



D E Department of
Engineering
Ferrara

Appunti

Tecnologie Meccaniche II

Nicolè Lorenzo

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	28.02.2023	LN	Prima compilazione con prime modifiche al modello
1.1	01.03.2023	LN	Applicazione modello alla necessità
1.2	18.04.2023	LN	Continuazione con la produzione del testo, aggiunti capitoli 2, 3, 4
2.0	27.05.2023	LN	Prima versione completa possibile rilascio, sono aggiunti i TODO dove necessario integrare
2.1	01.06.2023	LN	Completato capitolo giunzioni, manca la tornitura
2.2	01.06.2023	LN	Completato tutto il manuale di appunti

Università degli Studi di Ferrara

[LN] Nicolè Lorenzo - lorenzo.nicole@edu.unife.it

Prefazione

Il presente testo è tratto dalle lezioni di Tecnologia Meccanica II tenuto si nel secondo semestre del primo anno della laurea magistrale di Ingegneria Meccanica, nell'anno accademico 2022-2023.

Si ringrazia il professor D'Angelo per il materiale fornito. Tutto ciò che si legge in questo testo è frutto delle sue esposizioni in aula e dal materiale che gentilmente ci è stato messo a disposizione.

Buono Studio!

Indice

Prefazione	i
Indice	ii
Elenco delle figure	viii
Elenco delle tabelle	xii
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	6
1.3 Effetti delle lavorazioni a freddo	6
1.3.1 Effetti della velocità di deformazione	6
1.4 Limiti di formabilità delle lamiere	7
1.4.1 Come mai le lamiere?	8
1.5 Materiali per lamiere	8
1.5.1 Acciai	9
1.5.1.1 Acciai a basso tenore di carbonio	9
1.5.1.2 Acciai effervescenti	10
1.5.1.3 Acciai calmati	10
1.5.1.4 Acciai interstitial-free	10
1.5.1.5 Acciai ad alta resistenza	10
1.5.1.6 Acciai Dual-phase	10
1.5.1.7 Acciai HSLA	11
1.5.1.8 Acciai inossidabili	11
1.5.2 Metalli non ferrosi	11
1.5.2.1 Rame e ottoni	11
1.5.2.2 Alluminio	11
2 Lavorazioni su lamiera	12
2.1 Taglio di lamiera	12
2.1.1 Valutazione delle forze sul taglio	15
2.1.2 Aspetti migliorativi	16
2.1.3 Macchinari e tecniche di lavorazione	17
2.2 Piegatura delle lamiere	18

2.2.1	Stato delle tensioni residue	21
2.2.2	Valutazione della forza di piegatura	23
2.2.3	Macchinari e tecniche di lavorazione	24
2.3	Stretch Forming	27
2.3.1	Deformabilità nello stretch forming	27
2.4	Imbutitura	29
2.4.1	Imbutitura senza premi-lamiera	29
2.4.2	Imbutitura con premi-lamiera	29
2.4.3	Valutazione delle forze applicate	31
2.4.4	Limite di imbutibilità	31
2.5	Stiro-imbutitura	32
2.5.1	Tailored Blanks	33
2.6	Formatura su pressa	35
2.6.1	Formatura con stampo in gomma	35
2.6.2	Idroformatura	35
2.6.3	Flangiatura, Aggraffatura, Formatura di colli	35
2.6.4	Formatura su pressa per tubi espansione idraulica	37
2.7	Lavorazioni a caldo	38
2.7.1	Formatura superplastica	38
2.8	Potenzialità delle lavorazioni a freddo	39
II	Sitenizzazione	42
3	Sinterizzazione	43
3.1	La lavorazione	43
3.1.1	Produzione delle polveri	44
3.1.1.1	Caratterizzazione delle polveri	45
3.1.2	Preparazione delle polveri	46
3.1.2.1	Miscelazione	47
3.1.3	La compattazione	47
3.1.3.1	Come compattare?	47
3.1.3.2	Stampaggio ad iniezione	49
3.1.4	Sinterizzazione	50
3.1.5	Finiture e trattamenti termici	51
3.1.5.1	Ricompattezzaione e risinterizzazione	51
3.1.5.2	La porosità fa comodo:	52
3.1.6	Compattazione a caldo	52
3.1.6.1	HIP: Hot Idrostatic Pressing	52
3.2	Prodotti sinterizzati	52
3.2.1	Potenzialità della sinterizzazione	54
3.2.2	Elettroformatura	55
III	Asportazione di truciolo	56
4	Lavorazioni per asportazione di truciolo	57
4.1	Introduzione	57
4.2	Taglio ortogonale ideale	58
4.2.1	Fattore di attrito	60
4.2.2	Valutazione delle forze	60
4.3	Taglio ortogonale realistico	63
4.3.1	Truciolo continuo	63

4.3.1.1	Truciolo continuo ondulato	64
4.3.1.2	Truciolo continuo a dente di sega	65
4.3.2	Truciolo discontinuo	65
4.3.3	La rottura del truciolo	65
4.4	Taglio obliquo	65
4.4.1	Tornitura	66
4.4.2	Calcolo della forza ed energia	66
4.4.3	Temperature	69
4.4.4	Fluidi da taglio	70
4.4.5	L'usura degli utensili	71
4.4.5.1	Usura della faccia	71
4.4.5.2	Previsione della durata dell'utensile	71
4.4.6	Qualità della superficie prodotta	74
4.4.6.1	Rugosità superficiale	74
4.4.7	Lavorabilità	75
4.4.7.1	Acciai al carbonio	75
4.4.7.2	Acciai automatici	75
4.4.7.3	Acciai legati	75
4.4.7.4	Acciai inossidabili	76
4.4.7.5	Ghise	76
4.4.7.6	Zinco e Magnesio	76
4.4.7.7	Alluminio	76
4.4.7.8	Rame	76
4.4.7.9	Nichel e superleghe	76
4.4.7.10	Titanio	76
4.4.8	Materiali per utensili	76
4.4.8.1	Acciai Ipereutetoidici	77
4.4.8.2	Acciai HSS	77
4.4.8.3	Acciai per colata	77
4.4.8.4	Carburi cementati	77
4.4.8.5	Ceramici	77
4.4.8.6	CBN	77
4.4.8.7	Diamante policristallino	78
4.4.9	Morfologia degli utensili	78
4.4.10	Portautensili e elementi di serraggio	78
4.4.11	Lavorazioni	78
5	Tornitura	81
5.1	Tornitura cilindrica	81
5.2	Altre tipologie di torni	83
6	Lavorazioni al trapano	84
6.1	Tipologie di trapani	86
7	Fresatura	88
7.1	Fresatura periferica	88
7.2	Fresatura verticale	88
7.2.1	Fresa a codolo	89
8	Altre Lavorazioni	91
8.1	Taglio con sega	91
8.2	Broccatura e taglio di filetti	91
8.2.1	La broccatura	91

8.2.2 Filettature	91
8.3 Aspetti conclusivi	91
8.4 Produzione di ingranaggi	92
9 Variabili di processo per lavorazioni in asportazione di truciolo	96
9.1 Durata lavorazione e potenza macchina	97
9.1.1 Esempio applicativo	97
10 Macchine Utensili	102
10.0.1 Esempio di controllo numerico	103
10.1 Ottimizzazione delle lavorazione per asportazioni di truciolo	103
11 Abrasione	106
11.1 Rettifica	106
11.1.1 Fluidi da rettifica	109
11.1.2 Lavorazioni di rettifica	109
11.1.2.1 Obiettivi della rettifica	110
11.1.2.2 Esempio	110
11.1.3 Nastri e carte vetrate	110
11.1.4 Levigatura	110
11.2 Abrasione non legata	110
11.2.1 Lappatura	110
11.2.2 Burattatura	111
11.2.3 Sabbiatura	111
11.3 Considerazioni finali	111
11.3.1 Aspetti progettuali	113
IV Lavorazioni non convenzionali	114
12 Lavorazioni non convenzionali	115
12.1 Lavorazioni chimiche	116
12.2 Lavorazioni elettrochimiche	116
12.2.1 Elettroerosione	118
12.2.2 Elettroerosione a tuffo	118
12.2.3 Elettroerosione a filo	118
12.3 Lavorazioni con fasci alto contenuto energetico	119
12.3.1 A fascio elettronico	119
12.3.2 Taglio Laser	120
12.3.3 Taglio al plasma	121
12.3.4 Taglio al cannello ossiacetilenico	121
12.4 Taglio ad acqua	121
V Tecniche di giunzione	122
13 Tecniche di giunzione	123
13.1 Classificazione delle tecniche	123
14 Giunzioni meccaniche	125
14.1 Rivettatura	125
14.1.1 Grafettatura	125
14.1.2 Aggraffatura	125
14.2 Giunzione a deformazione plastica	127

14.2.1 Sanp-fit	127
14.2.2 Ribattitura	127
15 Saldature allo stato solido	129
15.0.1 Saldature a freddo	130
15.0.2 Saldature per diffusione	130
15.0.3 Saldature a caldo	130
15.0.4 Saldatura a frizione	133
15.0.4.1 Friction Stir Welding	133
16 Saldature a fusione	135
16.1 Caratteristiche del giunto	137
16.1.1 Difetti e qualità della saldatura a fusione	137
16.1.2 Intensità di energia	140
16.2 La saldabilità	140
16.3 Saldatura a resistenza	141
16.3.1 Saldatura su rilievo	141
16.3.2 Saldatura a scintillio	144
16.4 Saldature ad arco	144
16.4.1 Saldatura ad arco con elettrodo permanente	145
16.4.2 Saldatura ad arco al plasma	146
16.4.3 Saldatura ad arco con elettrodo consumabile	147
16.4.4 Saldatura ad arco con elettrodo rivestito	147
16.4.5 Saldatura ad arco con fondente intubato	148
16.4.6 Saldatura ad arco sommerso	148
16.4.7 Saldatura ad arco con elettroscoria	148
16.4.8 Saldatura ad arco a perno	148
16.5 Automazione delle saldatura	148
16.6 Saldature chimiche	151
16.6.1 Saldatura con cannello ossiacetilenico	151
16.6.2 Saldatura alla termite	152
16.7 Saldature con fasci ad alto contenuto energetico	152
16.7.1 Electron Welding Beam (EWB)	152
16.7.2 Laser Beam Welding (LBW)	152
17 Brasatura	153
17.0.1 Brasatura ad alta temperatura	154
17.0.2 Brasatura a bassa temperatura	154
18 Giunzioni Adesive	156
18.0.1 Adesivi strutturali	156
18.0.2 Impiego degli adesivi	156
19 Potenzialità di processo e aspetti progettuali	159
19.0.1 Considerazioni sulla tipologia di sollecitazione delle giunzioni	159
19.0.2 Potenzialità del giunto	161
VI Tecniche di produzione additive	164
20 Tecniche di produzione additive	165
20.1 Fasi comuni dei processi additivi	165
20.2 Classificazione	167
20.2.1 Materiali liquidi	168

20.2.2 Materiali viscosi	168
20.2.3 Polveri	168
20.2.4 Materiali Solidi	170
20.3 Strategie di solidificazione	170
20.4 Strutture di supporto	171
20.5 Strategie per la costruzione dei layer	172
20.5.1 Singolo canale	173
20.5.2 A Vettore	174
20.5.3 Matrice bidimensionale	174
A Esempio applicativo sulle macchine utensili	176
B Acronimi	177

Elenco delle figure

1.1	Prove di trazione	3
1.2	Esagonale compatto	5
1.3	Reticoli cubici	5
1.4	Andamenti tipici di un acciaio dopo ricottura	7
1.5	Motivazioni delle lavorazioni a caldo	9
2.1	Possibili lavorazioni su lamiera	13
2.2	Operazioni di taglio su lamiere e affini	13
2.3	Processo di generazione di fratture controllate su lamiera durante taglio	14
2.4	Valutazione delle forze applicate per un taglio di lamiera e miglioramento delle forze applicate agli utensili	15
2.5	Tipologie di sistemi punzone-matrice inclinati	16
2.6	Esempi di traciature fini in diversi metodi	17
2.7	Confronto tra traciatura semplice e traciatura fine	17
2.9	Esempi di Steel-rule e fustella	18
2.8	Processi di traciatura per grandi e piccoli lotti	19
2.10	Parametrizzazione della piega sulle lamiere	20
2.11	Generazione di fratture durante la piegatura	22
2.12	Stato delle tensioni residue	22
2.13	Parametri per valutare lo springback	23
2.14	Soluzioni migliorative allo springback	23
2.15	Esempio di pressa piegatrice	24
2.16	Varietà di utensili utilizzabili per la piegatura delle lamiere	24
2.17	Alcune sezioni di utensili per la piegatura	24
2.18	Ulteriori tecniche di piegatura	25
2.19	Ottenimento di profili di forme decisamente variegata, su macchine automatiche	26
2.20	Tecniche di piegatura dei tubi	26
2.21	Possibilità di Stretch forming per l'industria	27
2.22	Esempio di test tecnologico per lo stretch forming	28
2.23	Griglia di rilevazione di deformazioni localizzate	28
2.24	Schema di realizzazione dell'imbutitura	29
2.25	Grafico coi limiti di imbutitura in funzione di un parametro geometrico	30
2.26	Sequenza degli eventi durante la corsa del punzone	30
2.27	Casi di imbutiti con diverse pressioni del premi-lamiera	30
2.28	Parametri caratteristici dell'imbutitura	33
2.29	Processi per imbutire oltre il limite Limit Drawing Ratio (LDR)	34
2.30	Esempio di imbutitura su punzone rettangolare	34
2.31	Limiti indicativi per la stiro-imbutitura	35
2.32	Esempi di formatura su pressa in diverse applicazioni	36
2.33	Esempi di processi di idroformatura	36
2.34	Pressatura dei tubi per dare forme particolari come i tubi a soffietto	37
2.35	Realizzazione di tubi per formatura, utilizzata per la realizzazione dei sistemi di scarico automobilistici	38

3.1	Processi di produzione in sinterizzazione	44
3.2	Principali modalità di atomizzazione e realizzazione delle fibre	46
3.3	Parametri da considerare durante la compattazione della polvere e compattazione a freddo	48
3.4	Esempio di pressatura a freddo di un oggetto particolarmente complicato	49
3.5	Pressatura idrostatica a sacco bagnato e asciutta	50
3.6	Esempio di Injection Molding	50
3.7	Caratteristiche meccaniche raggiunte dal prodotto in verde durante la sinterizzazione dopo diverso tempo e sequenza del processo	51
3.8	Esempio di processo di elettroformatura	55
4.1	Taglio Ortogonale	59
4.2	Scomposizione delle forze per il taglio ortogonale	61
4.3	Andamenti delle forze per il taglio ortogonale	62
4.4	Tipologia di forze prementi sulla faccia dell'utensile	63
4.5	Taglio ortogonale reale	64
4.6	Esempi di rompi-truciolo	66
4.8	Esempio di utensile per tornitura	66
4.7	Il taglio obliquio	67
4.9	Analisi termica dell'asportazione di truciolo	69
4.10	Temperature durante le lavorazioni ad asportazione	69
4.13	Caratterizzazione della craterizzazione sulla faccia dell'utensile	72
4.11	Titpiche striature dovute all'usura	73
4.12	Velocità di generazione delle striatura, indice dell'usura dell'utensile. Vale che $v_1 < v_2 < v_3$	73
4.14	Grafici della formula (4.27) per diversi materiali	73
4.15	Indicazioni di velocità di taglio e avanzamento in funzione della durezza del materiale lavorato e di diversi utensili	75
4.16	Caratteristiche meccaniche utili alla lavorabilità per la lavorabilità in asportazione	76
4.17	Range di caratteristiche dei principali materiali per utensili	78
4.18	Suddivisione delle principali lavorazioni in asportazione di truciolo	79
4.19	Alcuni esempi di utensili di forma	80
5.1	Schematizzazione degli angoli per un'utensile da tornitura	81
5.2	Specifiche di un tornio classico	81
5.3	Ulteriori lavorazioni ottenibili tramite tornitura	82
6.1	Alcune punte da trapano per diverse forature	84
6.2	Varie tipologie di punte da trapano	85
6.3	Velocità consigliate di trapanatura	86
6.4	Alcuni esempi di trapani e dettaglio punta alesatrice	87
7.1	Esempio di fresatrice orizzontale	88
7.2	Fresatura in opposizione e concordanza	89
7.3	Esempio di fresa verticale	89
7.4	Schematizzazione della fresatura a codolo	90
7.5	Esempio di frese a testa sferica	90
8.1	Breve descrizione delle seghie industriali	92
8.2	Broccatura	93
8.3	Utensili per filettature	93
8.4	Riepilogo lavorazioni per asportazione di truciolo	94
8.5	Indicazioni sulla produttività delle specifiche lavorazioni per asportazione di truciolo	94
8.6	Alcuni utensili per la produzione di ingranaggi	95
9.1	Relazione tra durezza del materiale lavorato, velocità della lavorazione e avanzamento dell'utensile.	98

9.2 Prima velocità per materiali non ferrosi	99
9.3 Parametri modificatori per lavorazioni diverse da quelle di riferimento (tornitura in sgrossatura)	100
9.4 Specifiche durezza dei materiali	101
10.1 Esempi di programmazione per macchine CNC	102
10.2 Esempio di Macchina CNC	103
10.3 Rappresentazione della funzione (10.8)	105
11.1 Principali lavorazioni abrasive	107
11.2 Casistiche in cui si può trovare la particella tagliente	107
11.3 Tabella delle energie specifiche di lavorazione per diversi materiali	108
11.4 Descrizione della sigla per le mole	109
11.5 Esempi di rettifica	109
11.6 Considerazioni sulla levigatura	111
11.7 Lavorazioni abrasive non legate	111
12.1 Classificazione lavorazioni non convenzionali	115
12.2 Modalità di attacco chimico	116
12.3 Risultati ottenibili con le lavorazioni chimiche	117
12.4 Schema generale delle lavorazioni elettrochimiche	117
12.5 Possibilità dell'elettroerosione	119
12.6 Schema funzionamento tubo catodico	119
12.7 Esempi di taglio laser	120
12.8 Altre lavorazioni non convenzionali	121
13.1 Fissaggi	124
14.2 Rivettatura cieca	125
14.3 Considerazione sulla corretta rivettatura	126
14.4 Fissaggi meccanici di graffettatura, aggraffatura e snap-fit	126
14.1 Tipologie di rivetti	127
14.5 Alcuni esempi di fissaggio per deformazione plastica	128
14.6 Processo di ribattitura	128
14.7 Ulteriori metodi di fissaggio meccanico utilizzati	128
15.1 Saldature allo stato solido col dettaglio delle lavorazioni a freddo	129
15.2 Principali tecniche di saldatura a freddo	131
15.3 Realizzazione per saldatura a diffusione di profili utilizzati in aeronautica	132
15.4 Principali modalità di saldature a caldo	132
15.5 Saldatura allo stato solido per frizione	133
15.6 Esempio di Friction stir welding	134
16.1 Possibilità delle saldature	135
16.2 Andamento della temperatura nella prossimità del cordone di saldatura	136
16.3 Particolare sulla Zona Termicamente Alterata (ZTA) in termini di caratteristiche meccaniche e temperature trasmesse	136
16.4 Tipologie di grani in funzione della velocità di movimento della saldatura	137
16.5 Intervalli di durezza in prossimità del cordone di saldatura	138
16.6 Cordoni di saldatura a confronto: (a) ben eseguito, (b) mancanza di fusione e penetrazione detto underfill, (c) Saldatura eccessiva detta overfill	138
16.7 Errori di saldatura che possono compromettere le performance della giunzione	139
16.8 Tensione indotta dalla dilatazione termina nella saldatura e conseguente ritrazione del materiale	140
16.9 Tipologie principali di saldature a resistenze: (a) saldatura a spot, (b) saldatura a rilievo, (c) saldatura a rulli, (d) saldatura a punzone	142

16.10 Processo di saldatura a resistenza	142
16.11 Esempi di saldature a resistenza	143
16.12 Saldature Plasma Arc Welding (PAW) e poi un confronto tra le temperature raggiunte dalle tecniche di saldatura	146
16.13 Schema di funzionamento della saldatura Gas Metal Arc Welding (GMAW)	147
16.14 Tecniche di saldature ad arco	149
16.15 Esempi di preparazione dei metalli base da saldare tramite cianfrinature	150
16.16 Dimostrazione della sequenza di passate per saldature plurime	150
16.17 Esempio di cannello ossiacetilenico	151
16.18 Tipologie di fiamme	151
17.1 Resistenza meccanica e di taglio della brasatura ad argento	153
17.2 Indice di bagnabilità	153
17.3 Esempi di brasatura e saldobrasatura	154
18.1 Diagrammi di resistenza meccanica di alcuni collanti, la descrizione dei collanti è riportato alla figura successiva 18.2	157
18.2 Descrizione dei collanti dei grafici precedenti	157
19.1 Modelli di sollecitazione basilari in cui: (a) pura tensione, (b) puro taglio, (c) taglio non bilanciato e conseguente deformazione, (d) clivaggio, (e) pelatura	161
19.2 Sforzo di pelatura imposto ad una colla fragile (a), colla duttile(b)	161
19.3 Preparazione dei giunti per saldature ad arco e a gas: (a) quadrata, (b) singola V, (c) doppia V, (d) ad angolo, (e) saldatura con piega	162
19.4 Giunzioni saldate, brasate, adesive disegnate per le migliori performance: (a) sovrapposizione semplice, (b) sovrapposizione ad offset, (c) sovrapposizione conica, (d) Sovrapposizione rinforzata, (e) sovrapposizione per incastro, (f) sovrapposizione inclinata, (g) incastro, (h) angolo ad inserti, (i) saldatura	162
20.1 Operazioni comuni ai processi additivi	165
20.2 Rappresentazione dei parametri dell'equazione (20.1)	166
20.3 Particolare sulla sinterizzazione allo stato solido	169
20.4 Particolare sul funzionamento della fusione localizzata	170
20.5 Minimi locali in un modello 3D sull'asse Z	171
20.6 Realizzazione di supporti per i minimi	172
20.7 Confronto con l'angolo θ e l'effetto del peso del materiale su se stesso	173
20.8 Esecuzione di un modello tramite singolo canale	174
20.9 Modalità di realizzazione a vettore in Y	175
20.10 Realizzazione di un modello tramite stampaggio a matrice	175

Elenco delle tavole

1.1	Vantaggi e svantaggi delle lavorazioni a freddo	6
2.1	Potenzialità delle lavorazioni a freddo, A indica capacità ottima, E la peggiore	40
2.2	Possibili forme ottenibili per deformazione a freddo	41
3.1	Principali materiali impiegati nei processi di sinterizzazione	53
3.2	Confronto tra le lavorazioni possibili in sinterizzazione: A indica valori migliori, E quelli peggiori	53
3.3	Forme geometriche ottenibili tramite sinterizzazione, in giallo le forme che non sono realizzabili tramite sinterizzazione	54
4.1	Confronto tra le morfologie degli utensili e i loro costo	79
11.1	Confronto delle lavorazioni abrasive a confronto con altre lavorazioni ad asportazione. 'A' indica un parametro ottimale, 'E' il peggiore	112
11.2	Forme lavorabili per abrasione	112
16.1	Nomenclature delle tecniche di saldatura ad arco.	145
17.1	Principali leghe usate come apporto per la brasatura	155
19.1	Confronto tra le varie tecniche di giunzione per fusione. (gas w = GTAW, shielded metal = elettrodo rivestito, flux-cored = fondente intubato)	160

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 note per aver una 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 vuole 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

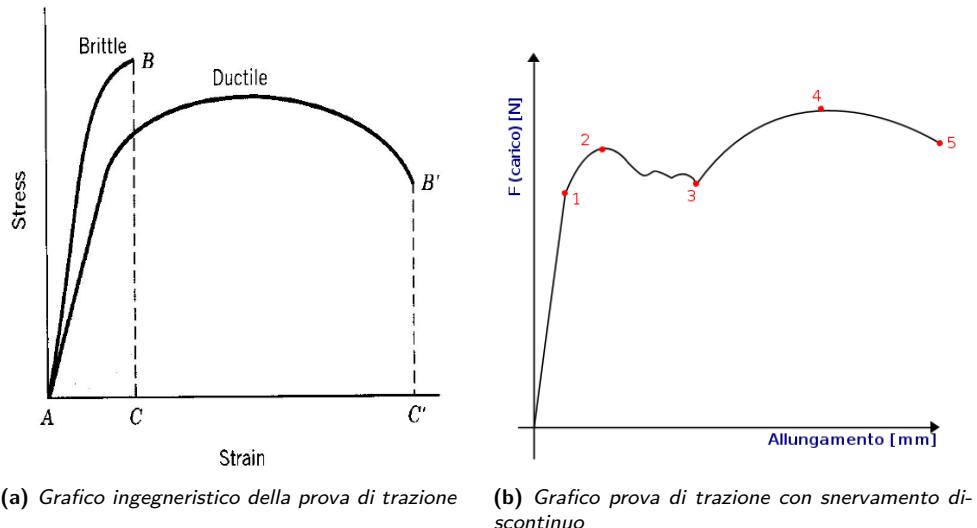
$$\sigma = K\epsilon^n \quad (1.1)$$

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 voglia particolarmente grande al fine di garantire un'alta resistenza allo snervamento. La strizione si manifesterà su una sezione "più debole" (impurità, vuoti, ecc...), da cui avrà luogo una deformazione della sezione stessa. Dunque sulla sezione si manifesterà 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. Portando **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:

Y 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:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad \underbrace{\epsilon_I + \epsilon_W + \epsilon_T = 0}_{\text{per lamiere}} \quad (1.3)$$

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 **compresenza di anisotropia planare e normale** da cui si può ottenere una misura

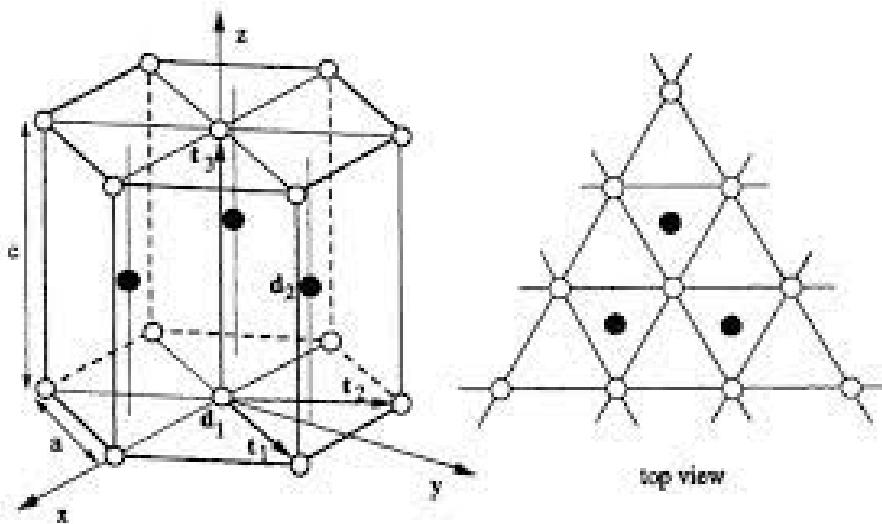
$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2 * r_{45}}{2} \quad (1.9)$$

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 è prossimo a 0:

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

**Figura 1.2:** Esagonale compatto

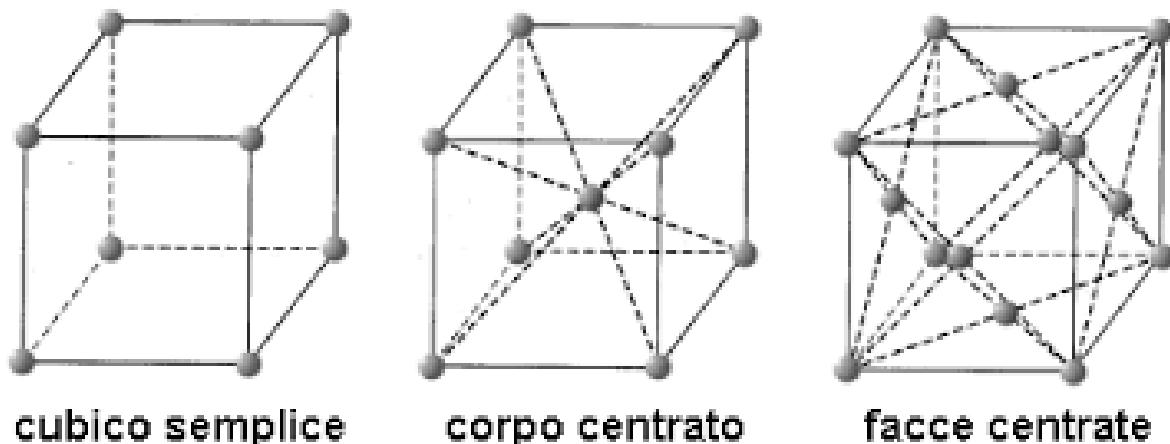
Nella maggior parte dei casi si vuole un rapporto r il più alto possibile. Così ché la deformazione della lamiera interessi la larghezza piuttosto dello spessore. Altrimenti potrebbero sorgere problemi sulla rigidità della lamiera anche senza eseguire alcuna lavorazione. Potremmo allora dire che:

- 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.

