si preferisce far passare il plasma attraverso un piccolo foro per garantire maggiore concentrazione del plasma. Inizialmente il plasma non viene

avviato tra elettrodo e il materiale base, bensì si attiva internamente alla **torcia**. Solo successivamente si avvia la corrente di saldatura che permetterà al plasma di concentrarsi sul materiale da saldare.

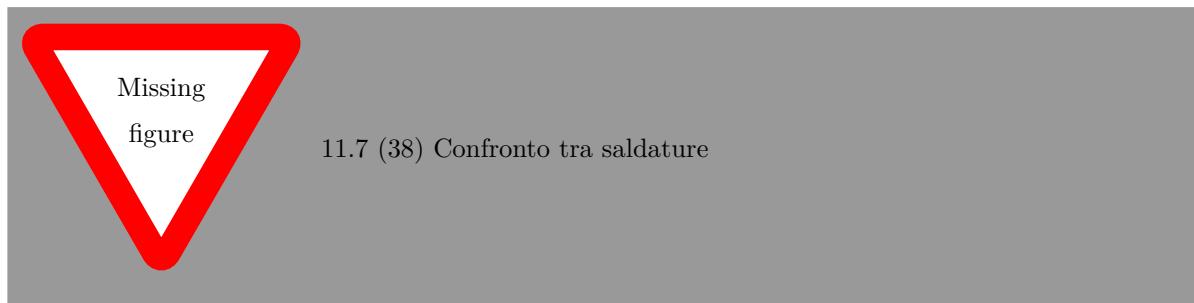
A bassa densità di corrente la zona fusa è simile a quella ottenuta nella saldatura ad arco convenzionale. Ad alte densità di corrente prevale la modalità **keyhole**.



Le due tecniche di saldatura al plasma sono

Ad arco non trasferito in cui il plasma viene generato internamente alla torcia e resta all'interno della torcia. Sarà l'irraggiamento a scaldare il materiale.

Ad arco trasferito In questo caso si ha un classico arco di plasma in cui l'arco passa dalla torcia al prezzo, scaldandolo.



la saldatura al plasma si caratterizza per i valori particolarmente elevati di temperatura che si riescono a raggiungere. Ciò permette di lavorare molto più velocemente rispetto ad altre tecniche.

Orsa si vedranno le tecniche di saldatura con elettrodo consumabile. In pratica l'elettrodo stesso diventa il materiale d'apporto.

11.7.3 Saldatura ad arco con elettrodo consumabile

L'elettrodo è un metallo conduttore che deve consumarsi per divenire il materiale d'apporto. La tecnica si definisce come **GMAW** o **MIG**. Anche qui si sfrutta un gas protettivo.

L'elettrodo è collegato al terminale positivo e la densità di corrente determina la modalità di trasferimento del metallo. Ciò si vuole perché è l'elettrodo che deve cedere degli ioni per depositarsi sul materiale base. In generale si trova un cordone di saldatura peggiore dei precedenti.

In questo caso non sono gli elettroni che danno la maggior parte dell'energia per scaldare il materiale. Bensì la densità di corrente. In particolare, correnti a bassa densità, si ha un trasferimento per corto circuito, il gfas è scelto per minimizzare gli spruzzi perché il processo di saldatura è un susseguirsi di avvicinamento e allontanamento dell'elettrodo. Così al riscaldamento dell'elettrodo si scioglie una goccia. A densità intermedia si ha un trasferimento globulare, sono possibili solo saldature su piani orizzontali. Mentre a densità elevate si ha un deposito per spray ed è possibile saldare in qualsiasi direzione perché le gocce sono molto piccole e non risentono della gravità. Tra l'altro è la tecnica che dà la migliore finitura al cordone. La corrente utilizzata è a impulsi. Questa saldatura permette di saldare anche lunghe distanze per via del fatto che l'elettrodo è disponibile sul mercato in rocchetti. in più il processo può essere automatizzato.

Un aspetto a cui prestare particolare attenzione è il fatto che queste tecniche vengono eseguite al chiuso. Ciò per evitare che venti possano spostare i gas protettivi lasciando scoperto il cordone di saldatura.

11.7.4 Saldatura ad arco con elettrodo rivestito

Si tratta di una tecnica **SMAW**. In questo caso l'elettrodo è ricoperto da un materiale protettivo che permetterà la formazione delle scorie. Ciò è un problema perché tale tecnica è eseguita manualmente per il fatto che le bacchette hanno una lunghezza piuttosto limitata e spesso è necessario interrompere la lavorazione. Come vantaggio il fatto che essendo il protettivo già sul fondente, non è necessario l'utilizzo di gas protettivi e può essere eseguita in ambienti aperti.