**Figura 1.3:** Reticoli cubici

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.

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.

Ricottura 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 incrudisce 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.

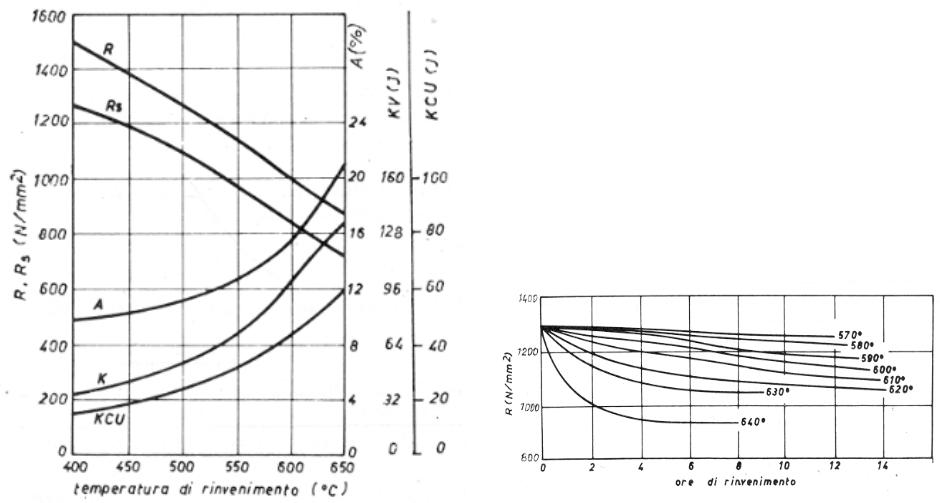
1.3.1 Effetti della velocità di deformazione

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:

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

Tabella 1.1: Vantaggi e svantaggi delle lavorazioni a freddo

Vantaggi	Svantaggi
Metodo economico per indurre 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



(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

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

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 all'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.

²Valori di deformazione tipici delle lavorazioni con materiali plasti

3. Generazione delle bande di Lüders
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 influisce 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 prodotto 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.
- 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
- Ottoni
- 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.

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



Figura 1.5: Motivazioni delle lavorazioni a caldo

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.

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 di materiale usato.

Si vuole approfondire anche gli aspetti legati alla tipologia degli acciai:

Acciai effervescente Questi acciai presentano delle bolle di ossigeno (o comunque ossidi) all'interno, da qui il nome effervescente, dovute alla presenza del gas durante la colata.

Acciai calmati Sono acciai che vengono calmati tramite un processo di deossidazione in colata. Il processo viene realizzato tramite inclusione di alluminio e manganese per legare l'ossigeno e portarlo in superficie tramite una schiuma separabile dal fuso.

Per gli acciai è significativa la formazione delle famose **bande di Lüders**. Possono eventualmente essere eliminate tramite un processo di skin-pass, ovvero un processo di laminazione a bassa deformazione che permette di eliminare lo snervamento discontinuo. Purtroppo non è permanente: l'invecchiamento del materiale porta con sé l'eliminazione della discontinuità ma allo stesso tempo incrudisce il materiale che diventa più duro che duttile. In genere, dopo il trattamento di skin-pass la lamiera trattata deve essere utilizzata in tempi molto brevi. Altrimenti, sarà necessaria una laminazione più pesante che peggiora la duttilità.

1.5.1.1 Acciai a basso tenore di carbonio

Sono in assoluto i più usati tra i prodotti lamierati. Il tenore di carbonio si attesta attorno il 0.15%.

1.5.1.2 Acciai effervescenti

L'elevata duttilità e il costo relativamente basso hanno reso gli acciai effervescenti di qualità commerciale e adatti all'imbutitura. Solo per applicazioni non critiche. La superficie povera di carbonio è particolarmente adatta per processi di smaltatura. La dimensione del grano è controllata con pesanti passate di laminazione a freddo fino al 50÷70% seguita da ricottura. Tuttavia la presenza di carbonio e azoto produce un allungamento del punto di snervamento e bande di Lüders. Come visto precedenza può essere risolto parzialmente in precedenza.

1.5.1.3 Acciai calmati

L'acciaio di qualità per trafilatura ha proprietà uniformi ed elevati valori di n . sensibilità all'incrudimento r , parametro usato per definire l'anisotropia che viene scelto quando si devono realizzare pesanti imbutiture o stretching o quando l'immagazzinaggio è inevitabile. Anche l'acciaio calmo contiene carbonio e azoto, ma quest'ultimo viene combinato con l'alluminio in un composto e solo il carbonio rimane in una forma che ne permetta la concentrazione presso le dislocazioni a formare le atmosfere di Cottrell. Anche le lamiere ricotte mostrano l'allungamento del punto di snervamento, ma lo skin-pass elimina definitivamente l'allungamento in corrispondenza dello snervamento. Il carbonio non si diffonde ai siti delle dislocazioni a meno che l'acciaio non sia riscaldato ai 120°C.

1.5.1.4 Acciai interstitial-free

Il contenuto di carbonio è ridotto a livelli molto bassi e l'azoto è legato in piccole quantità di altri elementi. Non esiste un allungamento in corrispondenza dello snervamento, la tensione di snervamento è bassa, perciò è piccolo il ritorno elastico, e il valore di n è elevato.

Nel settore automobilistico si cerca di ridurre il peso. La carrozzeria più sottile deve essere bilanciata da una resistenza maggiore, per cui la ricerca di un peso ridotto ha determinato lo sviluppo di materiali più resistenti. Tutti i meccanismi di rafforzamento sono utilizzati per questo scopo.

1.5.1.5 Acciai ad alta resistenza

Sono acciai che vengono già incruditi prima della lavorazione. Le tecniche di incrudimento possono essere:

- laminazione a freddo, può provocare delle piccole deformazioni per cui in genere succedono delle ricotture di distensione, per riottenere una duttilità maggiore con una resistenza ragionevole. Oppure una ricottura completa per controllare la dimensione del grano.
- precipitazione di soluzione solida, sono acciai che presentano in lega elementi come Mn, P, o Si che incrudiscono più rapidamente.
- incrudimento tramite ricottura, questi acciai sono laminati per eliminare le bande di Lüders. Dopo invecchiano rapidamente durante la verniciatura in forno. Determina un incremento della resistenza di circa 30÷40MPa grazie alla formazione di aree dense di C. L'incremento di resistenza nell'invecchiamento può essere massimizzato aumentando il contenuto di N.

1.5.1.6 Acciai Dual-phase

Presentano tenore di C più alto, necessario per il trattamento di bonifica, è utile negli acciai per molle ma ridurrebbe troppo la duttilità negli acciai per imbutitura. Tuttavia acciai a basso tenore di carbonio con 1,4% di Mn possono essere ricotti per ottenere una struttura costituita da ferrite rinforzata da martensite dispersa. Questi acciai Dual-Phase hanno una tensione di snervamento bassa che è un vantaggio quando il ritorno elastico può essere contestato, nello stesso tempo, il rapido incrudimento durante le lavorazioni impedisce una resistenza elevata nel prodotto finale.

1.5.1.7 Acciai HSLA

L'uso di questi acciai aumenta progressivamente nelle automobili e in altre strutture. Una caratteristica negativa importante è il valore elevato del rapporto tra tensione di snervamento e modulo elastico che determina uno springback elevato.

Inoltre è possibile che la laminazione permetta di zincare o stagnare le lamiere. Zincatura permette maggiorata resistenza alla corrosione, ma può essere problematica in funzione del tenore di carbonio, e altri elementi in lega. Garantisce maggiorata resistenza alla corrosione atmosferica anche in caso di graffi e abrasioni. La stagnatura permette di migliorare la resistenza alla corrosione ma è sensibile a ripetuti graffi, per cui può essere problematica.

La laminazione permetterebbe anche altri tipi di rivestimenti, come verniciature in foglio ecc...

1.5.1.8 Acciai inossidabili

Presentano alte capacità di incrudimento, dunque la loro formabilità è eccellente. I più utilizzati sono sicuramente gli inox austenitici: garantiscono la migliore resistenza alla corrosione con ottima formabilità per via della matrice austenitica. Il campo di applicazione più adatto è sicuramente legato all'alimentare: posate, pentole ecc... Siccome presentano alte deformabilità, si realizzano anche lavelli, scambiatori di calore e diverse apparecchiature per processi chimici.

Gli acciai inossidabili martensitici e ferritici si possono impiegare nei casi in cui non sono necessarie resistenza alla corrosione così spinte e formabilità limitata. Sicuramente hanno un costo inferiore.

1.5.2 Metalli non ferrosi

Altri materiali, che non sono leghe a base di ferro, vengono abitualmente impiegati nella produzione di oggetti laminati.

1.5.2.1 Rame e ottoni

Il rame, in diverse leghe tra cui gli ottoni, sono tra i materiali più deformabili in assoluto. Vengono abitualmente utilizzati.

1.5.2.2 Alluminio

Le leghe di alluminio, possono essere utilizzate per deformazione a freddo, alcune possono presentare degli snervamenti seghettati (Serie 5000) che porta a dei segni superficiali contestabili. Leghe indurate per precipitazione non presentano questo problema (Serie 6000). Possono essere migliorate tramite Trattamento Termico (TT) che migliora significativamente il rafforzamento. Ulteriore processo di rafforzamento è dato dal processo di invecchiamento T4 che può essere imposto alle leghe di alluminio.

Per molte applicazioni la rugosità superficiale può essere critica. IN alcuni casi si preferisce una rugosità maggiore, ovviamente controllata, per favorire l'adesione della vernice. Resta il fatto che asperità troppo pronunciate si vedano anche a processo completato. In più, una superficie poco porosa non tratterebbe il lubrificante nel contatto lamiera stampo. Per cui si potrebbero avere delle situazioni di saldatura a freddo tra lamiera e stampo.

Tuttavia, la rugosità spinta non permetterebbe una buona distribuzione della pressione di stampaggio e non può essere controllato il flusso di metallo nello stampo. Un orientamento casuale delle caratteristiche superficiali è preferibile per migliorare l'aspetto ed è essenziale per assicurare un allungamento uguale in tutte le direzioni.

La rugosità tipica è di $R_a = 1 \div 1.5 \mu\text{m}$. La tecnica più diffusa per la realizzazione di tale finitura superficiale è la laminazione con rulli pallianti in modo casuale. Più recentemente, i rulli hanno una tessitura superficiale: crateri formati in modo predeterminato mediante raggi laser o scariche elettriche.

CAPITOLO 2

Lavorazioni su lamiera

La figura 2.1 presenta le possibili lavorazioni su lamiera. Si possono includere in queste lavorazioni anche fili, profilati e tubi.

In generale la sequenza delle lavorazioni per prodotti in lamiera è:

1. taglio,
2. deformazione plastica,
3. giunzione.

Ovviamente la sequenza non è ferrea, dipende dal ciclo produttivo necessario al prodotto. Sicuramente la maggior parte dei prodotti segue questa prima sequenza.

Dunque come prima lavorazione su lamiera si parlerà del taglio.

2.1 Taglio di lamiera

In figura 2.2a sono riportati alcuni esempi di operazioni di taglio su lamiere, nastri, fili ecc...

Il primo passo, indipendentemente dalle dimensioni del pezzo da produrre i primi passi sono quelli di tagliare il pezzo dalla lamiera o nastro che sia. Si ottiene un semilavorato di forma opportuna tramite **Tranciatura** o **Punzonatura**. Alla figura 2.2b in rosso è eseguita una punzonatura in cui l'area rimasta sulla lamiera è il prodotto. Mentre, in blu, una tranciatura in cui il prodotto è ciò che viene separato dalla lamiera. Di fatto la macchina utile per fare entrambe le lavorazioni.

Un processo simile alla punzonatura, con lo scopo di ottenere delle forme più complicate è la **roditura**. Un punzone di forma molto semplice, spesso cilindrica, tramite un movimento alternativo ad alta frequenza separa i due materiali.

Il processo di separazione di parti adiacenti di una lamiera mediante frattura controllata, in figura 2.3, non può essere descritto come una deformazione puramente plastica o come taglio. La lamiera è collocata tra i bordi dei 2 utensili da taglio, nel caso della tranciatura: punzone e matrice. Gli eventi che si verificano durante la corsa della pressa possono essere seguiti analizzando la registrazione della forza del punzone in funzione della corsa e dall'ispezione delle superfici di taglio.

Le fasi del taglio possono essere riassunte in tre fasi distinte:

I Fase Quando i bordi degli utensili penetrano nella lamiera, questa viene prima spinta nella matrice e la deformazione plastica provoca un arrotondamento del suo bordo. La prima fase del taglio perciò è una piegatura dei bordi della lamiera, visibili nei disegni 2.3, rounded edge visibile in particolare nel disegno 2.3a.

II Fase Quindi viene spinta nella matrice mediante deformazione plastica simile a un'estruzione, indicata da una zona brunita con striature parallele sulla superficie di taglio e caratterizzata da una forza in costante aumento, burnished zone indicata al disegno 2.3a.

III Fase Dopo una certa deformazione critica, si generano fratture ad un leggero angolo rispetto alla direzione di taglio, di solito cominciando dal bordo della matrice. Quando queste fratture si incontrano, la tranciatura è completa (fracture surface sempre indicata al disegno 2.3a). La forza di taglio scende anche se i bordi di taglio degli utensili sono entrati solo in parte nello spessore della lamiera. La nascita e propagazione delle cricche è la terza fase, che completa il taglio.

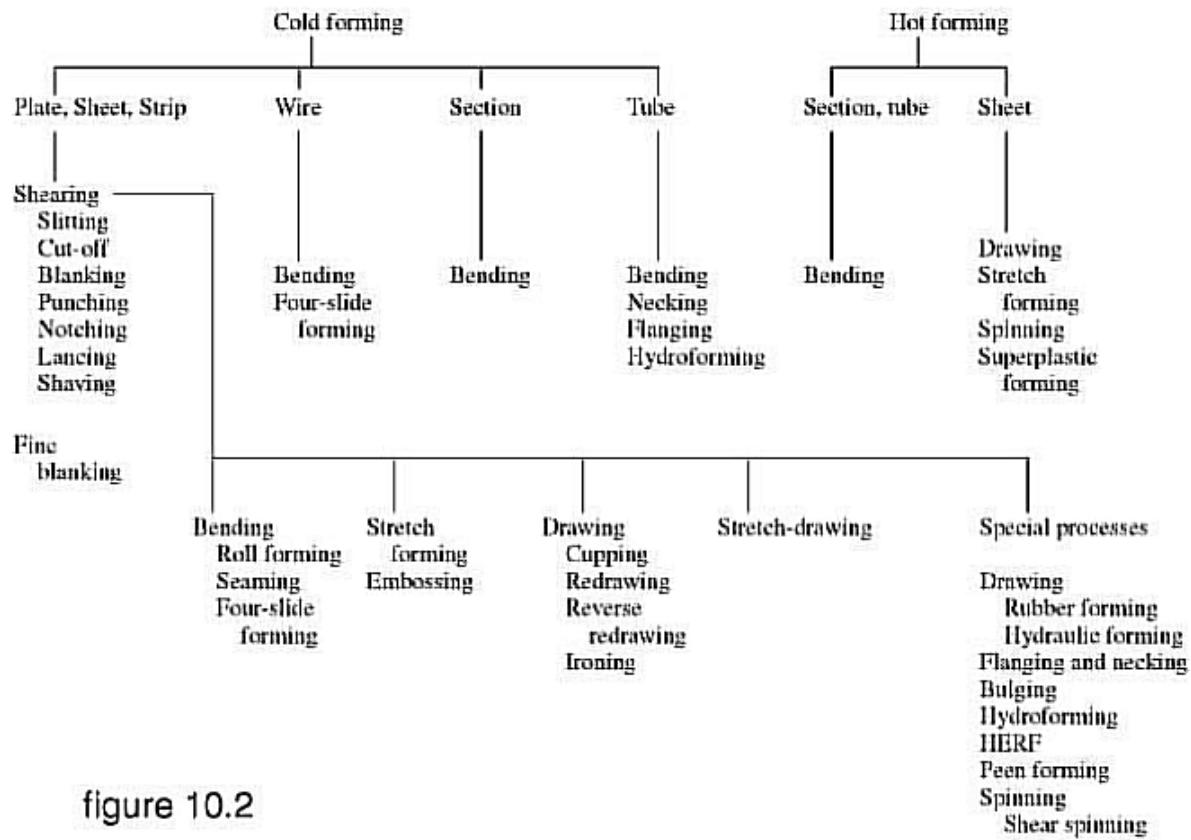


figure 10.2

Figura 2.1: Possibili lavorazioni su lamiera

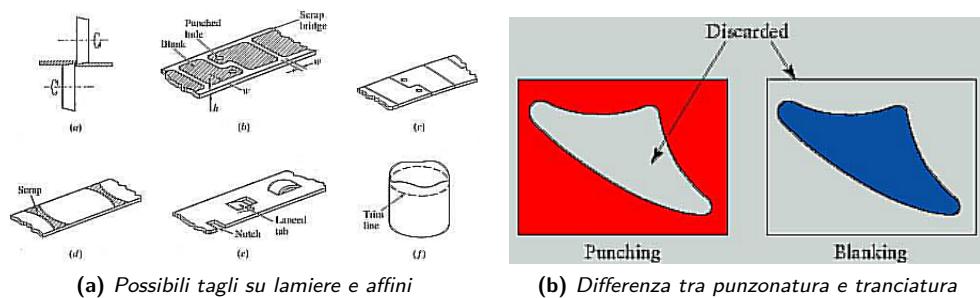


Figura 2.2: Operazioni di taglio su lamiere e affini

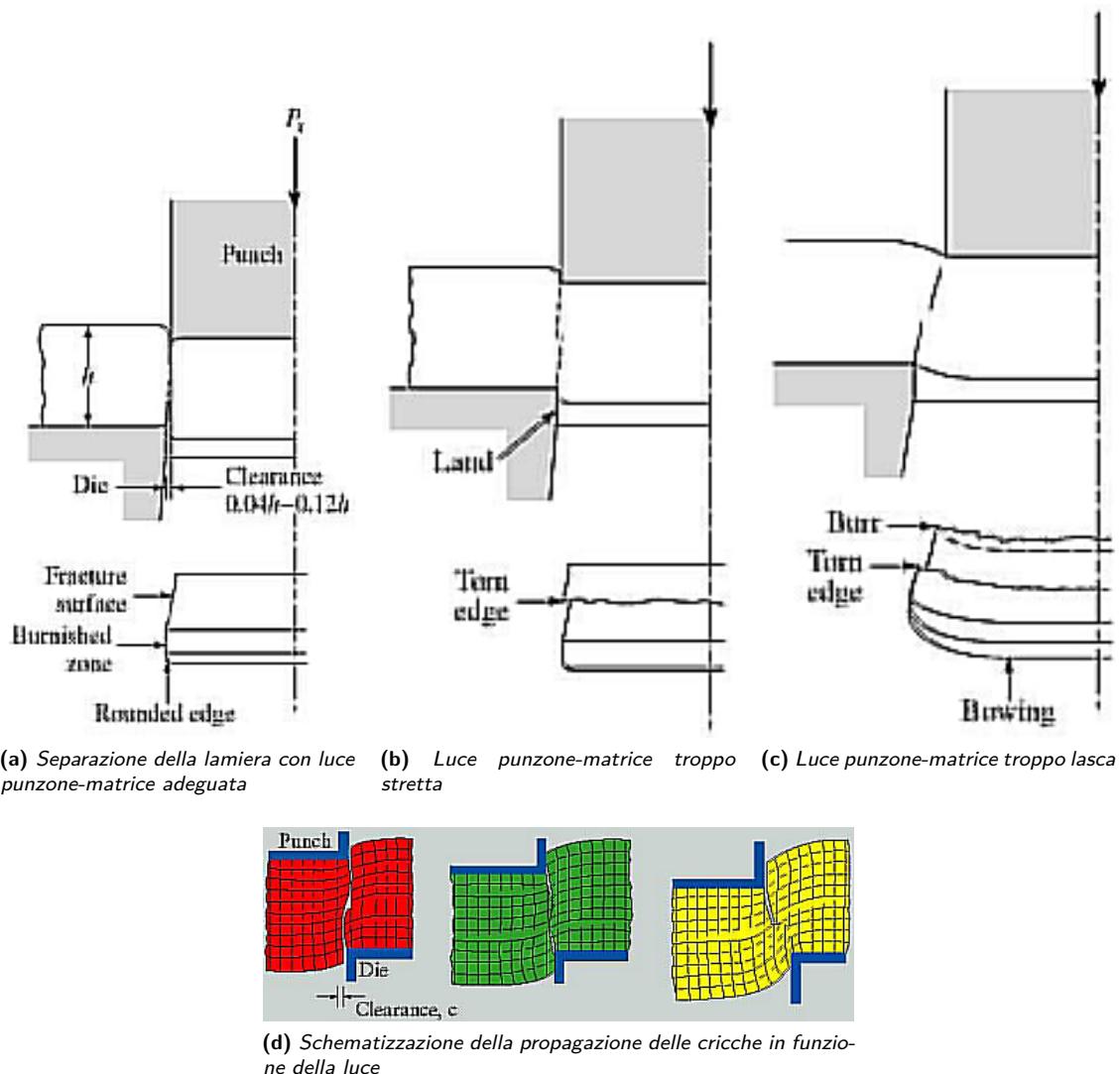


Figura 2.3: Processo di generazione di fratture controllate su lamiera durante taglio

La superficie di frattura non è perpendicolare alla superficie del foglio e presenta una certa rugosità. Tuttavia, la finitura è accettabile per molte applicazioni.

La parte tagliata resterebbe attaccata alla matrice e deve essere spinta dal punzone oltre la parete verticale. La qualità della superficie di taglio è fortemente influenzata dalla distanza tra i due bordi di taglio, chiamata **luce**. Con una luce molto piccola, le fratture che hanno origine dai bordi degli utensili non si incontrano e il taglio viene poi completato da un processo secondario di frattura, producendo un bordo frastagliato a circa metà dello spessore della lamiera (torn edge nella figura 2.3b). Una luce eccessiva consente una deformazione plastica estesa, la separazione è ritardata e si forma un bordo superiore di bava tagliente (burr al disegno 2.3c). Le figure a colori, 2.3d, mostrano che la curvatura del bordo della lamiera aumenta con la luce.

Nel corso della trascrizione di migliaia di parti, i bordi degli utensili si usurano, si arrotondano e si forma un bordo frastagliato e tagliente anche con una luce ottimale. Il bordo frastagliato della bava concentra gli sforzi; l'effetto nocivo è evidente nell'allungamento ridotto misurato nella prova di trazione. La bava provoca l'innescio della frattura durante la deformazione successiva o in servizio, quindi una corretta scelta della luce e una manutenzione regolare degli utensili sono aspetti vitali del processo. Una piccola luce conduce ad

una usura più rapida degli utensili, pertanto la massima economia si ottiene quando la luce viene scelta più grande possibile compatibilmente con l'applicazione prevista. Ricordo che all'aumentare della luce aumenta anche la curvatura della lamiera. In genere la luce è compresa tra il 4 e il 12% dello spessore della lamiera (i valori inferiori si usano con i materiali più duttili).

2.1.1 Valutazione delle forze sul taglio

Si può facilmente valutare la forza della pressa necessaria per la traciatura convenzionale. Poiché la deformazione è concentrata in una zona molto stretta con forte incrudimento, la forza massima può essere ottenuta da una tensione di taglio determinata sperimentalmente moltiplicata per la sezione trasversale da tagliare. La tensione di taglio diminuisce all'aumentare della luce, ma i valori medi possono essere trovati nei manuali o possono essere considerati come una frazione C_1 del UTS , tensione massima a rottura, cioè la massima tensione nella curva tensione-deformazione nominale. Così, la forza di taglio P_s è data dalla formula:

$$P_s = C_1(TS)hl = C_1K \left(\frac{n}{e}\right)^n hl \quad (2.1)$$

dove:

h è lo spessore della lamiera

l è la lunghezza del taglio

C_1 è 0.85 per i materiali duttili e quelli 0.65 i meno duttili

L' UTS della maggior parte dei materiali è noto. Se sono disponibili solo i valori K e n , l' UTS può essere approssimato sostituendo

$$UTS = K \left(\frac{n}{e}\right)^n \quad (2.2)$$

dove e è la base dei logaritmi naturali. Ricordando che la deformazione vale n quando comincia a manifestarsi la strizione. Quando i bordi di taglio sono paralleli, l è l'intera lunghezza del profilo di taglio.

Ciò può portare a forze molto elevate, che possono quindi essere ridotte inclinando tra loro i due bordi di taglio, come in una ghigliottina, pertanto si deve considerare solo la lunghezza istantanea di taglio, come al disegno 2.4a. Nella traciatura, il materiale di scarto può essere piegato e l'inclinazione è sullo stampo, come in figura 2.4b. Nella punzonatura, per lo stesso motivo l'inclinazione è sul punzone, in figura 2.4c. L'inclinazione è sempre simmetrica, in modo che la forza risultante sia verticale. In caso contrario la forza tenderebbe a spostare lateralmente la lamiera. Alcune Possibili soluzioni sono quelle rappresentate alla figura 2.5.

In termini energetici: l'energia di traciatura E_s che la pressa deve fornire è uguale all'area sotto la curva forza-spostamento. Un valore approssimativo può essere ottenuto dalla formula:

$$E_s = C_2 P_s h \quad (2.3)$$

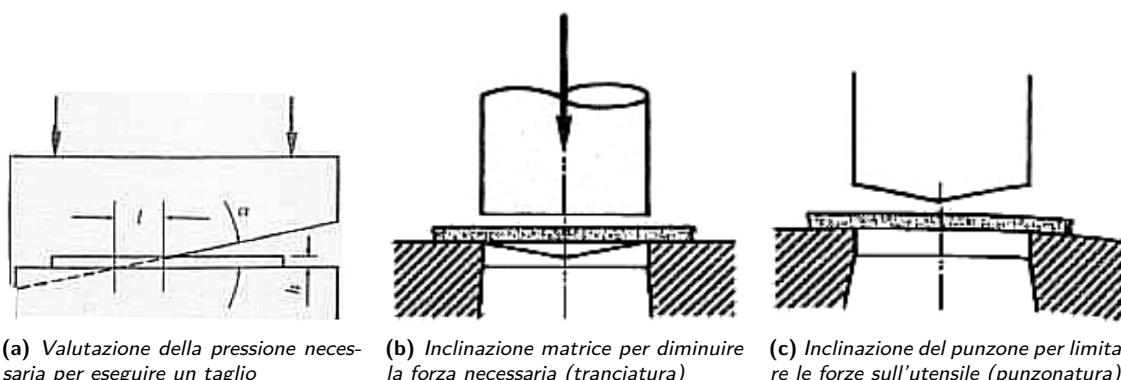


Figura 2.4: Valutazione delle forze applicate per un taglio di lamiera e miglioramento delle forze applicate agli utensili

dove $C_2 = 0.5$ per i materiali teneri e 0.35 per i materiali duri. Mentre P_s è quella dell'equazione (2.1).

2.1.2 Aspetti migliorativi

Esiste una grande richiesta per processi che producano bordi tagliati di qualità, perpendicolari alla superficie della lamiera e con una finitura superficiale sufficientemente liscia per consentire l'uso immediato delle parti, ad esempio come ingranaggi in macchine con carichi limitati e tolleranze strette. Sono possibili diversi approcci; nella maggior parte di essi, un contro-punzone collabora con il punzone principale e, come vantaggio aggiuntivo, elimina la curvatura della lamiera.

1. Abbiamo visto che la frattura può essere ritardata dall'imposizione di un'alta pressione idrostatica. Questo principio viene sfruttato nella tranciatura fine. Un premi-lamiera appositamente sagomato viene premuto sulla lamiera appena prima di iniziare il taglio, così la zona in cui avviene la deformazione viene mantenuta in compressione e l'intero spessore viene tagliato senza che partano le cricche. Tale tecnica è mostrata al disegno 2.6a.
2. Una pressione idrostatica elevata viene provocata anche tagliando con una luce negativa (interferenza) e la parte in effetti viene spinta (estrusa) attraverso la matrice, illustrato dal disegno 2.6b.
3. In qualche caso la lamiera viene bloccata tra due matrici. I punzoni penetrano in una direzione fino a quando non si generano le cricche, quindi il taglio viene completato nell'altra direzione. Illustrato al disegno 2.6c.
4. Una lamiera tranciata in modo convenzionale può subire una **rasatura** di finitura in un set di stampi con luce molto ridotta. In figura 2.6d.
5. La qualità del taglio migliora notevolmente nel taglio ad alta velocità quando le velocità di taglio superano la velocità di propagazione delle dislocazioni nel metallo. Ciò richiede velocità molto elevate, nell'ordine di 30m/s.

Il punzone e la matrice sono fatti con acciaio per utensili o, per i lotti più grandi, con WC sinterizzato. Il materiale di scarto (o, in punzonatura, la parte) si incastrerebbe sul punzone (o si infila nella matrice) e deve essere staccato con piastre di estrazione fisse, a molla o mosse da camme o con un cuscino di schiuma plastica (solitamente poliuretanica). La scelta del processo è determinata principalmente dalle caratteristiche del prodotto e dalla dimensione del lotto di produzione.

Fori di dimensioni e forme standard possono essere tagliati su presse punzonatrici standard con utensili intercambiabili.

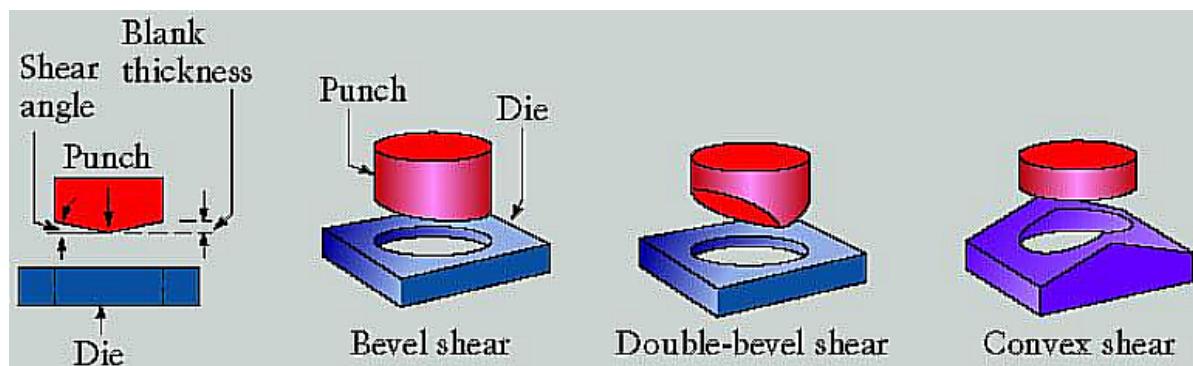
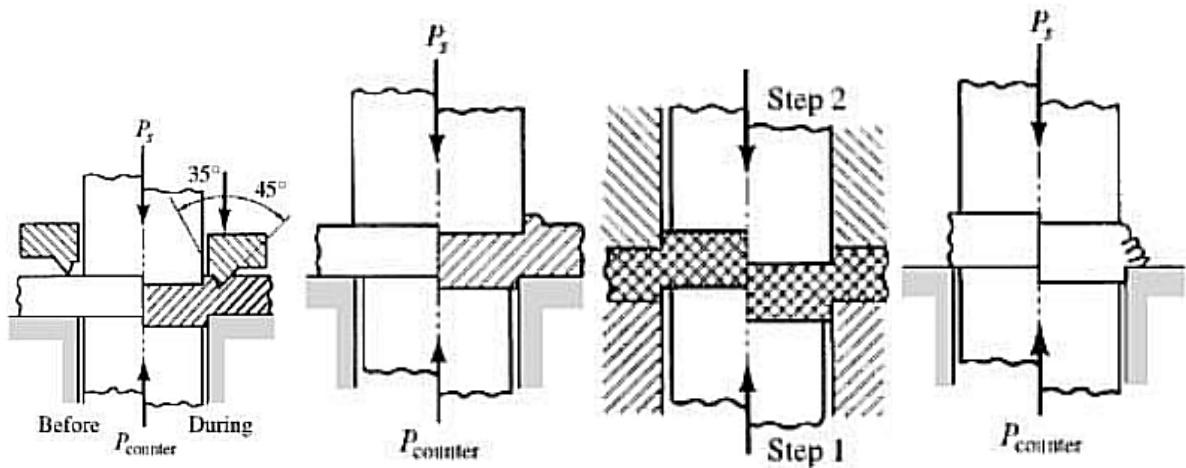


Figura 2.5: Tipologie di sistemi punzone-matrice inclinati



(a) Traciatura fine tramite premi-lamiera (b) Traciatura fine tramite punzone a luce negativa (c) Traciatura fine tramite punzone e contro-punzone (d) Traciatura fine tramite rapsodia satura

Figura 2.6: Esempi di traciature fini in diversi metodi

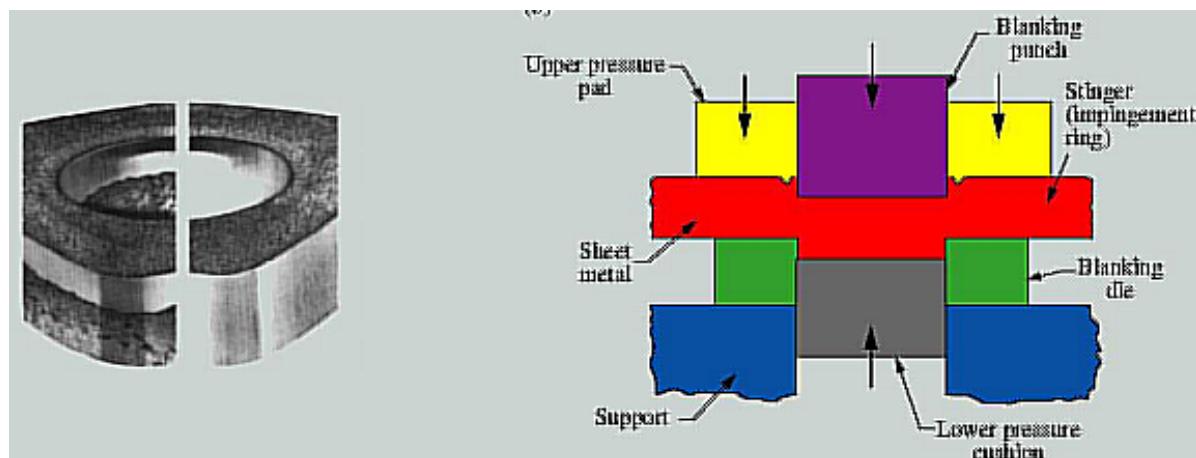


Figura 2.7: Confronto tra traciatura semplice e traciatura fine

2.1.3 Macchinari e tecniche di lavorazione

La sostituzione della matrice viene accelerata con apparati rotanti nelle macchine a torretta. Le punzonatrici Controllo Numerico Computerizzato (CNC), dotate di tavole x-y e di magazzini utensili, consentono un rapido e preciso posizionamento della lamiera e la selezione del punzone e della matrice, consentendo quindi la produzione a basso costo e flessibile di quantità piccole e medie. I fori più grandi possono essere fatti con il taglio ripetuto con lo stesso punzone (roditura). Geometrie complesse possono essere create in stampi composti in cui diversi bordi di taglio lavorano contemporaneamente.

Con gli stampi progressivi vengono eseguite in sequenza diverse operazioni di punzonatura e traciatura con elementi degli stampi fissati a piastre comuni, mentre la striscia avanza di incrementi esatti. Spesso, la traciatura e la punzonatura sono tra le numerose fasi di lavorazione eseguite in stampi progressivi che producono parti complesse. La produttività è elevata, limitata solo dalla velocità di alimentazione del materiale nella pressa e dalla frequenza dei colpi della pressa (alcune presse operano a diverse centinaia di colpi al minuto). Ne è un esempio la figura 2.8a.

Punzoni multipli vengono utilizzati quando devono essere prodotte molte parti o fori, come nella traciatura di cerchi per la produzione di lattine o di punzonatura di fori per lamiere forate. Le velocità di produzione

più alte sono ottenute quando la matrice e il punzone sono ricavati sulle superfici di rulli.

Per quantità minori o, ad esempio, poche centinaia di pezzi, il costo dello stampo può essere ridotto se è tollerabile una perdita di materiale maggiore. Nella tranciatura con cuscino in gomma, la matrice è semplicemente una piastra in acciaio tagliata a misura (steel-plate punch in figura 2.8b) e l'azione di taglio avviene premendo il foglio intorno a questo stampo con un cuscino in gomma. La parte sovrastante della lamiera è piegata e bloccata contro la piastra dal cuscino, e la rottura (tearing) si verifica intorno ai bordi della piastra.

Per piccoli lotti, una soluzione economica è la fustella in acciaio. In questo caso, lo "stampo" è costituito da strisce di acciaio inossidabile o in acciaio ad alto tenore di carbonio con bordo inclinato dette fustella (steel rule in figura 2.9), pressate in fessure in compensato (plywood) mediante una piastra in acciaio (steel backing).

Celle di punzonatura contengono una o due punzonatrici o centri di punzonatura e un qualche meccanismo di trasferimento. Il carico delle lamiere, il cambio utensile, il trasferimento di parti tra le macchine e lo scarico della parte sono coordinati mediante automazione flessibile.

Il processo di taglio può essere adattato per fili, barre, profili e tubi in preparazione per ulteriori processi. La qualità del taglio è migliorata fornendo supporto per il pezzo da tagliare e anche applicando tensione di compressione (pressione idrostatica) durante il taglio.

C'è stato un rapido sviluppo di metodi di taglio basati su tecniche di saldatura (raggio laser, fascio elettronico, torcia al plasma, arco elettrico o ossitaglio e taglio a getto d'acqua. Combinati con tavole x-y (e talvolta presse a torretta), tali centri di taglio controllati da computer diventano estremamente versatili e produttivi e non richiedono l'uso di stampi.

2.2 Piegatura delle lamiere

Molte lamiere vengono piegate. Caratteristica di questo processo è l'allungamento imposto sulla superficie esterna e la compressione sulla superficie interna. Per uno specifico spessore della lamiera T , le deformazioni di trazione e compressione aumentano al diminuire del raggio di formatura R , più precisamente al diminuire del rapporto R/T , dove T è lo spessore. Affinché il ritorno elastico sia trascurabile e la lamiera mantenga la forma anche tolto il carico, il rapporto R/T deve essere sufficientemente piccolo da portare gran parte della sezione della lamiera a deformarsi plasticamente. C'è, come nella piegatura elastica, solo una linea (**l'asse neutro**) che mantiene la sua lunghezza originale.

Quando si piega con raggi abbastanza grandi, l'asse neutro è al centro. Quando si piega con raggi piccoli, l'asse neutro si sposta verso la parte in compressione, la linea centrale si allunga e la costanza del volume viene preservata dall'assottigliamento della lamiera. L'aumento della lunghezza della linea centrale viene di solito preso in considerazione per le pieghe in cui $R < 2T$ assumendo che l'asse neutro sia posizionato ad un terzo dello spessore della lamiera. Quando la lamiera è relativamente stretta ($L/T < 8$, dove L è la larghezza di piega), c'è anche una contrazione in larghezza.

Il raggio minimo di piega (il più piccolo raggio di matrice consentito R o, più correttamente, il rapporto minimo tra raggio e spessore R/T) può essere definito secondo diversi criteri.



Figura 2.9: Esempi di Steel-rule e fustella

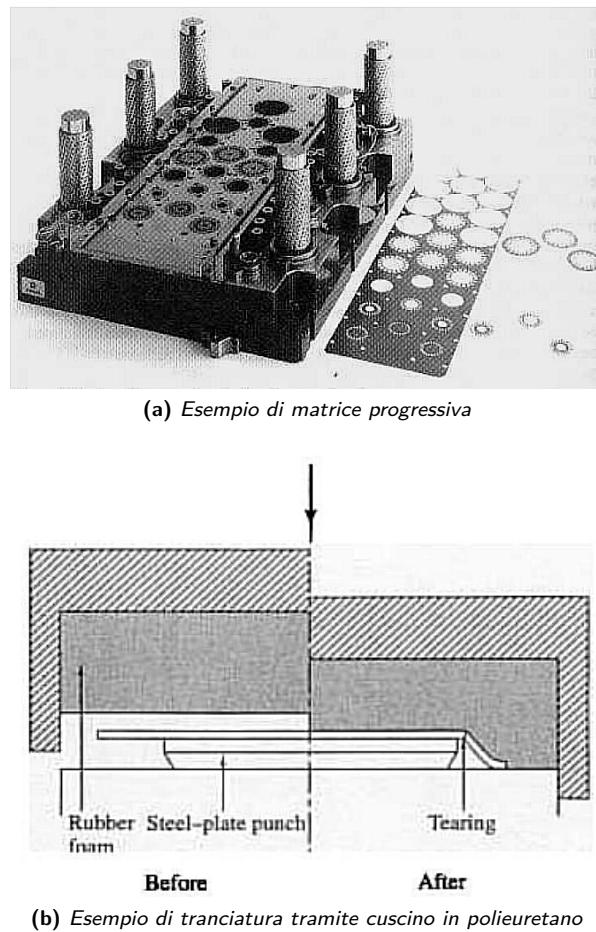


Figura 2.8: Processi di truciatura per grandi e piccoli lotti

1. La buccia d'arancia può essere esteticamente indesiderabile ma non è un difetto poiché può essere risolto scegliendo un materiale a grana fine.
2. La strizione localizzata provoca un indebolimento strutturale della lamiera piegata. La strizione avviene quando l'allungamento della fibra esterna supera l'allungamento uniforme del materiale e_u nella prova di trazione. Nella formula (2.6) R_b è il raggio di piega e h lo spessore della lamiera
3. La frattura rappresenta un limite assoluto. Questa è direttamente correlata alla riduzione dell'area q misurata alla rottura nella prova di trazione. Il raggio minimo di piega consentito può essere stimato per materiali meno duttili dalla (2.4) e per i materiali duttili, a causa dello spostamento del raggio neutro nelle pieghe strette, dalla (2.5). Di solito un materiale con $q > 0.5$ può essere piegato su se stesso,

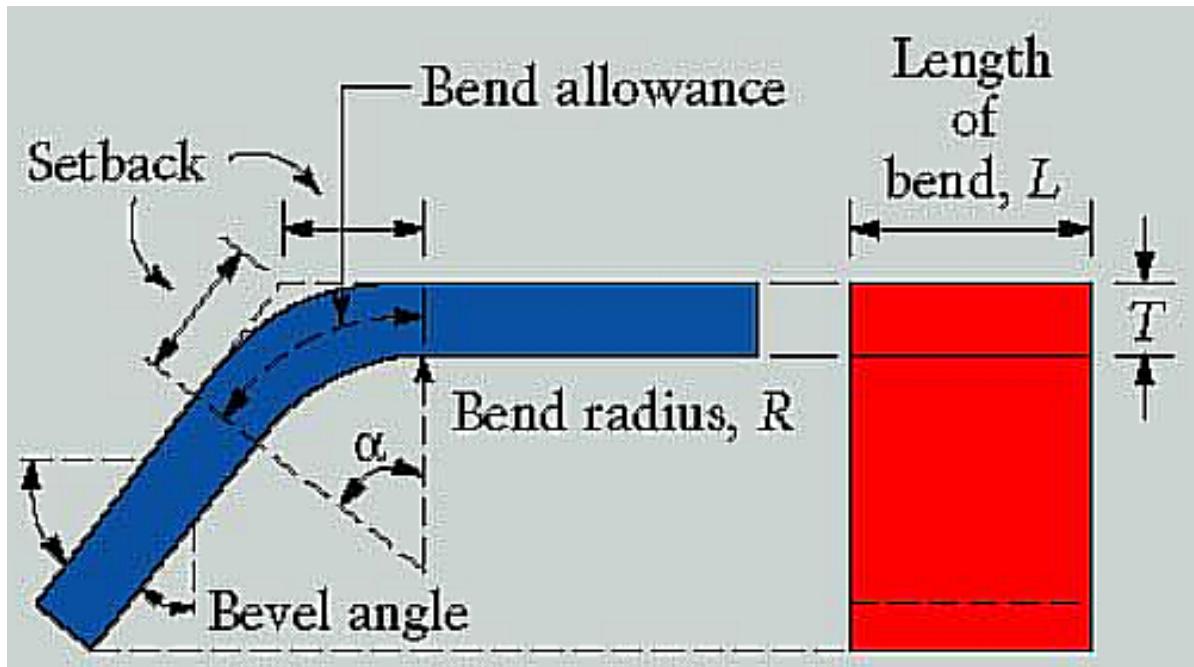


Figura 2.10: Parametrizzazione della piega sulle lamiere

si parla allora di raggio di piega zero.

$$R_b = k \left(\frac{1}{2q} \right) - 1 \quad \text{con } q < 0.2 \quad (2.4)$$

$$R_b = h \frac{(1-q)^2}{2q - q^2} \quad \text{con } q > 0.2 \quad (2.5)$$

4. Con raggi molto piccoli può verificarsi schiacciamento sulla superficie interna e formazione di pieghe.

La strizione localizzata può essere descritta come:

$$e_t = \frac{1}{(2R_b/h) + 1} \leq e_u \quad (2.6)$$

Per i materiali il cui comportamento può essere approssimato con legge esponenziale (2.7),

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (2.7)$$

$e_u = n$ e la deformazione uniforme ingegneristica e_u può essere ottenuta dalla formula (2.8).

$$e_u = (\exp(n)) - 1 \quad (2.8)$$

La relazione è più affidabile con gli acciai; per la maggior parte degli altri materiali, dovrebbe essere utilizzato l'effettiva e_u misurata nella prova di trazione. Poiché la deformazione viene redistribuita alle zone adiacenti durante la piega, è generalmente permessa una deformazione un po' più elevata. Un collare di bava provoca un aumento di tensione e, se sulla superficie esterna (a trazione), porta a frattura molto prima. Pertanto, se possibile, il collare è orientato verso il punzone, dove il materiale è sottoposto a compressione.

L'anisotropia, di qualsiasi tipo, influenza la piegatura. Un orientamento preferenziale delle fibre produce una maggiore duttilità nella direzione di laminazione, perciò conviene piegare le lamiere con la linea di piega ortogonale alla direzione di laminazione, come è mostrato nelle figure 2.11. Un materiale con basso valore di

r caratterizzato da tessitura si assottiglia facilmente e quindi può essere piegato con raggi più piccoli di un materiale con alto valore di r . Questa è una delle non numerose situazioni in cui convenga avere r piccolo. Ricordando che r è il rapporto tra deformazione nello spessore e rapporto in larghezza nella prova di trazione. La foto 2.11c mostra cricche sulla superficie di una lamiera piegata e il restringimento ai bordi.

2.2.1 Stato delle tensioni residue

Lo stato tensionale è estremamente complesso nella piegatura. Partendo dall'asse neutro, il materiale è soggetto a una deformazione crescente fino alle 2 superfici, da una parte in trazione e dall'altra in compressione. Ciò significa che intorno all'asse neutro le deformazioni sono elastiche. Quando si toglie la forza usata per piegare, il momento dovuto alla parte di materiale deformato solo elasticamente causa il ritorno elastico, e provoca la formazione di una distribuzione di tensioni residue. Il ritorno elastico delle lamiere è chiamato springback.

In riferimento alla figura 2.12 (a) mostra una distribuzione triangolare. In campo elastico tale distribuzione è rappresentativa sia dello stato tensionale che di quello deformativo perché c'è proporzionalità tra tensione e deformazione. Nella figura 2.12 (b) la distribuzione ha una forma diversa. Siccome la deformazione aumenta linearmente allontanandosi dall'asse neutro, quella in figura è sicuramente la distribuzione delle tensioni ed è stato superato lo snervamento in parte dello spessore. Nella figura 2.12 (c), allo stato tensionale mostrato in 2.12 (b) è stato sovrapposto lo stato tensionale dovuto allo scarico della forza che come si sa, avviene lungo una semiretta nel piano tensione/deformazione, perciò provoca una distribuzione triangolare. La somma delle 2 è mostrata in 2.12 (d) e rappresenta la distribuzione risultante di tensioni residue. Lo springback stabilisce un nuovo equilibrio di forze con una distribuzione di tensioni residue caratterizzata da tensioni di compressione all'esterno e di trazione sulla superficie interna.