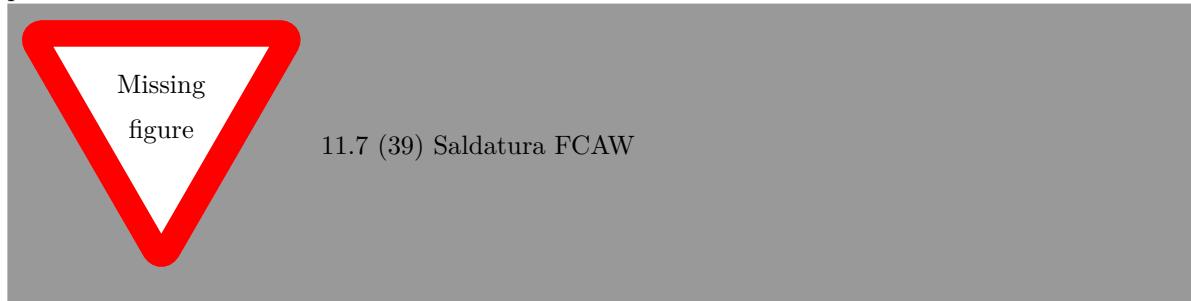
Se scelto in maniera ottimale, il protettivo dell'elettrodo, può migliorare la situazione in termini di saldatura.

Le bacchette sono realizzate in quel modo perché il protettivo è un materiale particolarmente fragile, per cui non sarebbe possibile realizzare supporti più lunghi. Si tratta di una saldatura piuttosto lenta per via della sua natura.

In passato era la tecnica più utilizzata in assoluto.

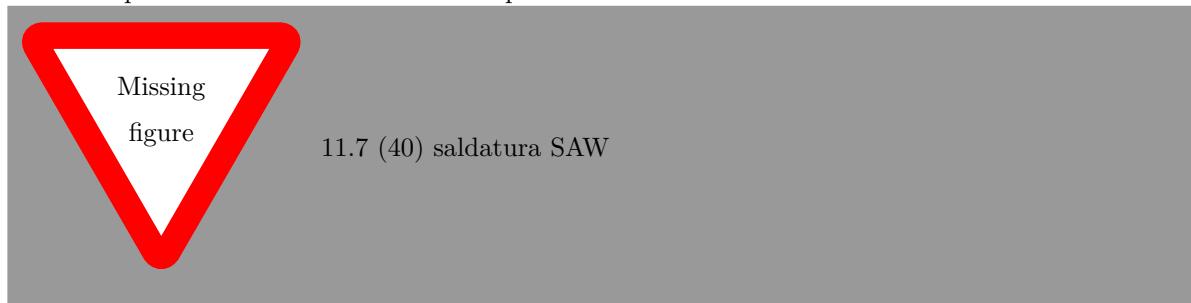
11.7.5 Saldatura ad arco con fondente intubato

Trattasi della tecnica **FCAW**. Il vantaggio di avere il protettivo intubato è quello di avere una qualità migliore e più profondo. Il materiale d'apporto si presenta come piattina cava contenente il protettivo.



11.7.6 Saldatura ad arco sommerso

Indicata **SAW**. Si tratta di una tecnica particolarmente utilizzata in campo automatico. In questo caso non elettrodo e fondente non sono più inclusi in un unico corpo bensì sono organi separati. Questa saldatura può essere usata solamente su superfici orizzontali.



11.7.7 Saldatura ad arco con elettroscoria

La sigla è **ESW**. In questo caso la saldatura deve essere realizzata in verticale. Si usa per produrre giunti di grosso spessore. Il filo dell'elettrodo è all'interno di una pozza di scoria fusa. L'arco viene spento dalla scoria e il calore è fornito dalla resistenza elettrica della scoria. Pattini di rame trattengono fuso e scoria.

I pattini di rame raffreddati ad acqua chiudono lo spazio tra le parti da saldare per evitare che il fuso e la scoria fuoriescano. La testa di saldatura viene sollevata mentre il deposito di saldatura si accumula.

11.7.8 Saldatura ad arco a perno

Sigla **SWP**. In questo caso non si ha la necessità di un vero e proprio materiale d'apporto, saranno i componenti da giungere ad essere l'apporto. Si tratta di una saldatura autogena. Nella saldatura a perni l'arco elettrico è mantenuto tra la sporgenza di un pezzo e la superficie dell'altro. Dopo fusione i 2 pezzi vengono schiacciati uno contro l'altro. Un anello ceramico concentra l'argo, protegge dall'ossidazione e contiene il fuso. Il diametro



L'anello ceramico svolge varie funzioni:

- Concentra l'arco,
- limita l'ossidazione
- Contiene il fuso.