Lo springback recupera elasticamente parte della deformazione totale; in particolare, aumenta il raggio e riduce l'angolo della parte piegata. La zona elastica è più ampia per una piega relativamente dolce (grande rapporto R_b/h , dove R_b è il raggio di piega e h lo spessore) e per un materiale con un elevato rapporto tra tensione di snervamento $\sigma_{0.2}$ e modulo elastico E . Lo springback può essere espresso mediante la formula (2.9);

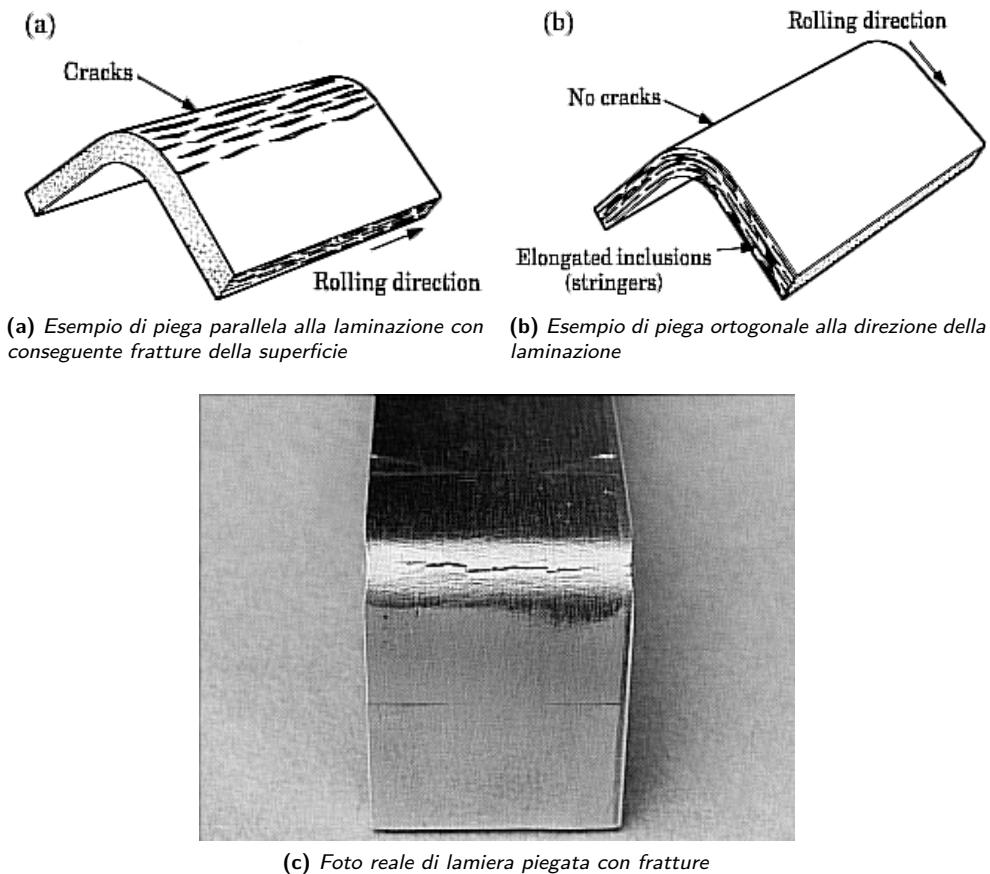
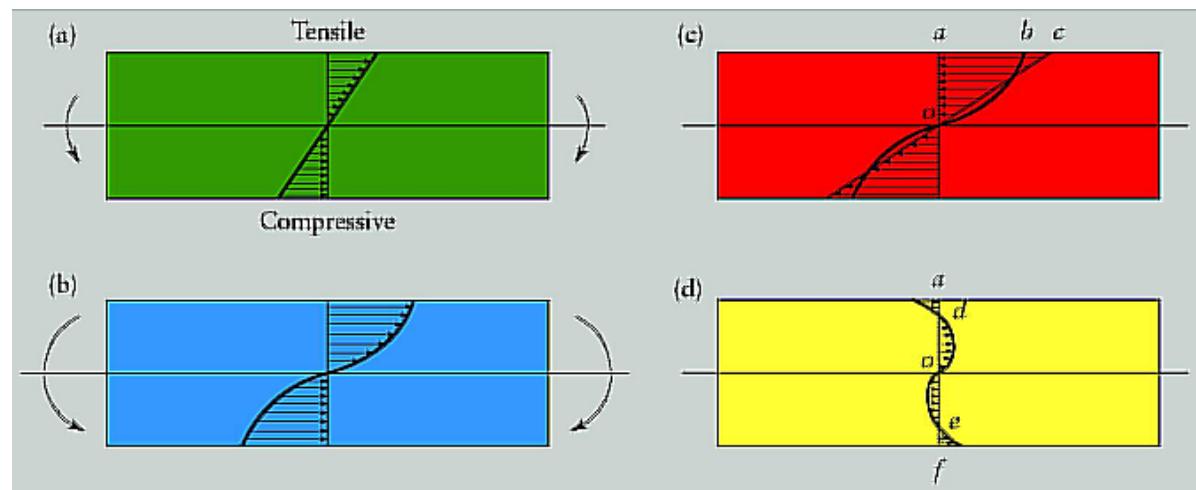
$$\frac{R_b}{R_f} = 1 - 3 \left(\frac{R_b \sigma_{0.2}}{h E} \right) + 4 \left(\frac{R_b \sigma_{0.2}}{h E} \right)^3 \quad (2.9)$$

$$\alpha_f \left(R_f + \frac{h}{2} \right) = \alpha_b \left(R_b + \frac{h}{2} \right) \quad (2.10)$$

dove R_b è il raggio della matrice di piegatura e R_f è il raggio ottenuto dopo aver tolto la pressione di formatura. Poiché la lunghezza dell'asse neutro non cambia, l'angolo dopo lo springback, α_f può essere ottenuto in radianti dalla formula (2.10) che esprime appunto l'invarianza della lunghezza dell'asse neutro da quando viene applicato il carico alla fase dopo lo scarico. Al disegno 2.13 vengono rappresentati i parametri.

Diverse tecniche sono utilizzate per combattere lo springback, rispettivamente in figura 2.14:

1. Se è noto lo springback per un determinato materiale e se il materiale è di qualità e spessore uniforme, è possibile compensare piegando più del voluto. Questa è la forma di piegatura più semplice, in cui non viene applicata alcuna pressione di compressione nella direzione dello spessore della lamiera, si parla di **piegatura in aria**.
2. Negli altri casi la soluzione consiste nel fare in modo che tutto il materiale nella zona di piega venga deformato plasticamente. La zona elastica può essere eliminata alla fine della corsa del punzone con due tecniche.
 - Innanzitutto, le due estremità della lamiera possono essere bloccate prima che il punzone scenda, in modo che la corsa del punzone provochi lo stiramento della lamiera, causando snervamento a trazione nell'intero spessore della lamiera. Nessuna figura riproduce questa soluzione.
 - Nel secondo metodo il naso del punzone è sagomato per indentare la lamiera, in modo che la compressione plastica avvenga in tutto lo spessore.

**Figura 2.11:** Generazione di fratture durante la piegatura**Figura 2.12:** Stato delle tensioni residue

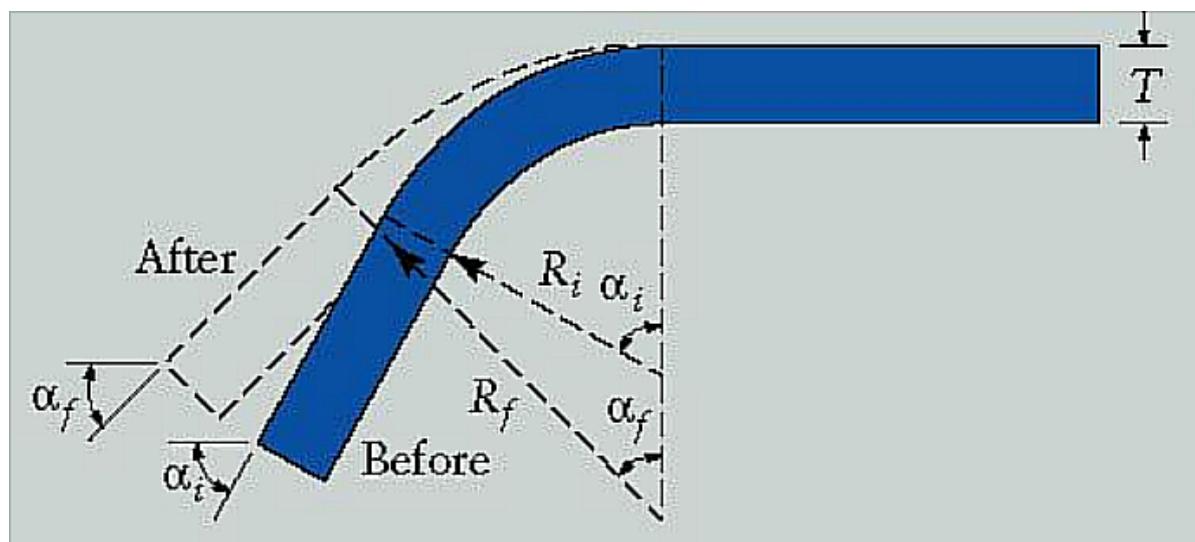


Figura 2.13: Parametri per valutare lo springback

3. Se si utilizza un contro-punzone con una pressione controllata, le tensioni di compressione vengono mantenute nella zona della piega durante l'intero processo. Poiché questo ha anche l'effetto di imporre una pressione idrostatica sulla zona di curvatura, è possibile flettere il materiale oltre i suoi limiti naturali.
4. I materiali meno duttili possono essere piegati ad una temperatura elevata; poiché la tensione di snervamento è più bassa, anche lo springback è minore.

2.2.2 Valutazione della forza di piegatura

Una semplice stima della forza di piegatura in piegatura libera a 90° può essere ottenuta dalla formula:

$$P_b = \frac{wh^2(TS)}{W_b} \quad (2.11)$$

Dove W_b è la larghezza dell'apertura della matrice e w la larghezza della striscia (la lunghezza della linea su cui si effettua la piegatura).

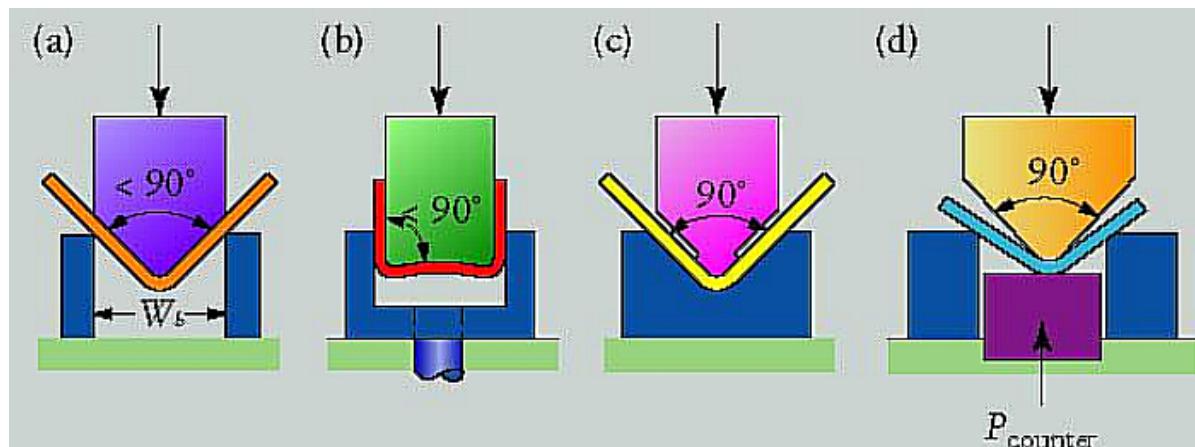


Figura 2.14: Soluzioni migliorative allo springback

2.2.3 Macchinari e tecniche di lavorazione

La macchina utilizzabile per la piegatura dipende dalla dimensione, per lo più dalla larghezza della lamiera piegata. Le prese meccaniche, viste parlando di forgiatura ed estrusione, possono piegare lamiere strette ad alta velocità. le prese piegatrici sono prese speciali con supporti molto lunghi. IN queste, semplice utensili vengono utilizzati per realizzare forme complesse piegando ripetutamente una lamiera lunga. I costi possono essere ridotti quando una lastra in schiuma di poliuretano sostituisce lo stampo femmina. Un esempio di presa piegatrice è quella della figura 2.15.

Una grande varietà di forme può essere prodotta con un numero limitato di utensili, come si può vedere dalla figura 2.16. La deflessione elastica dell'attrezzatura (che si apre al centro sotto la forza della pressa) provocherebbe variazioni dell'angolo di piega, pertanto gli stampi devono essere realizzati in modo che pieghino di più al centro. Questo si ottiene spessorando o, nelle prese moderne, mediante flessione meccanica o idraulica, spesso sulla base di forze di piega calcolate.

Le figure 2.8 mostrano altre operazioni eseguibili su presa piegatrice. Le figure da d ad f illustrano una sequenza di piegatura. In combinazione con alimentatori di lamiera meccanizzati, la pressa è adatta ad essere controllata da computer, compreso un riscontro per rilevare la posizione della lamiera. La compensazione per lo springback è fatta con l'aiuto di tabelle o equazioni empiriche. Schemi di controllo più sofisticati prendono in considerazione le proprietà del materiale. In un caso, l'angolo di piega viene misurato nella prima corsa; la forza viene quindi rilasciata per ottenere lo springback e viene effettuata una seconda corsa di compensazione. In altri schemi, la curva elasto-plastica tensione-deformazione è derivata da infor-

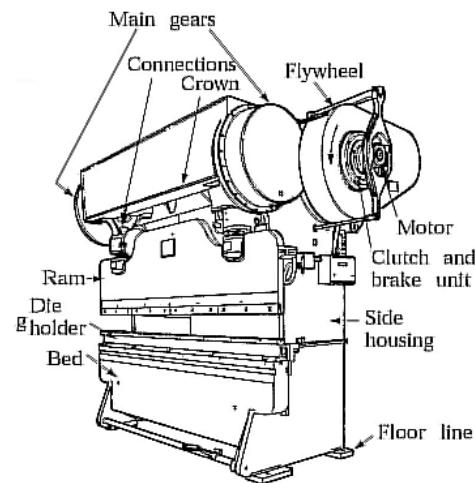


Figura 2.15: Esempio di presa piegatrice

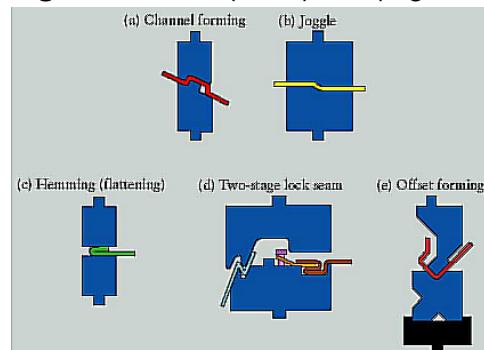


Figura 2.16: Varietà di utensili utilizzabili

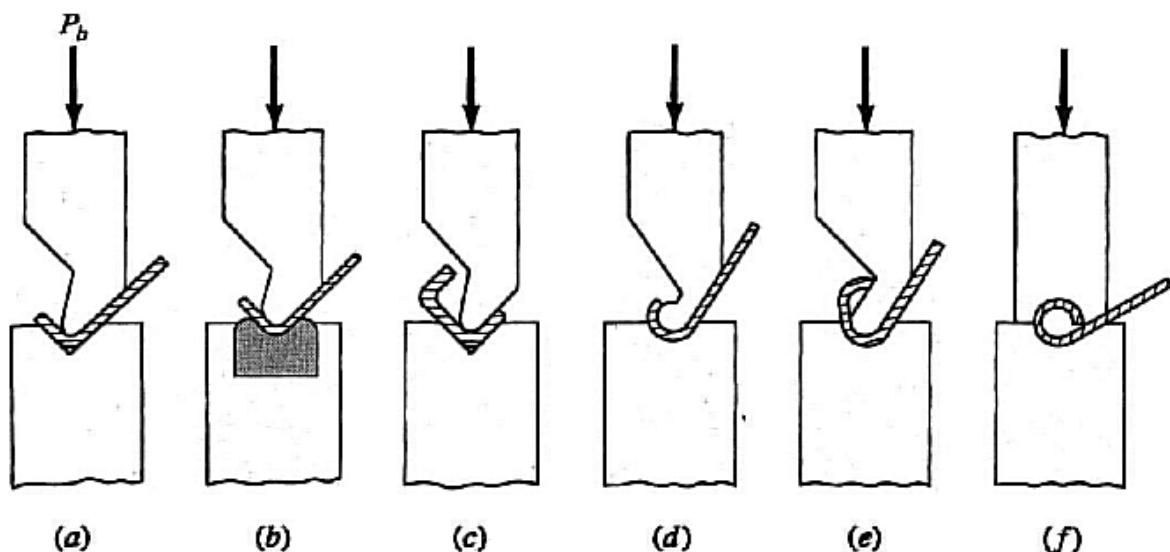


Figura 2.17: Alcune sezioni di utensili per la piegatura

mazioni ottenute con trasduttori di forza e di spostamento e un algoritmo di controllo calcola l'incremento di piega richiesta.

La piegatura con pressa pannellatrice, mostrata in figura 2.18a, è un metodo alternativo per piegare. Per stimare la forza di piegatura, W_b può essere considerata come $(2R + h)$. La pressa pannellatrice può piegare solo in prossimità dei bordi della lamiera e, a parità di altri fattori, deve applicare una forza maggiore rispetto alla pressa piegatrice. In compenso il posizionamento della lamiera è più preciso e il tempo ciclo è inferiore.

La piegatura con tre rulli impedisce una curvatura uniforme ma regolabile a lamiere, piastre o profili deformando con rulli disposti in modo piramidale. Si tratta di un'importante fase di preparazione per realizzare grandi anelli e strutture saldate. La macchina si chiama **calandra** e **calandratura** l'operazione. Illustrata in figura 2.18b

La formatura a rulli è un metodo di produzione molto veloce. La piegatura è ora fatta progressivamente, passando la striscia tra rulli sagomati, a coppie. Prodotto tipici sono le lamiere ondulate e i guard-rail. Per molte altre forme, rulli folli sono usati per premere i lati della forma parzialmente deformata. In questo modo possono essere formati anche tubi da saldare successivamente, profili che sostituiscono sezioni laminate a caldo o estruse, nonché forme complesse (come i telai per porte).

La curvatura di profili e tubi è un'importante attività produttiva. Il problema della piegatura libera è legato al fatto che le forme più complesse possono distorcere e accartocciarsi. Risultati migliori sono ottenuti quando la sezione o il tubo sono avvolti attorno ad una forma rigida, come mostrato nelle figure.

L'adeguamento alla forma è garantito dall'avvolgimento sotto trazione, passando attorno al profilo o al tubo un rullo strisciante 2.20a, un blocco fissato al centro curvatura o da una forma rigida rotante 2.20b. Per evitare il collasso dei tubi nella curvatura su raggi stretti, sono disponibili diversi metodi. L'interno è supportato con sabbia, con un metallo a basso punto di fusione o, più economicamente, da un mandrino costituito da singole sezioni o il tubo è tirato su un mandrino fisso 2.20c. Le piegatrici CNC possono essere programmate per realizzare tubi con diverse curve in differenti orientamenti, come richiesto per sistemi idraulici di auto e aerei e scarichi automobilistici.

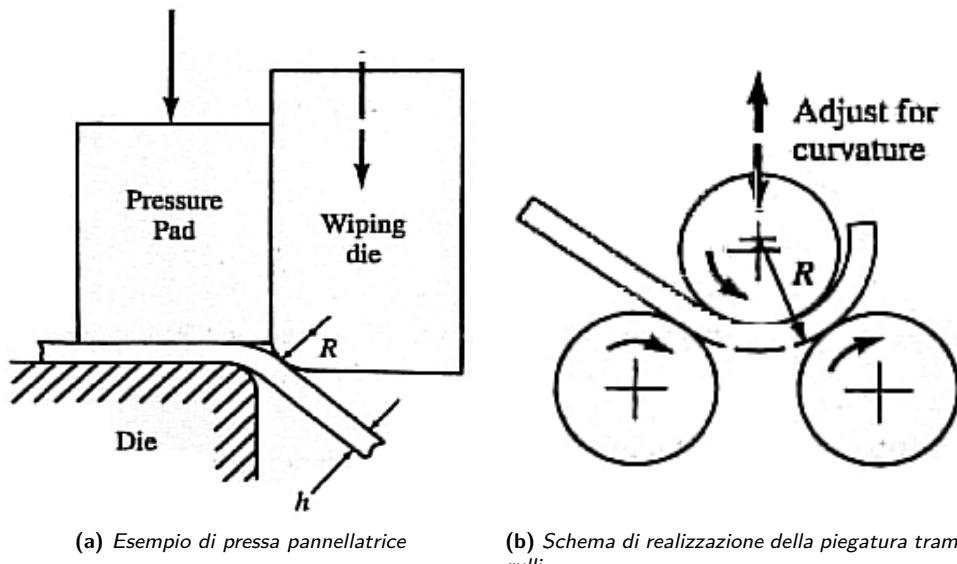


Figura 2.18: Ulteriori tecniche di piegatura

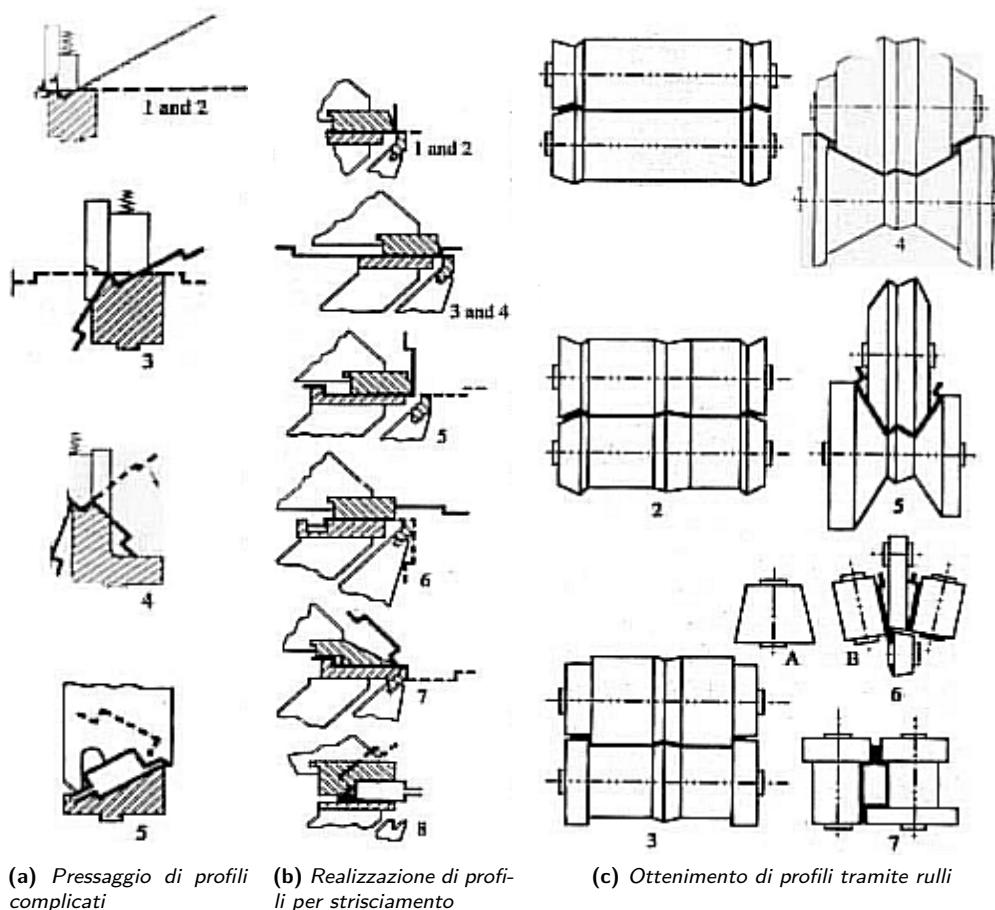


Figura 2.19: Ottenimento di profili di forme decisamente variegate, su macchine automatiche

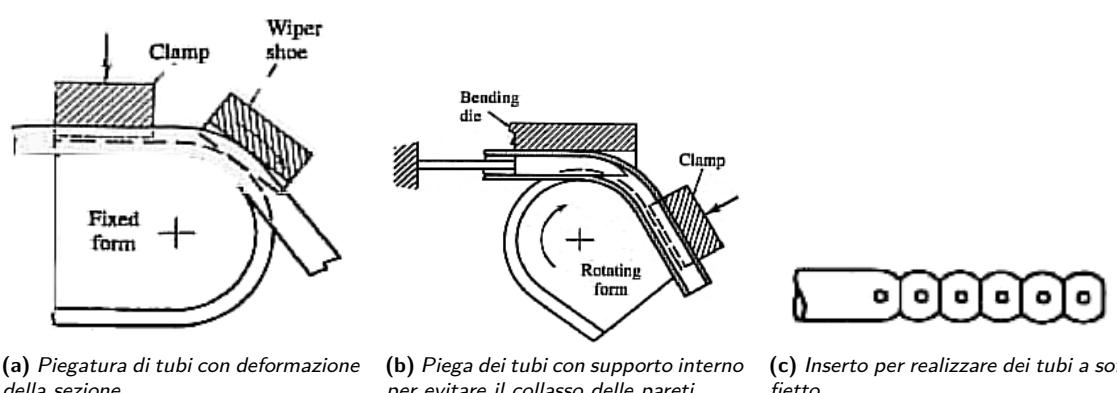


Figura 2.20: Tecniche di piegatura dei tubi

2.3 Stretch Forming

Grandi quantità di lamiera sono deformate per realizzare componenti a forma di contenitori più o meno profondi, con una grande varietà di forme. In contrasto con la maggior parte dei componenti in lamiera piegati, sono caratterizzate da curvature in due direzioni (sono forme 3-D). Possono essere prodotte con lo stretch forming, con un'imbutitura o con loro combinazioni. Nello stretch forming puro la lamiera è completamente bloccata sul suo perimetro e la forma è sviluppata interamente a scapito dello spessore della lamiera. Fisicamente questo può essere ottenuto in diversi modi:

1. La lamiera può essere bloccata con un gran numero di morsetti fissi o rotanti. Il vantaggio è che solo uno stampo (stampo maschio o punzone di forma) è necessario, ma la produttività è bassa; di conseguenza, tale operazione è più adatta per la produzione di bassi volumi come è tipico dell'industria aeronautica. Un'operazione di questo tipo è mostrata in figura 2.21a. Possono essere formate parti molto grandi (pelli di fusoliera, pelli d'ala, scafi per barche). Il ritorno elastico può essere sostanziale realizzando forme con curvatura dolce; per risolvere il problema si può lavorare a temperature elevate (a volte sfruttando il creep o la formatura superplastica del materiale). Anche i profili laminati ed estrusi possono essere lavorati in questo modo.
2. Per la produzione di massa, per esempio nell'industria automobilistica e degli elettrodomestici, il semilavorato è bloccato con un premi-lamiera mobile indipendente che blocca il foglio con l'ausilio di rompi-grinze; il punzone assieme alla matrice femmina definiscono la forma. Questa tecnica è mostrata in figura 2.21b. Un prodotto è realizzato ad ogni corsa della pressa; quindi la produttività è alta ma anche i costi di produzione sono più alti.
3. Nel processo di stampaggio in rilievo il vincolo è dato dalla lamiera stessa, attraverso i punti di contatto multipli con la matrice. In questo caso di solito la deformazione è localizzata. Un esempio è mostrato in figura 2.21c.

2.3.1 Deformabilità nello stretch forming

Il primo limite viene raggiunto quando una strizione localizzata diventa visibile, invece il limite ultimo è dato dalla successiva frattura. Il limite di formabilità è una proprietà tecnologica, perciò si usano prove di questo tipo per determinarla, in contrapposizione alle prove meccaniche che sono stabilite da normativa. La deformazione limite dipende dal materiale, dalla velocità di deformazione e dall'attrito sulla superficie del

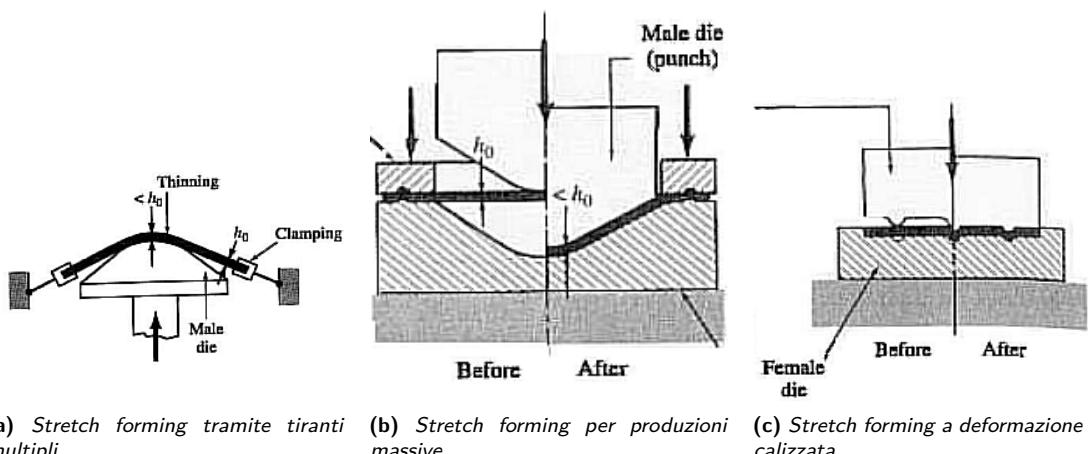


Figura 2.21: Possibilità di Stretch forming per l'industria

punzone. I fattori che influenzano la deformazione limite diventano evidenti quando una lamiera bloccata sul perimetro viene allungata da un punzone semisferico, come è mostrato nella figura 2.22.

Le variazioni di deformazione localizzate (la distribuzione della deformazione) possono essere rivelate semplicemente applicando una griglia di piccoli cerchi (generalmente di 2-6 mm di diametro) o una griglia di quadrati e cerchi sulla superficie della lamiera, di solito mediante incisione elettrolitica (tecnica di marcatura per materiali conduttori) o una tecnica a base di fotoresist (materiale sensibile alla luce), come quelle che si usano in elettronica per la produzione di circuiti stampati. Si ottiene una superficie come quella mostrata in figura 2.23. Durante la deformazione, l'assottigliamento del materiale è accompagnato da una crescita dei cerchi, come richiesto dalla costanza del volume. Quando la deformazione è la stessa in tutte le direzioni, come soffiando in un palloncino (deformazione biassiale simmetrica), il cerchio si espande in un cerchio di diametro maggiore. Quando la deformazione è diversa in direzioni diverse, il cerchio si distorce in un'ellisse: l'asse maggiore dà la deformazione maggiore e, perpendicolare ad esso, l'asse secondario dà la deformazione minore.

Quando una lamiera di un determinato materiale viene allungato sul punzone semisferico, la distribuzione della deformazione dipende da un certo numero di fattori:

1. Nella totale assenza di attrito (che in realtà può essere realizzata solo nell'espansione idraulica), la lamiera si assottiglia gradualmente soprattutto sull'apice, dove infine si verifica la frattura. Con un materiale avente un alto valore di n , si può ottenere una cupola più alta prima che la strizione diventi localizzata. Ricordando che nella prova di trazione la strizione avviene a $\epsilon = n$. Nella trazione biassiale simmetrica, la presenza di 2 deformazioni uguali tra loro ortogonali nel piano della lamiera, impedisce la formazione di una strizione localizzata, si ha perciò strizione diffusa.
2. L'attrito sulla superficie del punzone impedisce il libero assottigliamento sulla sommità e con un attrito crescente la posizione della massima deformazione si allontana dalla sommità. La deformazione diventa più localizzata e la frattura si verifica in condizioni di deformazione piana, dove lamiera e punzone vengono in contatto o in prossimità di tale punto.
3. In condizioni identiche, una lamiera più spessa si allunga maggiormente, perché la piegatura sovrapposta all'allungamento aumenta la duttilità.
4. L'entità dell'allungamento aumenta con tutte le variabili del materiale che ritardano la strizione (valore alto di n , trasformazioni) o aumentano la deformazione dopo strizione (valore alto di m). Infatti, si riscontra una buona correlazione empirica tra allungamento totale nella prova di trazione e altezza massima della cupola. La distribuzione della deformazione è importante perché determina le proprietà della lamiera allungata

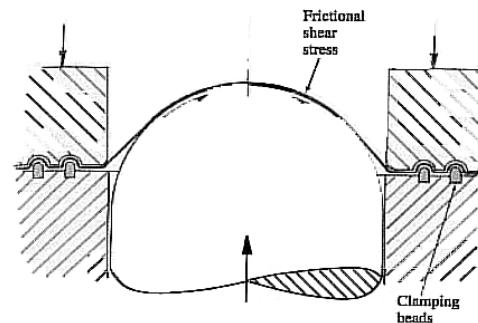


Figura 2.22: Esempio di test tecnologico per lo stretch forming

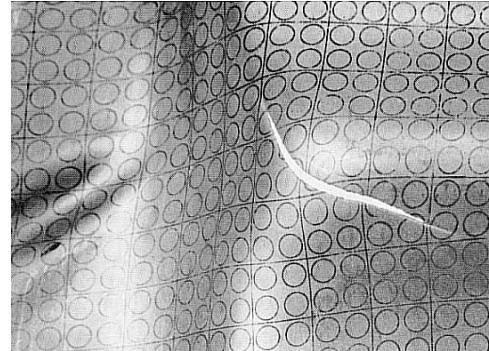


Figura 2.23: Griglia di rilevazione di deformazioni localizzate

La deformazione può continuare fino a quando si sviluppa una strizione localizzata in corrispondenza o in prossimità della sommità, in un punto in cui ci sia qualche disomogeneità nel materiale o la lamiera sia originariamente più sottile. Durante l'allungamento su un punzone, l'entità dell'allungamento non raggiunge mai quella ottenuta nell'espansione idraulica senza attrito, ma fintantoché l'attrito è molto basso, la rottura si verifica ancora sulla sommità.

2.4 Imbutitura

Anche l'imbutitura come lo stretching viene usata per produrre contenitori a partire da una lamiera piana. La differenza tra stretching e imbutitura è sostanziale: nel primo, il semilavorato è bloccato e la profondità è raggiunta a scapito dello spessore della lamiera; in quest'ultimo, al semilavorato è permesso - e persino è incoraggiato - ad entrare nella matrice, e lo spessore è nominalmente invariato. Nel caso più semplice di imbutitura pura, un semilavorato circolare del diametro d_o viene convertito in una contenitore a fondo piatto, trascinandolo su una matrice con l'aiuto di un punzone di diametro D_p . Sia la matrice che il punzone devono avere bordi ben arrotondati, altrimenti il semilavorato potrebbe essere tagliato.

Il contenitore finito viene estratto dal punzone, ad esempio, lavorando un leggero recesso nella parte inferiore della matrice. Dopo che il contenitore è stato spinto attraverso la matrice, il suo bordo superiore si allarga a causa dello springback, viene bloccato dalla sporgenza durante la corsa di ritorno del punzone e la sporgenza stacca il contenitore. Nel punzone spesso è presente un foro centrale per impedire la formazione di una depressione e pertanto aiuta il distacco.

2.4.1 Imbutitura senza premi-lamiera

Quando la porzione di lamiera sulla matrice scorre verso il foro nella matrice può dare luogo a pieghe chiamate grinze. La formazione di pieghe può essere evitata quando la lamiera è sufficientemente rigida. Questo si verifica sempre con imbutiture poco profonde, quando il rapporto di imbutitura (2.12), dove d_o è il diametro iniziale della lamiera e D_p il diametro del punzone.

$$d_o/D_p < 1.2 \quad (2.12)$$

Lamiere con spessore elevato rispetto al diametro iniziale consentono un rapporto di imbutitura maggiore; la formazione di pieghe dipende anche dal profilo della matrice, che determina la compressione circonferenziale. Il profilo più favorevole è la matrice a trattrice. Il grafico 2.25 confronta le prestazioni di 3 diversi profili della matrice di imbutitura, troncoconico, cilindrico raccordato e a trattrice, mostrati a destra. La parte inferiore del grafico, identificata come good rappresenta le imbutiture eseguibili senza formazione di grinze, la parte superiore (wrinkling) dice quali imbutiture darebbero luogo alla formazione di grinze.

Le figure 2.26 mostrano la progressione di un'imbutitura in una matrice trattrice. L'equazione (2.13) indica una condizione che deve essere rispettata per non produrre grinze.

$$D_o - D_p < 5T \quad (2.13)$$

2.4.2 Imbutitura con premi-lamiera

Quando la lamiera è relativamente sottile e il rapporto di imbutitura è oltre i limiti indicati precedentemente, la flangia deve essere vincolata con un premi-lamiera, come si vede nella figura a sinistra. Il premi-lamiera deve esercitare pressione sufficiente per prevenire le pieghe, ma una pressione eccessiva limiterebbe il libero movimento del materiale e causerebbe fratture nella parete del contenitore. Per produrre un contenitore senza difetti, la pressione del premi-lamiera può essere presa, come prima approssimazione, pari al 1.5% della tensione di snervamento del materiale. Le foto 2.27 mostrano la lamiera prima dell'imbutitura e 3 imbutiti. Nel caso (b) la pressione del premi-lamiera è insufficiente, in (c) è ottimale, in (d) è eccessiva. Nella figura (c) si vede anche la formazione delle orecchie, dovute all'anisotropia planare del materiale.

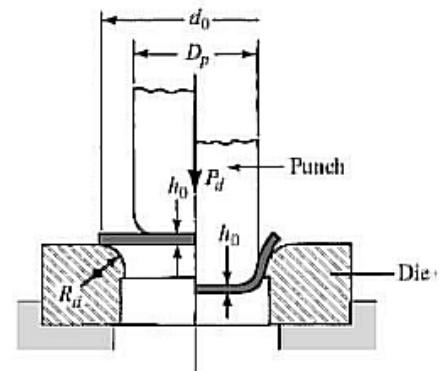


Figura 2.24: Schema di realizzazione dell'imbutitura

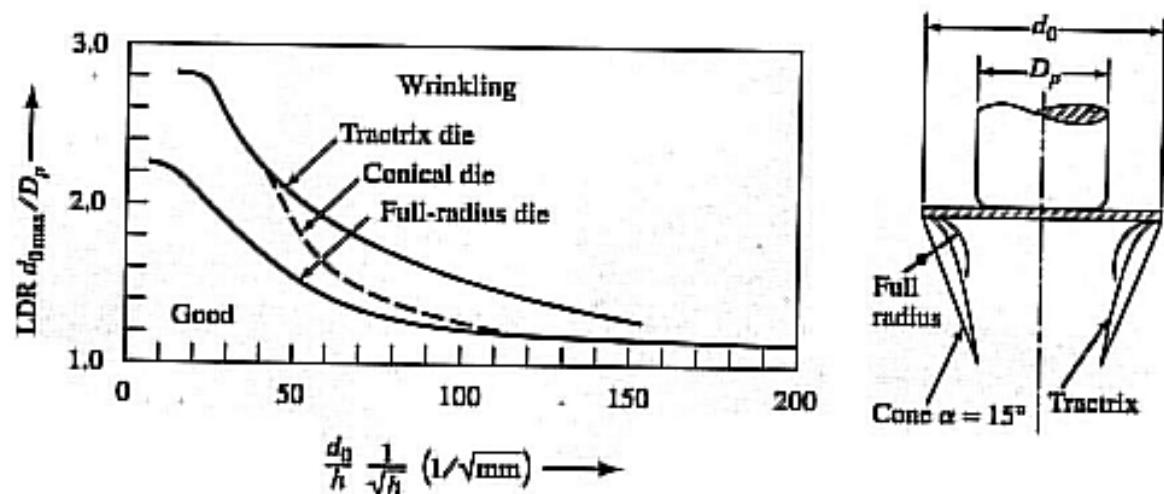


Figura 2.25: Grafico coi limiti di imbutitura in funzione di un parametro geometrico

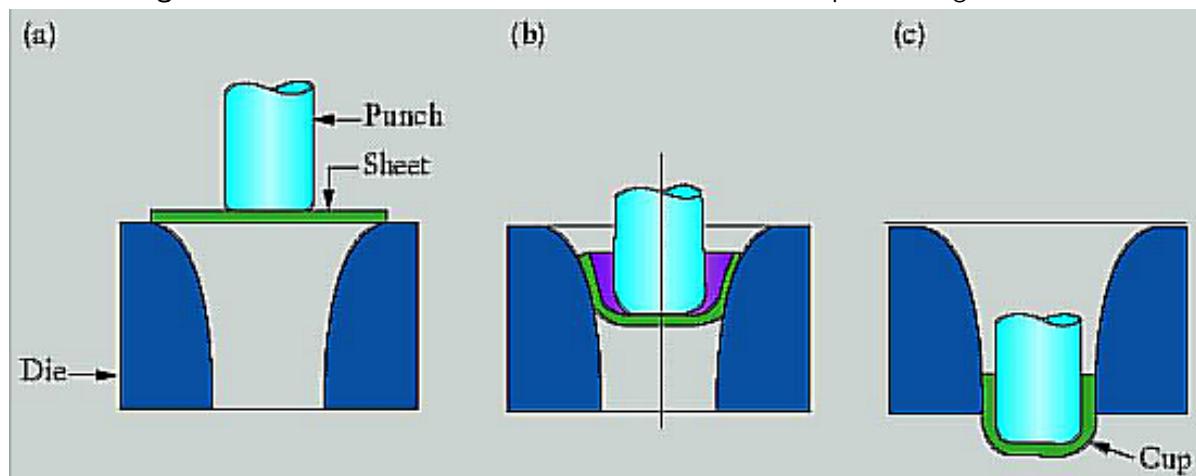


Figura 2.26: Sequenza degli eventi durante la corsa del punzone

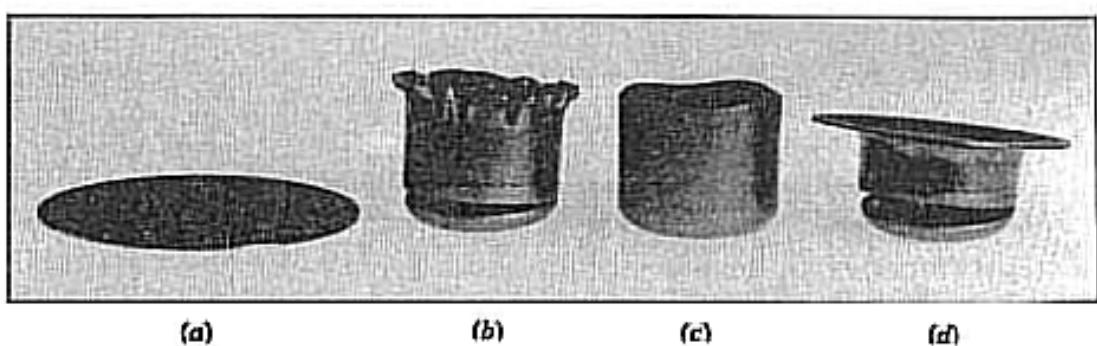


Figura 2.27: Casi di imbutiti con diverse pressioni del premi-lamiera

2.4.3 Valutazione delle forze applicate

Quando il premi-lamiera applica la pressione ottimale, la forza di imbutitura aumenta mentre la flangia parzialmente imbutita incrudisce; al diminuire del diametro della flangia, anche la forza diminuisce fino a quando il bordo ispessito della lamiera viene stirato formando la gobba che si vede a destra nella linea A del grafico 2.28a. Una pressione eccessiva causa una frattura precoce (linea B, grafico 2.28a). Una pressione troppo bassa consente la formazione di grinze (linea C grafico 2.28a) e, se le grinze non possono essere stirate, non si riesce a raggiungere la fine dell'imbutitura.

Una stima molto approssimativa della forza di imbutitura può essere ottenuta dalla formula (2.14).

$$P_d = \pi D_p h(TS) \left(\frac{d_o}{D_p} - 0.7 \right) \quad (2.14)$$

$\pi D_p h$ è un'area, data dalla circonferenza sotto il punzone per lo spessore della lamiera. La forza dipende dalla resistenza meccanica del materiale della lamiera, espressa dalla tensione massima a rottura TS , moltiplicata per un fattore geometrico. A parità di diametro del punzone, la forza aumenta con il diametro iniziale della lamiera. Quando la forza di imbutitura supera la forza che la parete del contenitore può sostenere, si ha una frattura.

2.4.4 Limite di imbutibilità

C'è un limite alla deformazione raggiungibile, espresso come rapporto di imbutitura d_o/D_p . Il diametro massimo del cerchio che si può imbutire in condizioni ideali è espresso come il rapporto limite di imbutitura (**LDR**). Siamo interessati che il rapporto limite di imbutitura sia il più alto possibile. Cerchiamo di capire quali fattori ne condizionino il valore.

1. Un alto valore di n (sensibilità all'incrudimento) rafforza la parete del contenitore ma aumenta anche la forza di trazione, quindi è abbastanza neutrale; un leggero miglioramento nella **LDR** è spesso riscontrato con n più alto perché la forza massima è necessaria in un momento successivo.
2. Un alto valore di m (sensibilità alla velocità di deformazione) rafforza una strizione incipiente nella parete, mentre influenza appena la forza di imbutitura, quindi è leggermente positivo nel suo effetto.
3. La variabile del materiale più importante è r . Un materiale con valore alto di r si deforma riducendo molto la larghezza e poco lo spessore. Ciò aiuta il semilavorato a ridurre progressivamente il diametro e quindi è un fattore positivo. La parete di contenitori parzialmente imbutiti è in condizioni di trazione biassiale, situazione in cui un materiale con r alto è più resistente, grazie alla tendenza ad assottigliarsi poco; la flangia invece è sottoposta a trazione radiale e compressione circonferenziale. Il risultato è che l'**LDR** aumenta con l'aumento del valore di r , come mostra il grafico 2.28b. Dal grafico si vede che un **LDR** di 2.0 permette una profondità di circa $0,8D_p$, mentre con un **LDR** di 3.0 si può arrivare a una profondità superiore a $2,0D_p$.
4. Raggi di raccordo piccoli sul punzone e sulla matrice impongono una forte deformazione di piega e quindi aumenta la forza di imbutitura senza modificare la resistenza della parete, quindi, diminuiscono l'**LDR**. Tuttavia, raggi molto grandi lascerebbero gran parte della lamiera non supportata e potrebbero formarsi grinze tra punzone e matrice. Quindi i raggi sono ottimizzati, di solito entro i limiti di $R > 4h$ per lamiere spesse ($> 5\text{mm}$) e $R > 8h$ per quelle sottili ($< 1\text{mm}$). Nel grafico 2.28c si vede che se il raggio di raccordo sul punzone arriva a 25 mm l'assottigliamento aumenta molto, con forte indebolimento della lamiera.
5. L'attrito tra premi-lamiera, matrice e flangia fa aumentare la forza di imbutitura e quindi è dannoso. Lo sforzo di attrito può essere ridotto riducendo la pressione del premi-lamiera, ma un'eccessiva riduzione porta alla formazione di grinze. Pertanto, deve essere applicato un buon lubrificante che riduca l'attrito e quindi la forza di attrito.

6. Nell'imbutitura di una lamiera relativamente sottile, di rapporto d_0/h superiore a 50, la forza di attrito diventa una porzione importante della forza totale; di conseguenza, l'**LDR** diminuisce con un aumento del rapporto d_0/h
7. L'attrito sul punzone è utile perché trasferisce la forza di trazione dalla lamiera al punzone, perché la lamiera scivola meno sul punzone. Quindi un punzone ruvido, o un semilavorato lubrificato solo sulla flangia, dà un **LDR** superiore. Non esiste ancora uno standard internazionale per la determinazione del **LDR** e solo i dati ottenuti in condizioni identiche sono comparabili

Un materiale con anisotropia planare mostra proprietà diverse nelle direzioni di laminazione, trasversale a 45° ($r_0 \neq r_{90} \neq r_{45}$). Ciò porta alla formazione delle orecchie, una variazione periodica dell'altezza della parete del contenitore; le orecchie dipendono dalla simmetria cristallina e si verificano in coppia (4, 6 o 8). La frangia si ispessisce meno nelle direzioni in cui r è maggiore, perciò le orecchie si formano in queste direzioni.

Contenitori di profondità maggiore di quella consentita dal **LDR** possono essere realizzati deformando ulteriormente dopo la prima imbutitura.

1. L'ulteriore imbutitura lascia lo spessore della parete sostanzialmente invariato. Nelle figure 2.29 (a) e (b) sono mostrati 2 esempi di imbutitura doppia.
2. L'ironing o stiratura lascia il diametro interno praticamente invariato e raggiunge una maggiore profondità riducendo lo spessore della parete. È evidente che l'ironing è simile alla trafilatura di un tubo su un mandrino.
3. Un fenomeno fondamentale, finora non menzionato, è che un materiale lavorato a freddo presenta una maggiore duttilità quando la direzione di deformazione è invertita in operazioni successive; questo viene sfruttato nell'imbutitura inversa. L'imbutitura multipla è ampiamente utilizzata per contenitori alimentari, tappi per penne stilografiche, alloggiamenti per filtri olio, pistoni per ammortizzatori, ecc... L'ironing viene utilizzato nella produzione di massa di lattine e cartucce di munizioni imbutite e stirate.

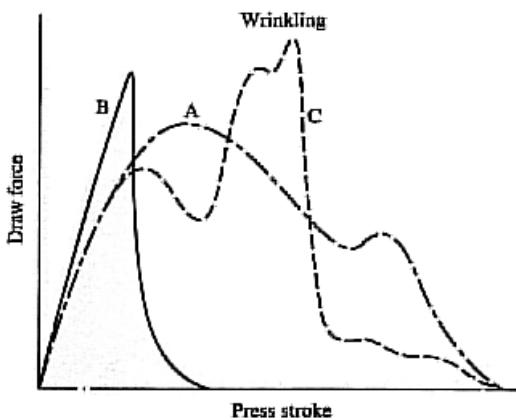
Nell'imbutitura di contenitori quadrati o rettangolari 2.30 il grado di difficoltà aumenta con il crescente rapporto tra profondità e raggio dell'angolo; gli oggetti verdi in figura, chiamati rompi-grinze, ostacolano lo scorrimento della lamiera nelle zone in cui tende a scorrere maggiormente, per ridurre la differenza di scorrimento tra zone d'angolo e zone rettilinee. Un punzone con una sommità curva o semisferica impone un diverso stato di deformazione.

2.5 Stiro-imbutitura

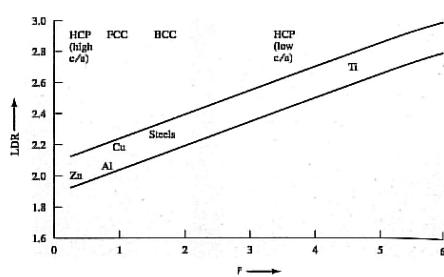
In molte applicazioni pratiche, soprattutto nella produzione di parti di telai automobilistici, il processo di imbutitura non è né puro stretching né imbutitura pura. La lamiera non è completamente bloccata (quindi non è puro stretching) né è libera di scorrere (quindi non è imbutitura pura). Invece, le forme complesse vengono sviluppate controllando lo scorrimento della lamiera, ritardandola, ove necessario, con i rompi-grinze inseriti nelle superfici della matrice e del premi-lamiera.

Per regolare il processo, viene applicato un lubrificante e viene specificata la rugosità e la tessitura della superficie della lamiera (vengono utilizzate spesso lamiere con finitura casuale). In alcuni casi, la pressione del premi-lamiera viene variata in modo programmato durante la corsa o il premi-lamiera è sottoposto a un carico pulsante. Nei sistemi più avanzati il premi-lamiera viene azionato da diversi cilindri idraulici programmabili autonomamente in modo che la forza ritardante possa essere controllata localmente.