11.8 Automazione delle saldatura

L'obiettivo è quello di saldare il più possibile in maniera automatica. Si per evitare l'impiego di operatori, sia per ottenere delle saldature a qualità migliori. Il controllo del processo è sempre più spesso automatico. La forma degli impulsi elettrici è controllata da dispositivi elettronici. I valori ottimali di corrente velocità di spostamento e velocità di avanzamento degli elettrodi vengono impostati e controllati tramite una macchina **CNC**. La cianfrinatura o viessol è una particolare lavorazione che serve a preparare i lembi prima che subiscano il

11.8 (43) Da rivedere dalle slide

- facilitare la _____

In alcuni casi viene eseguita in passate successive. Si nota dalla figura che le successive passate viderrebbero essere eseguite alternativamente tra

11.7 (41)
Aggiungi

11.8 (44)
aggiungi

11.8 (45)
Aggiungi
ref

11.9 Saldature chimiche

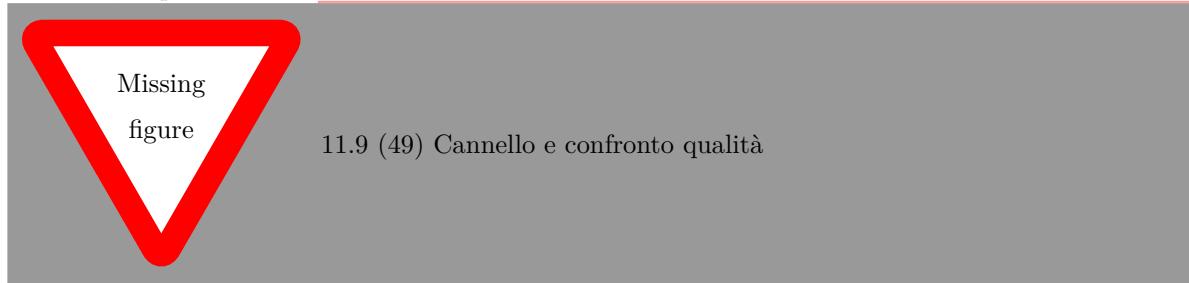
11.9.1 Saldatura con cannello ossiacetilenico

Si usa l'acetilene perché il gas che fonde a temperatura più alta. Però la temperatura massima che si raggiunge con questa tecnica, arriva fino a 3400°C. Si usa in ambito artigianale, per delle riparazione e, in particolare, per tutti quegli ambienti dove non è presente la corrente elettrica.

Per realizzare tale saldatura sono necessarie due bombole una con l'acetilene e l'altra con l'ossigeno. La fiamma che si ottiene si divide in 3 zone ben definite.

1. Prima combustione nella zona interna, genera 1/3 del calore.
2. I prodotti della reazione determinano la seconda zona riducente.
3. Terza zona di combustione.

Il fatto che la reazione sia riducente permette di utilizzare tale tecnica in particolare con gli acciai al carbonio. La versatilità del controllo manuale, la possibilità di avere fiamma neutra, ossidante o riducente, la possibilità di



11.9.2 Saldatura alla termite

Si tratta di una tecnica che può sostituire la saldatura a resistenza tramite scintillio. La termite è una miscela di un ossido metallico e un materiale puro. Si tratta di una reazione di ossidoriduzione, per cui si ottiene un'ossidato che libera energia e ferro. Si possono aggiungere delle altre particelle di materiali per evitare di alzare troppo la temperatura del metallo. Il ferro così ottenuto colerà verso il basso e salderà i componenti.

Si realizza uno stampo con una tramoggia in cui sarà presente la termite, durante la reazione colerà il ferro dentro lo stampo che poi dovrà essere distrutto e il pezzo andrà ripulito.

11.9 (46)
Aggiungi la reazione chimica

11.9 (47)
Aggiungi le formule chimiche

11.9 (48)
aggiungi

11.9 (51)
integra con le slide

APPENDICE A

Acronimi

CCC	Cubico a Corpo Centrato
CFC	Cubico a Facce Centrate
CNC	Controllo Numerico Computerizzato
FMS	Flexible Manufacturing Systems
CS	Cubico Semplice
TR	Technical Report
TT	Trattamento Termico
ZTA	Zona Termicamente Alterata