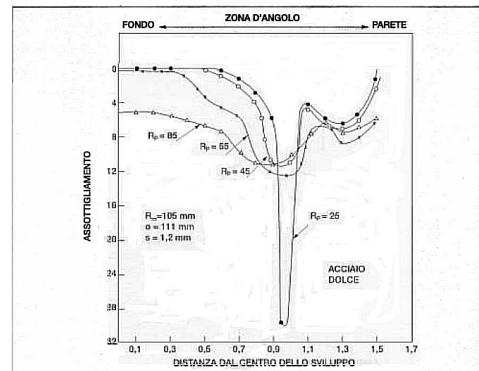
La forma del prodotto è spesso rappresentata da una superficie "sculturata", cioè una superficie non rappresentabile analiticamente, cioè tramite formule, in modo semplice. L'applicazione del CAD/CAM a tali forme ha notevolmente ridotto il tempo e gli sforzi coinvolti nella progettazione e analisi di componenti in lamiera e nella programmazione di macchine utensili **CNC** per la realizzazione di stampi. Le curvature possono essere dolci e non simmetriche, causando problemi di springback e distorsione dopo il distacco dalla



(a) Per i casi della figura 2.27 si evidenziano le forze applicate dal punzone



(b) Valore LDR in funzione di \bar{r}



(c) Assottigliamento della lamiera a partire dal centro dello sviluppo fino alla superficie laterale

Figura 2.28: Parametri caratteristici dell'imbutitura

matrice, in particolare con materiali con alto rapporto $\sigma_{0.2}/E$, e la modellazione al computer può aiutare a definire una forma di matrice che lo compensi. In altri casi, la formatura si avvicina ai limiti del materiale e la frattura si può facilmente verificare in assenza di controlli stretti. La modellazione al computer può consentire l'analisi dell'effetto delle variabili di processo.

2.5.1 Tailored Blanks

Recentemente si è cominciato a saldare tra loro varie lamiere caratterizzate da spessore o composizione differenti, in modo che risultino resistenti solo dove serve. Le lamiere così ottenute consentono riduzioni della massa e del numero di componenti. In pratica, mentre la normale sequenza di operazioni nella lavorazione di lamiere è data da taglio, deformazione e saldatura, con le tailored blanks la procedura diventa taglio, saldatura e deformazione plastica. La saldatura di lamiere piane è più rapida e affidabile, per contro sono necessarie prese più grandi e costose per deformare un insieme di lamiere saldate tra loro.

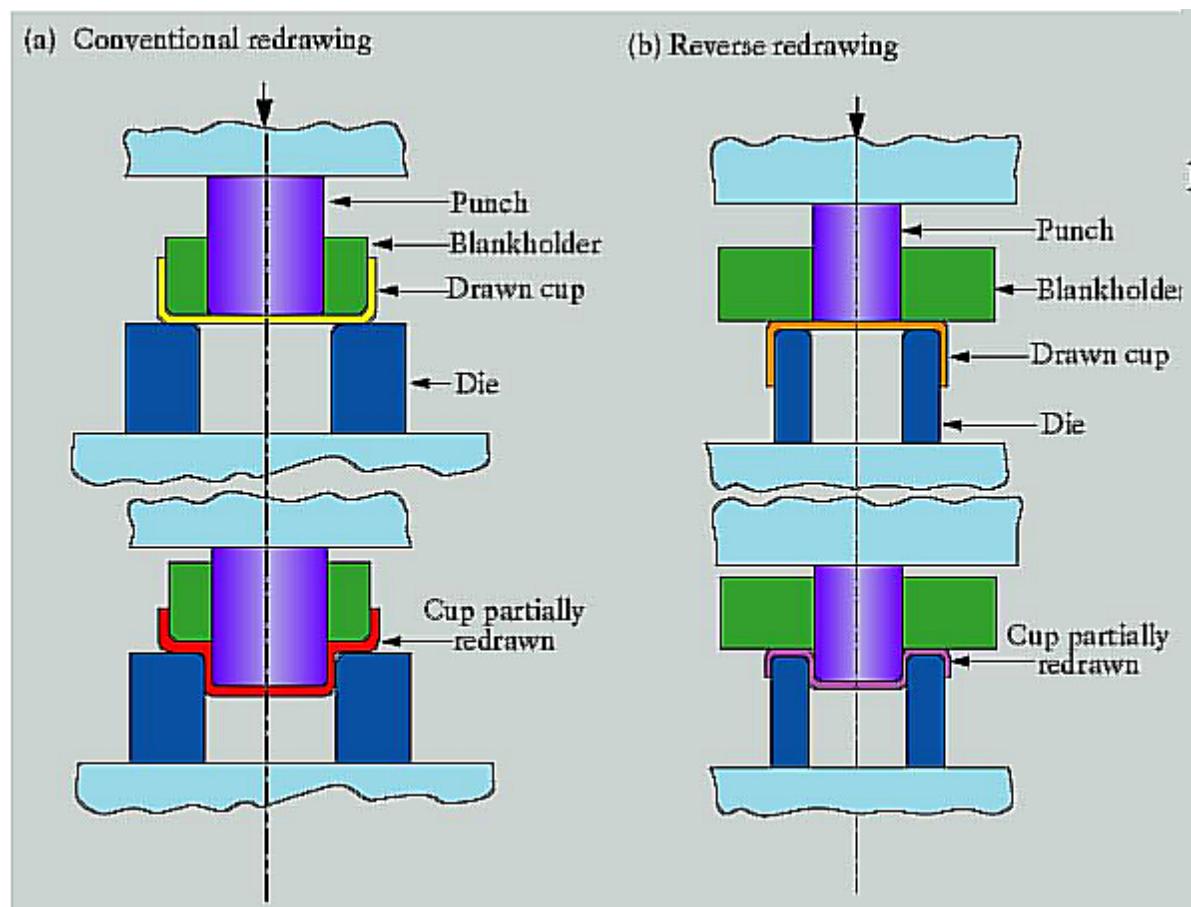


Figura 2.29: Processi per imbutire oltre il limite LDR

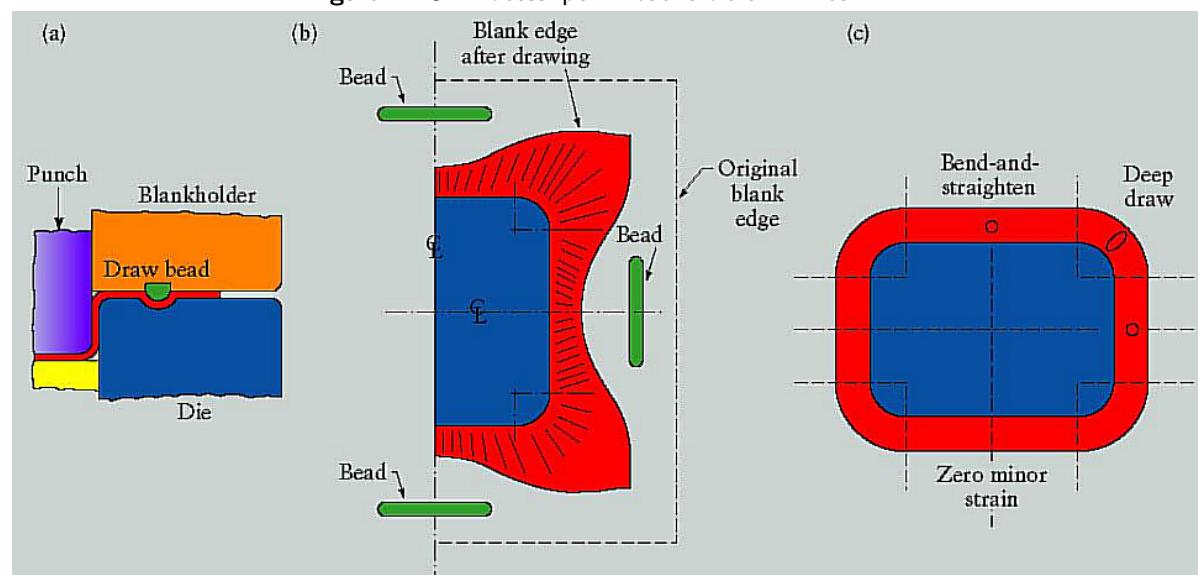


Figura 2.30: Esempio di imbutitura su punzone rettangolare

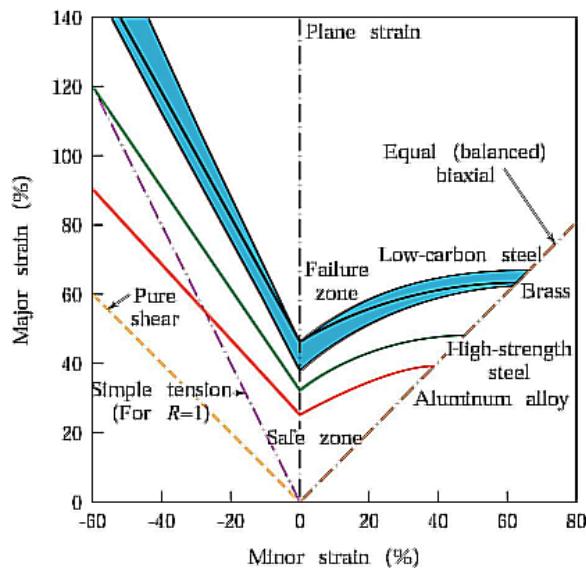


Figura 2.31: Limiti indicativi per la stiro-imbutitura

2.6 Formatura su pressa

Ci sono molti processi non facilmente classificabili ma che condividono alcune caratteristiche con i processi già discussi. Specifici processi di imbutitura sono stati progettati per offrire una maggiore profondità, oppure per realizzare forme più complesse, per ridurre i costi di produzione o una combinazione di queste caratteristiche.

2.6.1 Formatura con stampo in gomma

Si sostituisce uno stampo con un cuscino in gomma e la lamiera si conforma al punzone, in figura 2.32a (spesso realizzato in resina o in lega di zinco). Non c'è bisogno di costose coppie di stampi in acciaio e la presenza di tensioni di compressione e attrito sulla superficie del punzone contribuiscono a ottenere imbutiture più profonde e forme altrimenti difficili da realizzare (ad esempio parti coniche, in figura 2.32b).

2.6.2 Idroformatura

Si sostituisce il cuscino in gomma con un fluido contenuto con un diaframma di gomma. La pressione idraulica viene programmata per tutta la corsa, spesso con CNC, per spingere la lamiera sul punzone e quindi ottenere parti di grande profondità e complessità. In alternativa, la cavità della matrice è sigillata con guarnizioni e la lamiera è deformata direttamente dal fluido, quindi l'attrito viene annullato e il materiale si incrinisce uniformemente. La lamiera precurvata può quindi essere formata intorno alla matrice. Alla figura 2.33 sono riportati i due metodi.

2.6.3 Flangiatura, Aggraffatura, Formatura di colli

Alcuni esempi di piegatura complessa, combinata con compressione e/o stretching, si incontrano nella lavorazione di bordi di semilavorati, di fori, tubi e parti imbutite.

1. La flangiatura di un semilavorato, mostrata in figura 2.34a a (e la flangiatura per contrazione di una lamiera, mostrata in b) mette il bordo esterno in compressione. È simile a un'imbutitura poco profonda e non è richiesta grande duttilità, ma possono verificarsi pieghe.

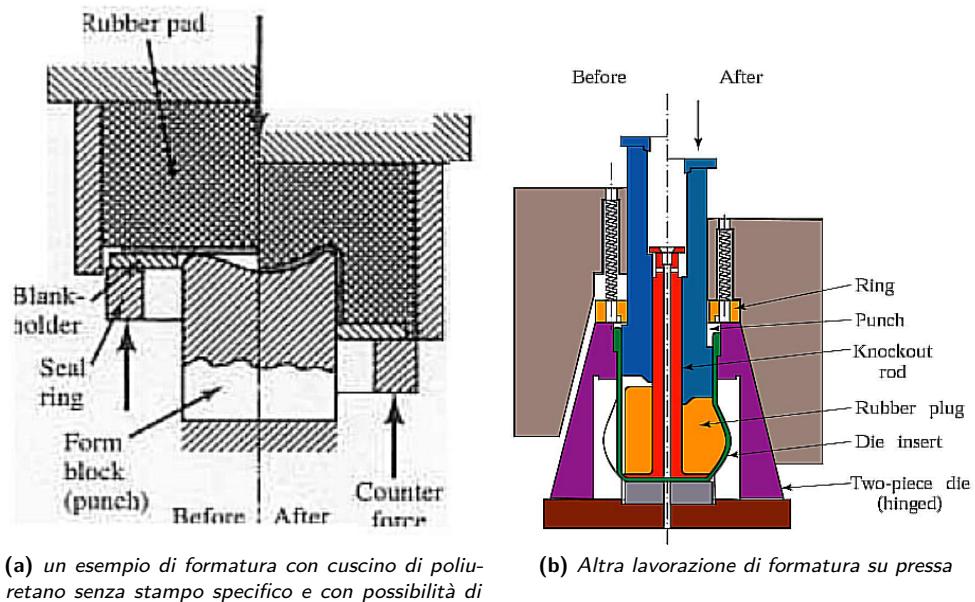


Figura 2.32: Esempi di formatura su pressa in diverse applicazioni

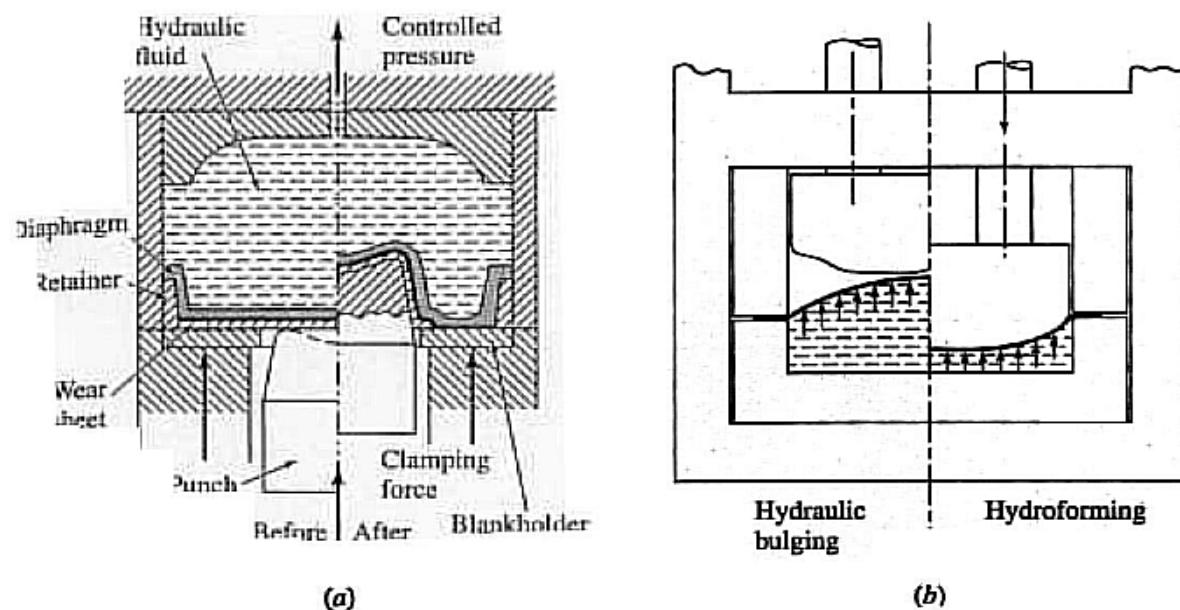


Figura 2.33: Esempi di processi di idroformatura

2. La flangiatura di un foro e la flangiatura per allungamento di una lamiera impongono forti deformazioni di trazione sul bordo. Se sono presenti bave sul bordo tagliato o se il materiale della lamiera contiene inclusioni o altri difetti, la rottura si verifica con una deformazione molto più bassa di quanto ci si sarebbe aspettati dall'allungamento a trazione misurato in assenza di bave. Nei casi critici, per aumentare la duttilità del materiale può diventare necessaria la sbavatura, la rasatura o anche l'alesatura del foro.
3. Forti deformazioni di trazione sono imposte anche nell'espansione o nella flangiatura delle estremità di un tubo (figura c) o di un recipiente imbutito. Al contrario, formare il collo di un tubo o di un contenitore (figura 2.34 d) impone pressioni di compressione; la riduzione che può essere effettuata in un'unica operazione è limitata solo dal collasso assiale del tubo o dalla formazione di pieghe interne. La formatura del collo è un passo importante nella realizzazione di cartucce e cilindri soggetti a pressione.
4. L'aggraffatura è un importante processo di assemblaggio. Una parte in precedenza flangiata è unita ad un'altra parte mediante deformazione continua, come nell'unione del coperchio interno ed esterno del portabagagli, del cofano o degli sportelli delle automobili. Esempi di flangiatura di lamiere e di estremità di un tubo si incontrano nella formazione di doppie cuciture per sigillare scatolelle per alimenti e lattine di bevande, come mostrato nella sequenza in figura 2.34c. In figura 2.34b invece si vede l'esecuzione di un'arricciatura, usata per motivi estetici e per evitare che bordi taglienti di lamiere possano ferire.

2.6.4 Formatura su pressa per tubi espansione idraulica

La deformazione a trazione è tipica del rigonfiamento di tubi, contenitori e prodotti simili, utilizzando spine in schiuma poliuretanica o pressione idraulica. La tecnica rappresenta anche il primo passo nella fabbricazione di soffietti metallici; il tubo pregonfiato forma il soffietto quando è compresso assialmente. La compressione di un soffietto metallico è mostrato nel passaggio dalla figura 2.34.

In un gruppo sempre più importante di processi, tubi senza saldatura o saldati vengono ulteriormente deformati da fluido ad alta pressione. I processi si basano sulla constatazione che deformazioni molto grandi

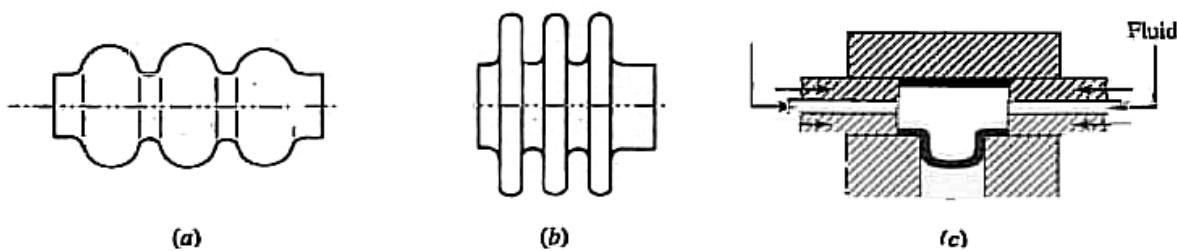
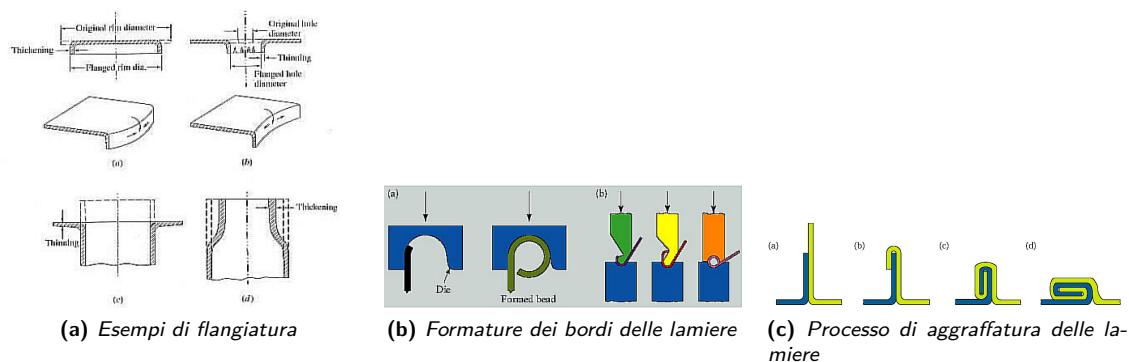


Figura 2.34: Pressatura dei tubi per dare forme particolari come i tubi a soffietto

sono possibili se le sollecitazioni assiali di compressione vengono applicate simultaneamente alla pressione di espansione, come si vede in figura 2.34 c. Il tubo, vincolato in una matrice apribile, è compresso tra due punzoni mentre un fluido pressurizzato viene inserito all'interno. La compressione alle strette permette di ottenere espansioni maggiori. Originariamente il processo è stato applicato a parti come giunzioni in rame a T.

Recentemente la tecnica è divenuta processo di produzione di massa, principalmente nel settore automobilistico, sostituendo la saldatura nella realizzazione di assemblaggi. Il tubo, piegato per avere la forma generale del prodotto finale, viene collocato in una matrice apribile ed è espanso nella cavità della matrice. L'assottigliamento viene arrestato nel momento del contatto con la parete della cavità mentre l'ulteriore sviluppo della forma avviene a scapito della riduzione localizzata dello spessore. Una migliore distribuzione dello spessore viene ottenuta se l'espansione viene condotta inizialmente a bassa pressione mentre i tappi terminali vengono premuti in modo da rendere il flusso di materiale in uno stato combinato di tensione di tensocompressione. La pressione viene quindi aumentata per riempire i dettagli. Se necessario, a questo punto possono anche essere punzonati dei fori. Un Esempio è quello della figura 2.35.

2.7 Lavorazioni a caldo

le lavorazioni a caldo sono richieste nel momento in cui:

- Sono richieste forze troppo alte.
- Materiali che non possono essere deformati a freddo.
- Formatura superplastica.

2.7.1 Formatura superplastica

Si può sfruttare su poche leghe metalliche. È una lavorazione estremamente lenta, perciò si utilizza per pochi pezzi ad alto valore aggiunto come per l'aeronautica militare. È sempre in accoppiata con la diffusion bonding che verrà riportata al capitolo 15 a pagina 129.

Un esempio di prodotti realizzati tramite questa tecnica sono i pannelli sandwich.

Vengono inseriti dei distanziali per evitare che le due lamiere si saldino. Viene poi fatto passare un fluido in pressione per dare la forma dello stampo.

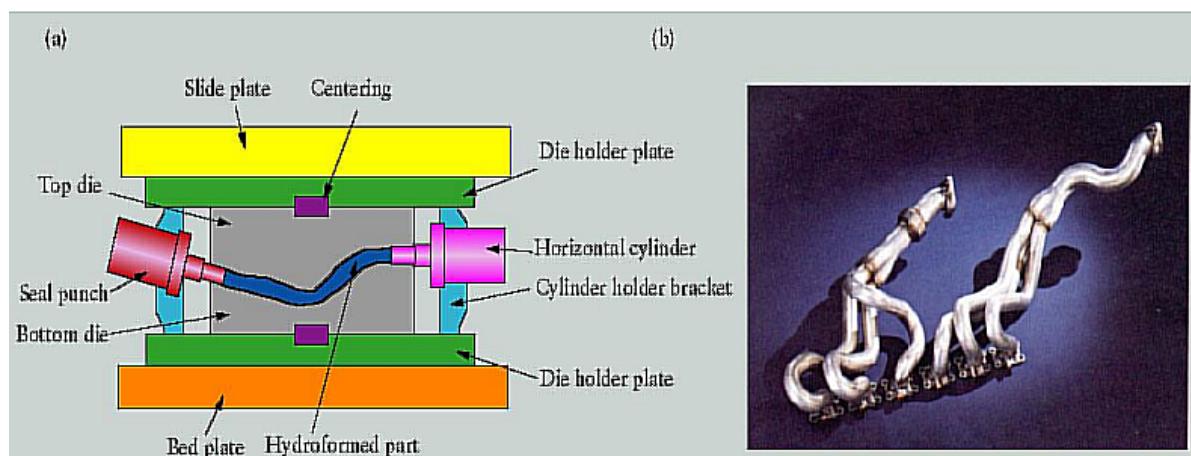


Figura 2.35: Realizzazione di tubi per formatura, utilizzata per la realizzazione dei sistemi di scarico automobilistici

Si tratta di una lavorazione ad alte temperature, con velocità di deformazione molto lenta, ottenendo dei grani cristallini abbastanza fini. Si ottengono delle proprietà meccaniche interessanti ma è possibile che il materiale risenta del creep.

Si può avviare al problema con una ricottura aumentando, però, la dimensione dei grani.

2.8 Potenzialità delle lavorazioni a freddo

I processi di lavorazione della lamiera sono molto versatili, ma devono essere riconosciute alcune limitazioni sulle forme ottenibili. Le dimensioni spaziano in un'ampia gamma, dai componenti elettronici in miniatura a parti laterali della carrozzeria di auto da 4 m di lunghezza e pelli di ali per i Boeing 747 da 25 m di lunghezza lavorate con la pallinatura. Le tolleranze possono essere molto strette e molti processi realizzano parti net-shape. La progettazione dei componenti deve tener conto di specifiche limitazioni.

Nella traciatura, il materiale di scarto rappresenta perdita di materiale. La larghezza minima dello scarto è limitata dal pericolo di tirare il materiale nella luce tra punzone e matrice ed è tipicamente $w = 2h$, ma può essere ridotta a $w = h$ con un'alta pressione del premi-lamiera e una lamiera più spessa e più rigida. I diametri dei fori possono essere raramente inferiori allo spessore della lamiera e devono essere almeno $2h$ con i materiali più duri. La forma delle parti dovrebbe consentire un nesting con poco scarto o anche senza. L'utilizzo del materiale può essere ottimizzato mediante un appropriato layout e nesting delle parti, un'arte che è notevolmente aiutata da programmi informatici. La produttività è ulteriormente aumentata e le perdite di materiale vengono ridotte con la sovrapposizione di più strisce di parti da una striscia più larga. Passando alla piegatura, il raggio minimo delle parti piegate è determinato dall'esigenza di evitare la frattura o, se l'aspetto o la finitura lo richiedono, dalla comparsa della strizione. Il raggio massimo è raggiunto quando non c'è deformazione plastica. Lo springback aumenta con l'aumento del rapporto R_b/h e la progettazione del processo deve prevedere la compensazione. Se la piegatura è combinata con l'allungamento, sono possibili rapporti di R_b/h molto grandi, a condizione che l'attrito sia abbastanza basso per assicurare lo scorimento sullo stampo.

Le parti formate per stiramento subiscono assottigliamento. Questo in realtà è un vantaggio quando il materiale incrudisce, e l'assottigliamento è un mezzo importante per aumentare la resistenza all'ammaccatura di un componente. Lo scorimento sulla superficie del punzone e quindi l'incrudimento possono essere favoriti evitando caratteristiche geometriche che ostacolino lo scorimento e con l'applicazione di un lubrificante efficace nel processo. Uno stiramento maggiore può essere raggiunto con un progetto che imponga sollecitazioni trasversali. Le più semplici forme imbutite (recipienti cilindrici piatti) con un raggio del fondo compreso tra 5 e 10 volte lo spessore sono le più favorevoli. Pareti più sottili sono facilmente ottenute stirando. Recipienti a gradini possono essere facilmente realizzati con imbutiture multiple. Le forme coniche sono più difficili; un recipiente a gradini può essere trasformato in un cono, ma si vedranno le linee prodotte dallo stampo. Occorre considerare processi alternativi come l'idroformatura e la tornitura in lastra. Forme più complesse richiedono una successione di operazioni, i maggiori costi di produzione possono essere giustificati se più componenti possono essere sostituiti con uno solo.

Parti di forma rettangolare o irregolare possono essere imbutite o sottoposte a imbutitura-stiratura. In generale, angoli stretti e dettagli locali profondi rendono difficile la produzione, ma non impossibile, come esemplificato da coppe dell'olio motori e molti altri componenti delle carrozzerie d'auto. Modifiche minori (e funzionalmente insignificanti) della forma del pezzo (tipicamente, raggi di curvatura più ampi) spesso forniscono le soluzioni più economiche per i problemi di produzione. La modellazione del flusso di metallo è già in grado di aiutare nel fare la prima valutazione sulla fattibilità di produzione di una parte. La varietà di forme può essere ulteriormente ampliata se le limitazioni usuali sono meno stringenti. Un buon esempio è il vassoio a più compartimenti per la cena in cui le pieghe non sono solo consentite ma anche incoraggiate. Questo fornisce la rigidità necessaria, facilitando anche imbutiture profonde che supererebbero la formabilità delle lame in lega dura di alluminio.

Tabella 2.1: Potenzialità delle lavorazioni a freddo, A indica capacità ottima, E la peggiore
Forming process

Characteristics	Blanking	Bending	Stretching	Deep Drawing	Stretch-Drawing	Rubber Forming	Spinning
	All F0-2, T7	All R3; B3; S0, 3, 7; SS; T3; F3, 6	All F4; S7	All T4; F4, 7	All F4; S7	All As blanking, bending, drawing	All T1, 2, 4, 6; F4, 5
Max. thickness, mm	10	100	2	5	2	2	25
Cost[†]							
Equipment	B-D	C-E	B-C	A-C	A-C	A-C	B-D
Die	C-E	B-E	A-C	A-B	A-C	C-D	B-D
Labor	C-E	B-E	B-E	C-E	B-E	A-D	B-C
Finishing	D-E	D-E	C-E	D-E	C-E	B-D	D-E
Production							
Operator skill [†]	D-E	B-E	B-E	D-E	B-E	C-E	A-C
Lead time	Days	Hours-days	Days-months	Weeks-months	Days-months	Days	Days
Rates (piece/h)	10^2 - 10^5	10 - 10^4	10 - 10^2	10 - 10^4	10 - 10^4	10 - 10^2	10 - 10^2
Min. quantity	10^2 - 10^4	1 - 10^4	10 - 10^5	10^3 - 10^5	10^3 - 10^5	10 - 10^2	1 - 10^2

Tabella 2.2: Possibili forme ottenibili per deformazione a freddo

Abbreviation	Increasing spatial complexity →							
	0 Uniform cross section	1 Change at end	2 Change at center	3 Spatial curve	4 Closed one end	5 Closed both ends	6 Transverse element	7 Irregular (complex)
R(mond)								
R(ar)								
S(section, open) SS(closed)								
T(ube)								
F(lit)								
Spherical)								
U(indented)								

Parte II

Sitenrizzazione

CAPITOLO 3

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.

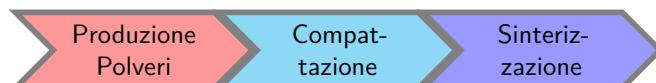
Per i prodotti lavorati in sinterizzazione si parla di Net- Shape: ovvero, la lavorazione porta dei semilavorati già molto vicini alla forma finale di vendita del prodotto. Ciò permette di usare tutto il materiale, senza avere sprechi dovuti a delle lavorazioni che per ottenere la forma finale, devono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

3.1 La lavorazione

Alla figura 3.1 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.

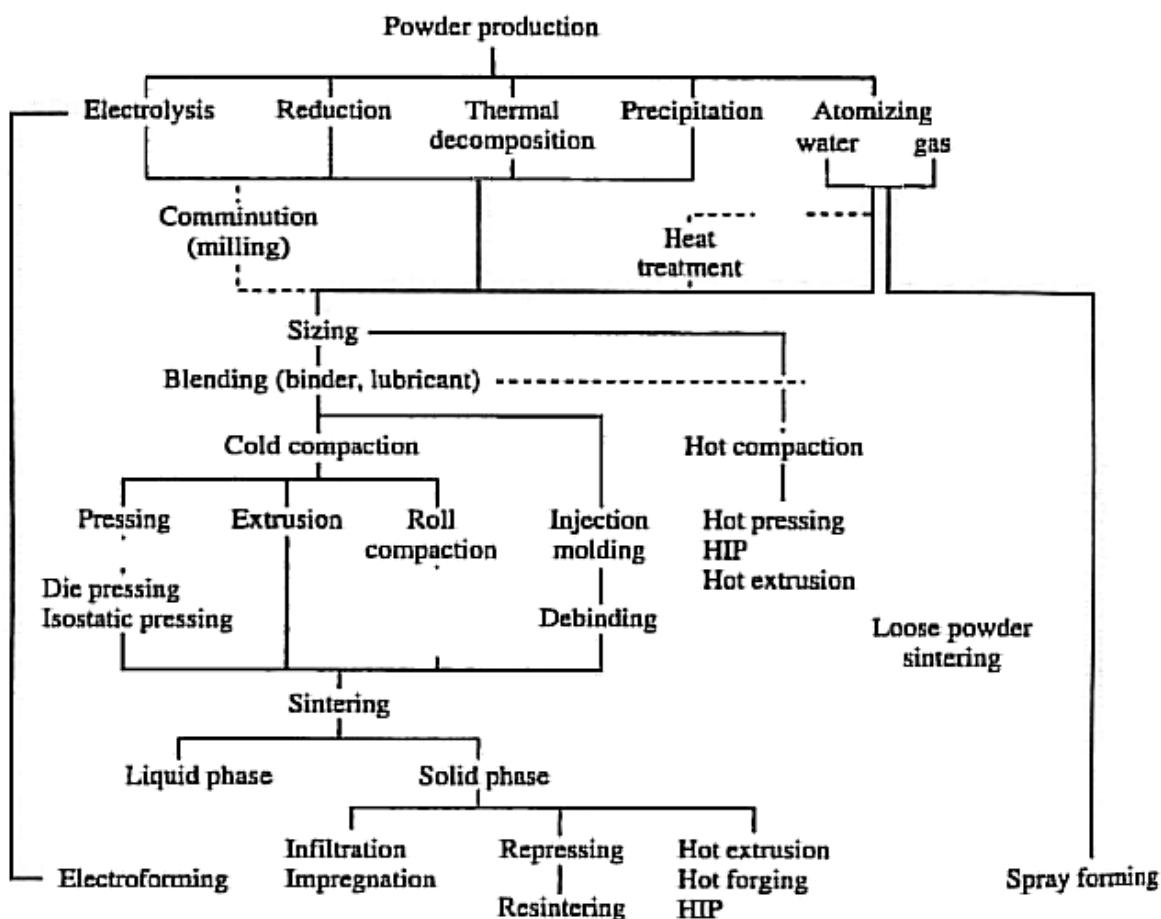


Figura 3.1: Processi di produzione in sinterizzazione

3.1.1 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 3.1, 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 3.2:

1. Frammentazione per fluido, in figura 3.2a: 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 del 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 3.2b: 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 3.2c: 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 si molto fragile.

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

3.1.1.1 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.

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.

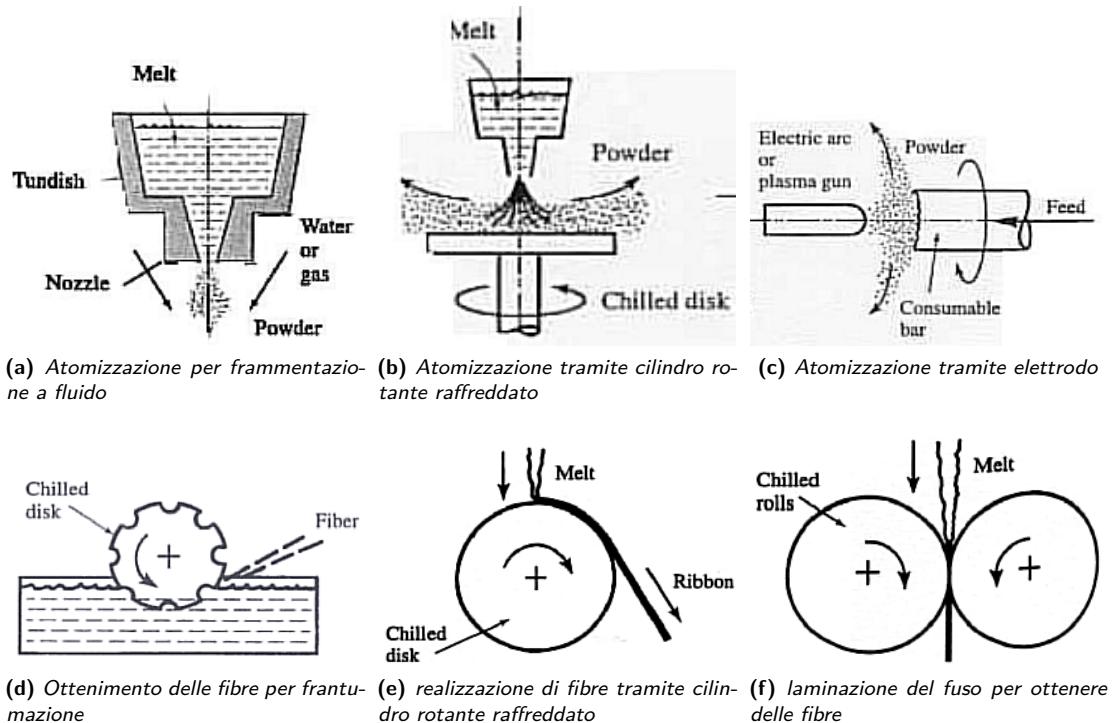


Figura 3.2: Principali modalità di atomizzazione e realizzazione delle fibre

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.

3.1.2 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.

3.1.2.1 Miscelazione

La miscelazione viene sfruttata per raggiungere determinati obiettivi.

1. Mescolare grani di polveri di diverse dimensioni per garantire minore porosità residua;
2. Modificare la reologia delle tensioni applicate;
3. Modificare o cercare diversa densità;
4. Composizione o caratteristiche funzionali: come ad esempio la fusione di materiali non miscibili tra loro tipo: Fe-Cr.
5. Aggiunta di additivi: come lubrificanti per permettere alla polvere di scivolare meglio, coadiuvanti della sintetizzazione. Leganti per mantenere le particelle legate tra loro in verde. Sospensioni usate per lo stampaggio ad iniezioni. Essicatura spray.

3.1.3 La compattazione

Al termine della compattazione si ha il così detto **corpo in verde** cioè un semilavorato sufficientemente resistente per poter essere maneggiato ma non ancora in legame definitivo.

Al grafico 3.3a si confronta la dimensione delle particelle fine e grossolane immesse nello stampo per ottenere una certa densità apparente. Mentre, al grafico 3.3b viene riportata la resistenza meccanica in funzione della pressione di compattazione.

3.1.3.1 Come compattare?

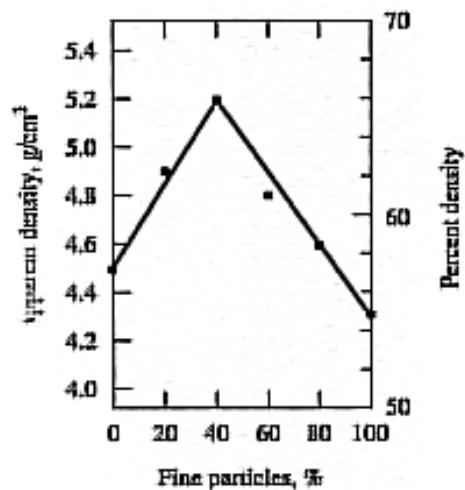
Pressatura a freddo La pressione sarà massima vicino al punzone e man mano cala allontanandosi dal punzone, si evidenzia in figura 3.3c dalle particelle più raffittite in vicinanza del punzone e via via più "rarefatte". Per migliorare la compattazione si aumentano i numeri di punzoni: nel senso che si fa in modo di avere un doppio punzone oppure di avere una matrice flottante, sono i casi delle figure 3.3d.

La resistenza in verde serve per poter spostare il materiale nella linea di produzione. La densità del pezzo arriva fino a 90% della densità vera. Ciò è vero solo se l'altezza è piuttosto sottile. Altrimenti sono necessarie altre tecniche di compattazione.

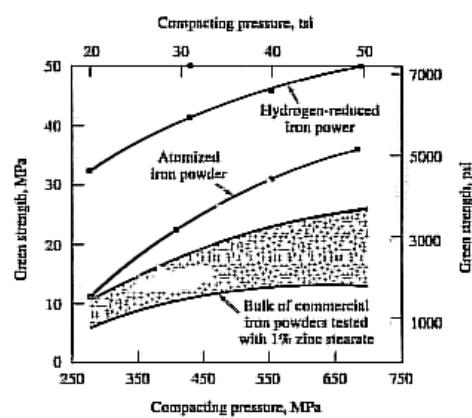
A titolo esemplificativo, alla figura 3.4 Viene riportata una pressatura per un oggetto con diversi particolari. A dimostrazione che la compattazione può essere eseguita per forme molto articolate.

Pressatura idrostatica si impongono delle compressioni idrostatiche da più direzioni per migliorare la compattazione. In generale si utilizza uno stampo elastico, che successivamente viene messo in pressione con un fluido.

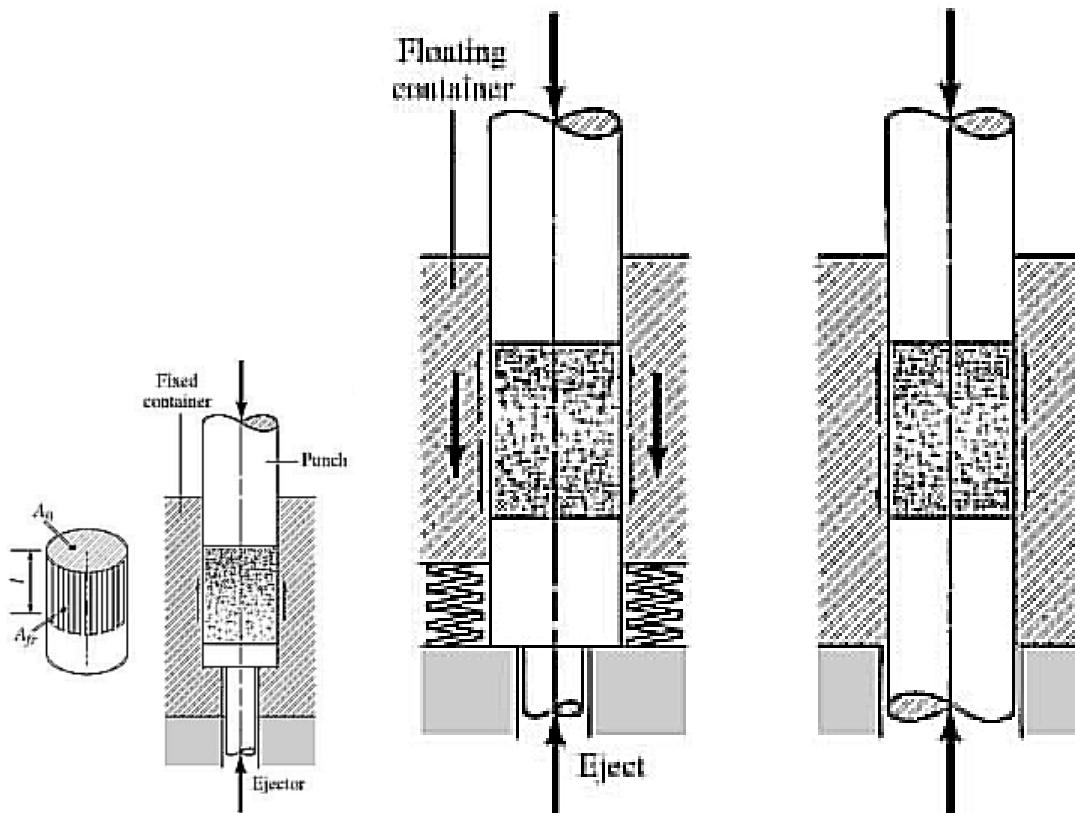
La varietà di forme ottenibili con queste tecniche è più alta per via del fatto che si riesce a compattare meglio la polvere in più direzioni. Aumenta considerevolmente il tempo ciclo t_c perché gli stami devono essere preparati e portati in pressione. Le figure 3.5 è un esempio. Tempi ridotti si hanno nel caso della pressatura a sacco asciutto (seconda delle figure 3.5) ma diminuisce il numero di forme ottenibile. Può essere che lo stampo, in genere poliuretanico, venga scaldato per imporre più resistenza al materiale verde.



(a) Densità relativa alla dimensione delle particelle immesse nello stampo



(b) Resistenza del verde in funzione della pressione di compattazione



(c) Pressatura a freddo semplice della polvere

(d) Tecniche di diminuzione del gradiente di pressione sul compattato

Figura 3.3: Parametri da considerare durante la compattazione della polvere e compattazione a freddo

Si può pensare di aumentare la varietà di forme ottenibili con la pressatura attraverso successive lavorazioni per asportazione di polvere all'oggetto in verde.

3.1.3.2 Stampaggio ad iniezione

Viene particolarmente usata per i materiali plastici, anche per la compattazione per la sinterizzazione. Nel secondo caso è necessario che vengano aggiunti degli additivi per fluidificare le polveri permettendo un certo flusso all'interno degli stampi. In genere vengono usati come additivi: cere e materiali termoplastici. Ciò implica che anche le polveri abbiano dimensioni contenute. Purtroppo, si avranno delle tolleranze geometriche e di porosità parecchio scarse post sinterizzazione.

Il processo illustrato alla figura 3.6 funziona in più fasi:

1. Una tramoggia alimenta un tubo contenente una vite infinita che ruota e trasla con moto alternativo.
2. Le particelle si scalzano a causa della viscosità e frizione reciproca. Vale che, soprattutto per i polimerici, fluidificandosi aumenta la viscosità.
3. Man mano che più materiale viene accumulato sull'estremità della vite, questa arretra.
4. Accumulato sufficiente materiale la vite spingerà il materiale all'interno dello stampo.

A seconda se la materia è termoplastica o termoindurente, lo stampo verrà raffreddato o riscaldato rispettivamente.

Può essere che i macchinari vengano assistiti da resistenze per aumentare la temperatura interna in fase di avvio, quando il materiale è completamente freddo o se necessario avere temperature più alte di quelle raggiungibili per effetto della sola viscosità. Eventualmente, può essere necessario un sistema di raffreddamento per tenere controllata la temperatura.

Le forme ottenibili con questo stampaggio possono essere più complicate di quelle realizzati tramite compattazione.

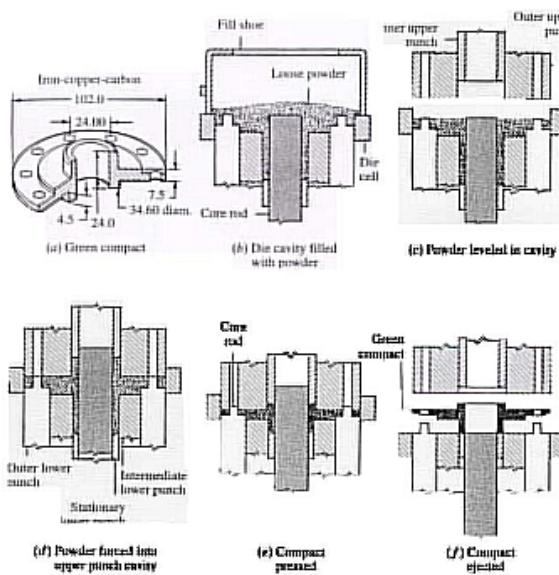


Figura 3.4: Esempio di pressatura a freddo di un oggetto particolarmente complicato

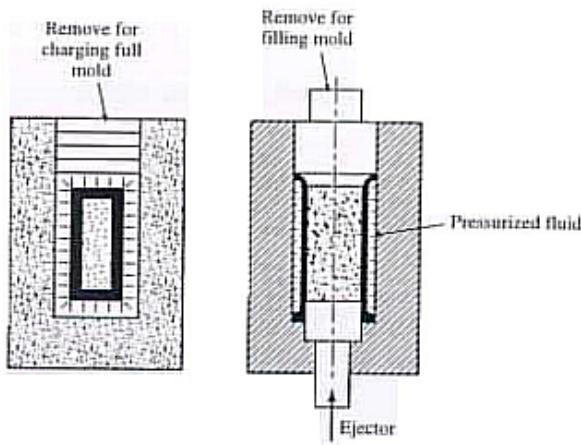


Figura 3.5: Pressatura idrostatica a sacco bagnato e asciutta

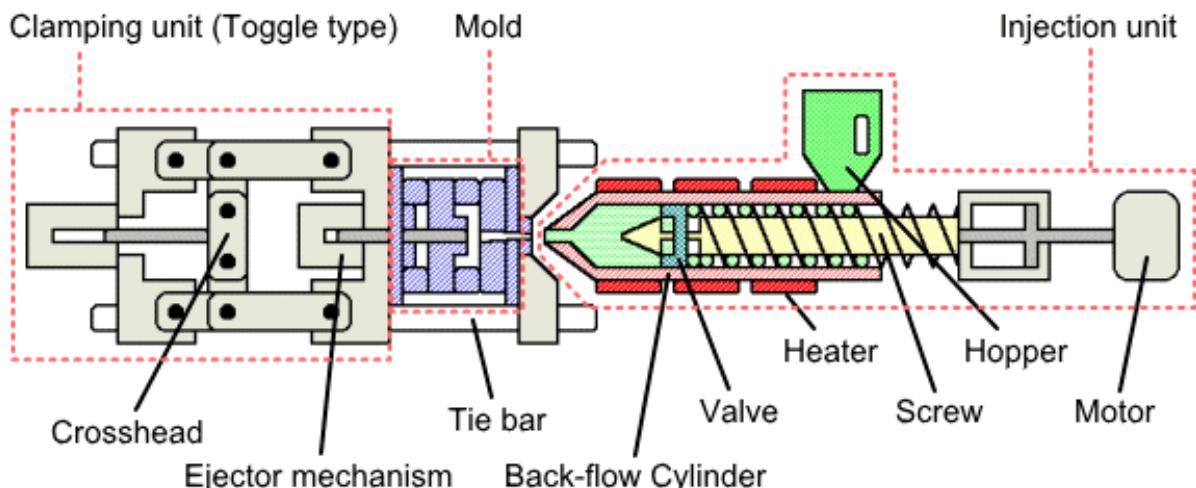


Figura 3.6: Esempio di Injection Molding

Stampaggio di precisione Sono tecniche utilizzate in particolare per materiali termoindurenti. In questo caso si ha la polvere rivestita di materiale termoindurente legato con legante solubile in acqua. Durante la sinterizzazione il materiale termoindurente sarà volatilizzato.

3.1.4 Sinterizzazione

Il materiale compattato viene portato in forno e succede:

Asciugatura tutti i liquidi vengono espulsi. Il tempo di asciugatura dipende dallo spessore massimo del pezzo. Non può essere troppo veloce altrimenti durante la volatilizzazione può spaccare il pezzo. Se il legante organico può essere volatilizzato come ossigeno.

Sinterizzazione L'energia ai bordi favorisce le giunzioni e la diffusione. Le temperature sono tipiche delle lavorazioni a caldo ovvero $T \approx 0.7 \div 0.9 T_m$. Le giunzioni si allargano, diminuisce il rapporto superficie-volume si abbassa l'energia potenziale del materiale. C'è un certo ritorno per la diminuzione della porosità. Se la riduzione di volume è prevedibile, è possibile prevedere la riduzione, dunque si può

stimare quanto materiale in più porre nell'oggetto in verde. La porosità compromette la resistenza a fatica.

Come si vede dalla figura 3.7, una volta ottenuta la fusione delle particelle, tenere il materiale per troppo tempo ad alta temperatura si rischia di aumentare troppo la dimensione dei grani, peggiorando di molto le caratteristiche meccaniche. Si può migliorare la situazione nel caso uno degli elementi miscelati sia bassofondente. Allora la fusione aumenta la pressione sui grani altopondenti garantendone le dimensioni piccole. Normalmente sarebbe un difetto. In questo caso, essendo transitorio, per mettere al bassofondente di mettere in pressione i grani altopondenti. Dopo avviene una reazione chimica per cui il bassofondente si lega all'altro materiale.

3.1.1 Definizione (Capillarità): la capacità dei fluidi di distribuirsi in mezzo a spazi stretti a discapito della gravità. È critica la dimensione allo spazio piccolo.

Spesso si conducono delle prove per stimare il ritiro in questo modo: Ad esempio in considerazione della massa:

$$\text{cost.} = \rho_{green} V_{green} = \rho_{sint} V_{sint} \quad (3.1)$$

Allora il ritiro volumetrico può essere stimato come:

$$\frac{V_{sint}}{V_{green}} = \frac{\rho_{green}}{\rho_{sint}} \quad (3.2)$$

da cui:

$$\text{Ritiro lineare} = \left(\frac{\rho_{green}}{\rho_{sint}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.3)$$

I fornì per la sinterizzazione possono essere:

Classici Sono dei fornì molto simili a quelli casalinghi, in cui tramite uno sportello frontale è possibile accedere alla camera. Sono in genere in grado di realizzare il ciclo di sinterizzazione: asciugatura, sinterizzazione, raffreddamento.

Continui tramite un nastro trasportatore i pezzi in verde attraversano diverse zone del forno corrispondenti alle fasi.

La porosità residua si attesta attorno a 4% ÷ 15%. Se interconnessa viene sfruttata per realizzare filtri e cuscinetti.. Possono rimanere zone più o meno compatte: sfruttandole per garantire determinate caratteristiche in zone maggiormente sollecitate. Sono più difficili da lavorare per via dei continui urti tra superfici sinterizzati e utensile.

3.1.5 Finiture e trattamenti termici

Coniatura è una lavorazione di forgiatura a freddo in assenza di lubrificazione migliorando le tolleranze dimensionali.

Mentre trattamenti termici possono essere:

3.1.5.1 Ricompattazione e risinterizzazione

Viene eseguito il processo più volte. Si compatta con la stessa pressione.

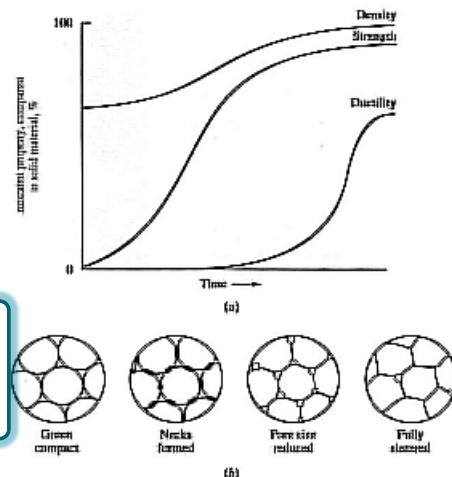


Figura 3.7: Caratteristiche meccaniche raggiunte dal prodotto in verde durante la sinterizzazione dopo diverso tempo e sequenza del processo

3.1.5.2 La porosità fa comodo:

La porosità può essere utile per diversi obiettivi:

Impregnazione con olio la porosità vengono riempite con lubrificanti per garantire lubrificazione in esercizio.

Infiltrazione non è altro che l'impregnazione con un metallo bassofondente.

3.1.6 Compattazione a caldo

Il processo prevede compattazione e sinterizzazione simultaneamente. Le particelle si muovono e talvolta vengono deformate, portando all'annullamento della porosità.

3.1.6.1 HIP: Hot Idrostatic Pressing

Vengono inserite le polveri all'interno metallico deformabile, in questo modo possono essere già inizialmente prive di aria. Il processo prevede che il recipiente venga messo all'interno di un forno e successivamente in una camera pressurizzata.

I prodotti ottenuti tramite questo processo hanno costo più alto in genere, ma sono di qualità nettamente superiore rispetto ai normali sinterizzati.

Con questo metodo possono essere lavorati degli oggetti presinterizzati al 92 ÷ 95% per eliminare la porosità residua con polvere ceramica o con metallo tenero. Per successive lavorazioni si utilizza un involucro metallico che resiste alle alte temperature. Le proprietà meccaniche possono essere superiori a quasi tutte le altre lavorazioni viste fin ora.

Questa tecnica viene utilizzata per realizzare oggetti con le superleghe e leghe ad alta entropia.

Un ulteriore tecnica di sinterizzazione è quella della deposizione a spruzzo, secondo cui vengono realizzate le polveri attraverso atomizzazione. Poi vengono depositate su un supporto specifico e poi sinterizzate nelle modalità più opportune. Per esempio questa tecnica viene utilizzata per rivestimenti in lega ad alta entropia.

3.2 Prodotti sinterizzati

La sinterizzazione è competitiva per componenti strutturali perché non si spreca materiale e si evitano fasi intermedie del processo produttivo. Nelle superleghe si evita la segregazione degli alliganti. Alla tabella 3.1 vengono riportati quali materiali vengono lavorati tramite sinterizzazione.

Tra i prodotti sinterizzati troviamo:

- Supporti autolubrificanti
- Realizzazione di strumenti chirurgici
- Alcuni materiali che possono essere lavorati solamente tramite sinterizzazione.
- Materiali magnetici teneri, difficili da lavorare alle macchine utensili: magneti permanenti.
- Nelle leghe rese resistenti mediante dispersione un ossido stabile previene la migrazione verso i bordi e lo scorrimento.
- Utensili in acciaio rapido
- Carburi cementati per utensili.

Alla tabella 3.2 vengono confrontate le tecniche di sinterizzazione in termini di prodotti realizzabili, tempo ciclo e altre variabili di processo.

Mentre alla tabella 3.3 vengono rappresentate quali siano le forme ottenibili tramite sinterizzazione. In generale sono problematiche le forme in cui lo stampo non sia più estraibile dalla geometria una volta raggiunto il prodotto in verde.

Tabella 3.1: Principali materiali impiegati nei processi di sinterizzazione

Metal	Shipments, 1000 Mg [†]	
	1972	1997
Iron and steel	139.0	350.0
Copper and alloys	24.3	22.0
Aluminum	81.5	40.0
Molybdenum	1.6	2.3
Tungsten	4.6	0.6
Tungsten carbide		5.7
Nickel	4.3	10.4
Tin		0.9

Tabella 3.2: Confronto tra le lavorazioni possibili in sinterizzazione: A indica valori migliori, E quelli peggiori

Characteristics	Process				
	Conventional	HIP	Injection Molding	Precision Injection Molding	Preform Forging
<i>Part</i>					
Metal [‡]	AII	All (super, SS)	All (steel, SS)	All	steel, super
Shape [†]	Not S3, T2, 3, 5, 6, F3, 5, U	Not T5, F5	Not T5, F5, U1, 4	Not T5, F5, U2, 4	Not S3, T2, 3, 5, 6, F3, 5, U
Surface detail [‡]	B	B-C	B	A	A
Mass, kg	0.01-5 (30)	0.1-10 not encapsulated 10-7000 encapsulated	0.01-0.2	0.005-0.2	0.1-3
Min. section, mm	1.5			0.1	3
Min. core diam., mm	4-6		1	0.2	5
Tolerance, ±%	0.1	2	0.3	0.1	0.25
<i>Cost[‡]</i>					
Equipment	B-C	A	A-B	A-B	A-B
Die	B-D	B-C	A-B	A-B	A-B
Labor	D-E	C-D	D-E	D-E	D-E
Finishing	C-E	B-D	C-E	D-E	D-E
<i>Production</i>					
Operator skill [‡]	D-E	D-E	D-E	D-E	D-E
Lead time	Weeks	Weeks	Weeks	Weeks	Weeks-months
Rates (pieces/h)	100-1000	5-20	100-2000	100-2000	200-2000
Min. quantity	1000-50 000	1-100	10 000	10 000	100 000

Tabella 3.3: Forme geometriche ottenibili tramite sinterizzazione, in giallo le forme che non sono realizzabili tramite sinterizzazione

Abbreviation	0 Uniform cross section	1 Change at end	2 Change at center	3 Spatial curve	4 Closed one end	5 Closed both ends	6 Transverse element	7 Irregular (complex)
R(round)								
B(sr)								
S(selection, open) SS(emiclosed)								
T(ube)								
F(lai)								
Sp(spherical)								
U(ndercut)								

3.2.1 Potenzialità della sinterizzazione

Sicuramente sarebbe meglio evitare gli spigoli altrimenti la frizione della polvere sugli stampi rischia di compromettere la durata degli stessi. In più, sebbene la polvere la si possa trasportare abbastanza facilmente, considerandola quasi come un fluido non si comporta sicuramente come acqua. Per cui non è possibile spingere un fluido a base di polveri attraverso stampi con geometrie troppo fine.

Sin considerano allora degli **Angoli di sforno** per poter garantire la separazione del compattato e il punzone o stampo. In più visto che la pressatura è abbastanza critica come lavorazione, è opportuno fare questa considerazione:

$$\begin{cases} h/d = 2 & \text{con compattazione a singolo punzone} \\ h/d = 4 & \text{con compattazione a più punzoni} \end{cases} \quad (3.4)$$

Dove:

h altezza massima del prodotto

d larghezza massima del prodotto

In generale non sono possibili fori trasversali, almeno nella sinterizzazione standard. Eventualmente con pressature complesse si può pensare di realizzarli. La complessità in pianta di un oggetto realizzato per

sinterizzazione può essere sostanziale, basta realizzare il sistema punzoni matrici opportunamente. Si possono compattare più oggetti separatamente, "assemblerli", per poi sinterizzarli assieme come prodotto finito. Così si possono eliminare successivi processi di giunzione.

Sinterizzati con spessori elevati sono sconsigliati perché la struttura interna tende a collassare.

3.2.2 Elettroformatura

Attraverso un bagno elettrolitico in cui l'anodo cede cationi al catodo. Utile per realizzare forme più complesse di quelle realizzabili tramite sinterizzazione. Si rende necessario che lo stampo di forma sia il negativo di quello che si vuole ottenere. Un esempio è quello della figura 3.8.

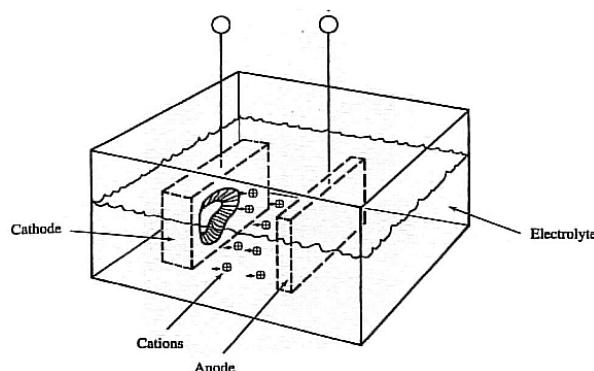


Figura 3.8: Esempio di processo di elettroformatura

Parte III

Asportazione di truciolo

CAPITOLO 4

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.

4.1 Introduzione

Nelle lavorazioni viste fin ora si portava il materiale a deformazione, anche per la traciatura 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 4.1 sono riportati alcuni vantaggi e svantaggi di tali lavorazioni.

Esempio. 4.1.1: 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 permesse 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.

4.2 Taglio ortogonale ideale

Alla figura 4.1 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 4.2.

4.2.1 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:

$$r_c = \frac{h}{h_c} = \frac{l_c}{l} := \text{Rapporto di taglio} \quad (4.1)$$

Dove:

l_c è la lunghezza del truciolo

l è la lunghezza del taglio

Mentre:

$$F = K \cdot A \quad (4.2)$$

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 4.1b; 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

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \quad (4.3)$$

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.

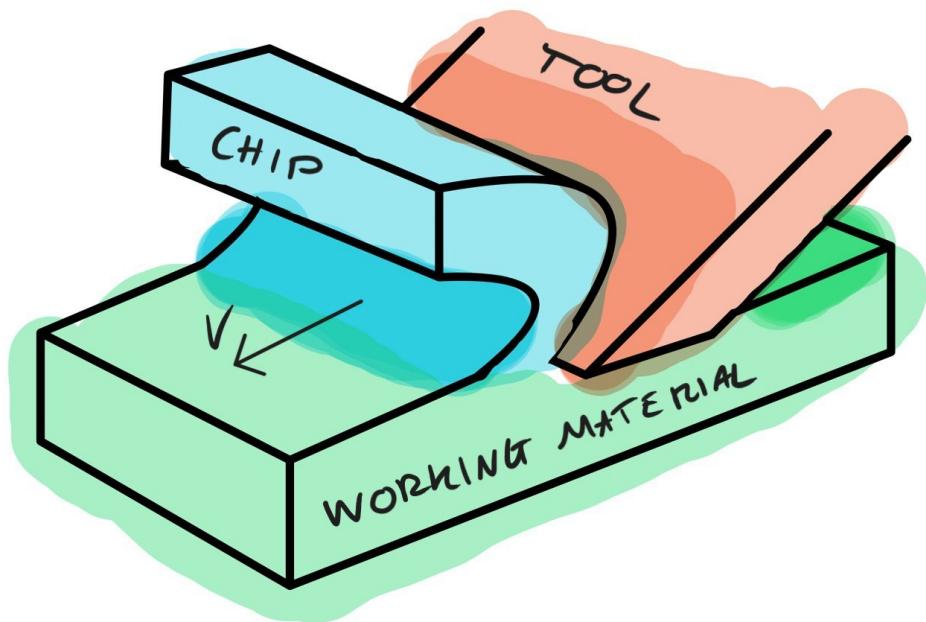
Risulta utile prestare attenzione alla successiva considerazione. Il valore di deformazione che si raggiunge con le lavorazioni per asportazione di truciolo è nettamente più alto che non le deformazioni per lavorazioni tramite deformazione. Giusto per dare un'idea dell'ordine di grandezza:

$$\dot{\gamma} = \frac{v_s}{d} = \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \frac{v}{d} [\text{s}^{-1}] \quad (4.4)$$

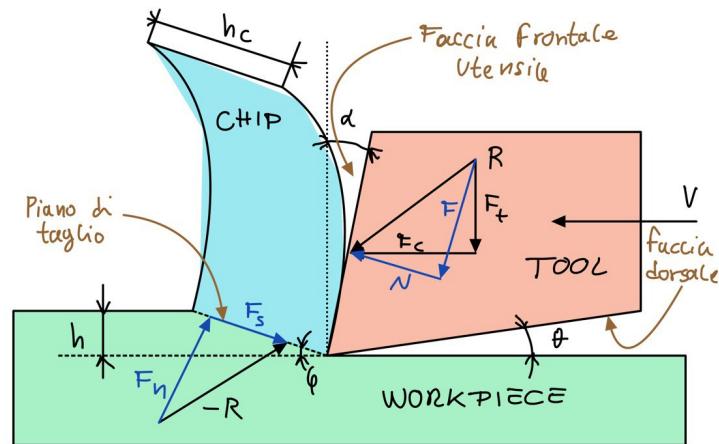
nella tecnica, si osservano i seguenti valori:

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

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



(a) Visualizzazione del taglio ortogonale



(b) Parametri del taglio ortogonale

Figura 4.1: Taglio Ortogonale

4.2.1 Fattore di attrito

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

$$\mu = \frac{\tau_i}{p} \quad (4.5)$$

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 (4.5) non descrive completamente il comportamento. Si è sviluppato un fattore di attrito adatto a tale fenomeno:

$$m = \frac{\tau_i}{K} \quad (4.6)$$

Dove K è la tensione tangenziale all'interfaccia truciolo-utensile. Nella pratica viene preferito il fattore descritto dalla (4.6) perché più facile da calcolare. Oltre al fatto che permette di descrivere correttamente il fenomeno dello sticking.

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

4.2.2 Valutazione delle forze

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

Porta utensile

Considerando la scomposizione delle forze della figura 4.2. 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:

$$\begin{cases} F_c = R \cos(\alpha + \psi) & \text{Forza di taglio} \\ F_t = R \sin(\alpha + \psi) & \text{Forza di spinta dell'utensile} \end{cases} \quad (4.7)$$

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 4.2.

$$\begin{cases} N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \\ F = F_c \sin \alpha - F_t \cos \alpha \end{cases} \quad (4.8)$$

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

$$\beta = \frac{F}{N} \approx \mu \quad (4.9)$$

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

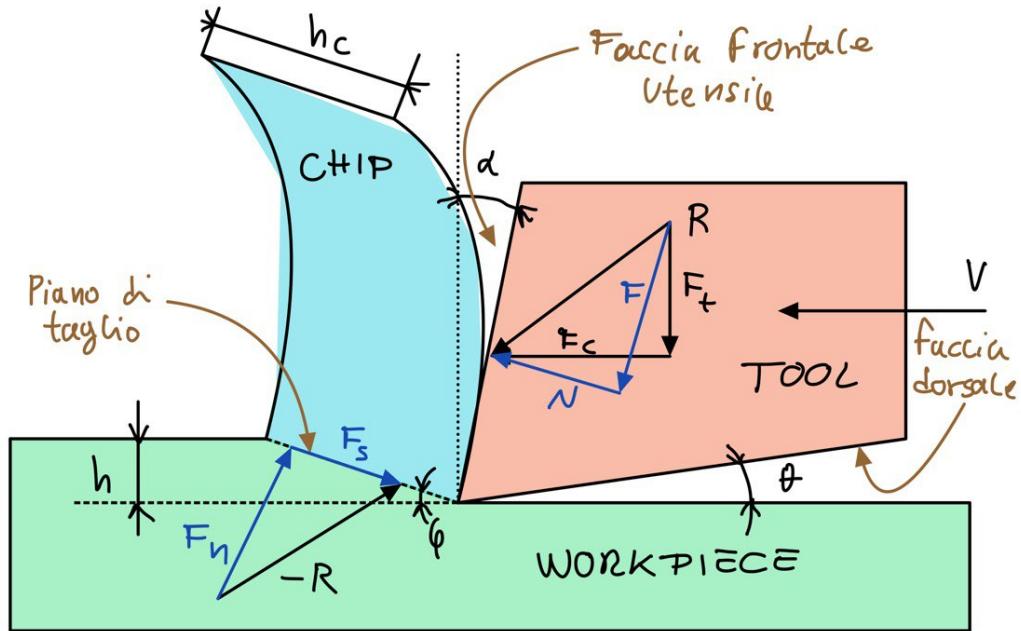


Figura 4.2: Scomposizione delle forze per il taglio ortogonale

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 difficolto. 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.

$$F_s = k \cdot A \quad (4.10)$$

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 scomponenti le forze viste fino a prima:

$$\phi = 45^\circ - \frac{1}{2}(\beta - \alpha) \quad (4.11a)$$

$$\phi = 45^\circ - (\beta - \alpha) \quad (4.11b)$$

Sebbene indichino la relazione degli stessi parametri con due relazioni differenti (4.11), entrambe hanno uno scopo preciso e nascono da considerazioni differenti.

- (4.11a) Si sviluppa partendo dalla considerazione che il sistema tenda a consumare la minima energia.
 (4.11b) Viene detta di Upper Bond: 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 4.3.(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. Oltre tutto 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.

Nel grafico 4.3.(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 4.4 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

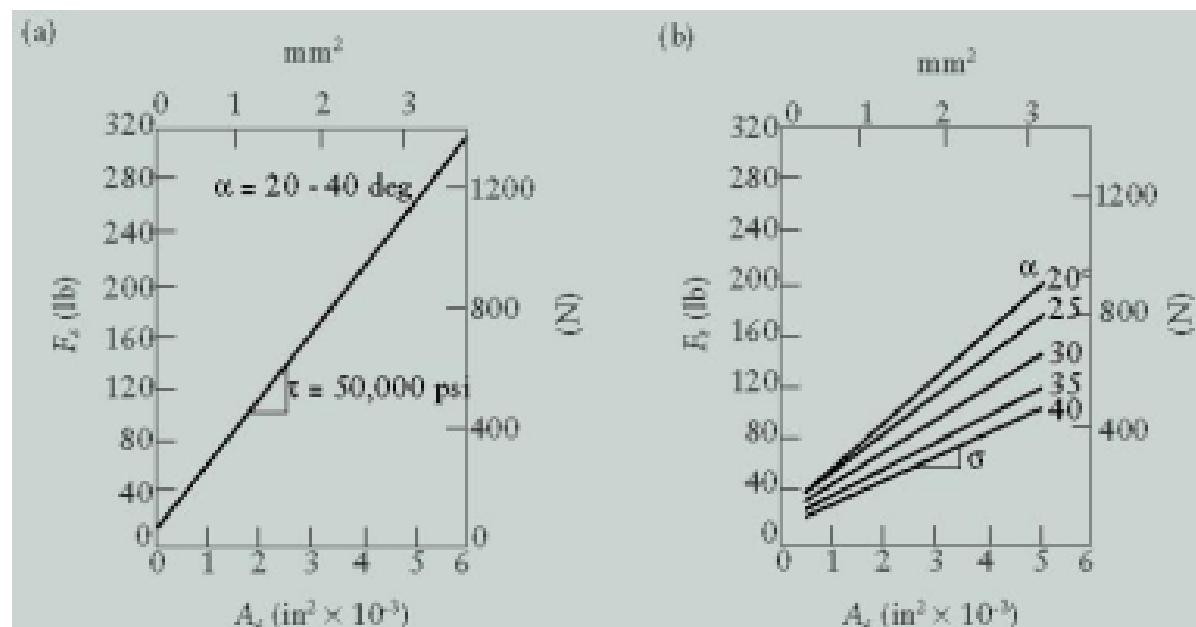


Figura 4.3: Andamenti delle forze per il taglio ortogonale

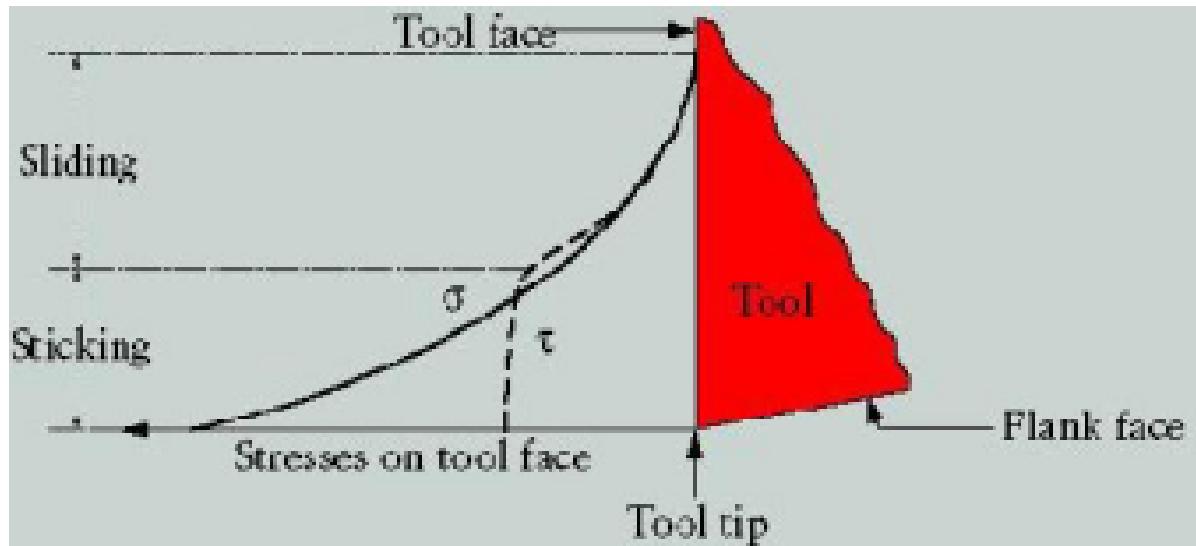


Figura 4.4: Tipologia di forze prementi sulla faccia dell'utensile

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 lavorato. 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.

4.3 Taglio ortogonale realistico

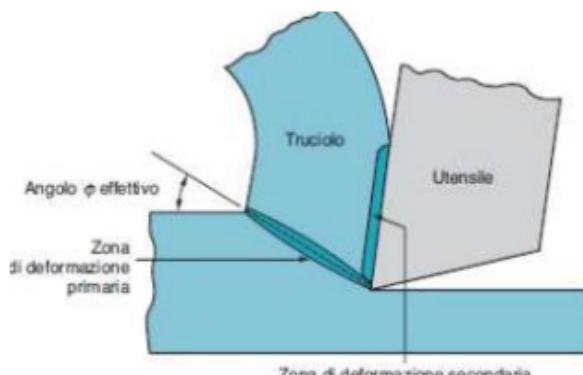
Il taglio del materiale non avviene più nel piano di taglio, bensì sulla zona di taglio detta anche **Zona di taglio primaria** mostrato in figura 4.5a.

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.

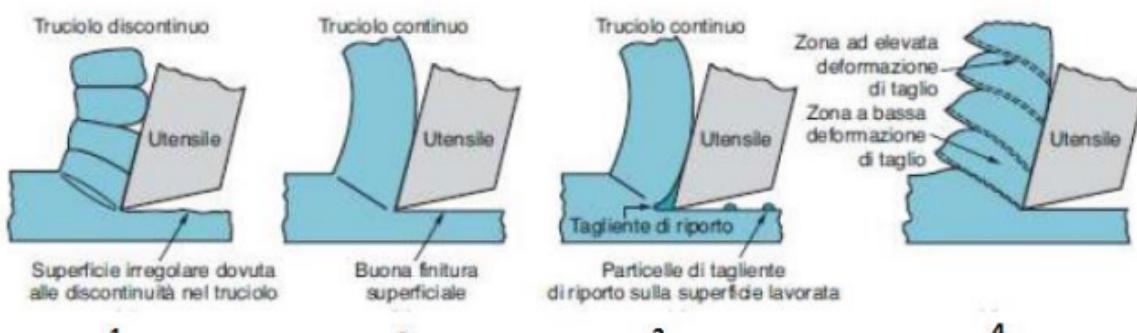
Analizzando il comportamento del truciolo si possono verificare delle situazioni, come illustrato in figura 4.5b:

4.3.1 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.



(a) Schematizzazione del taglio ortogonale realistico



(b) Tipologie di truciolo

Figura 4.5: Taglio ortogonale reale

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 stiching. 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

4.3.1.1 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.

4.3.1.2 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.

4.3.2 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.

4.3.3 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 4.6 un dettaglio.

4.4 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.

$$\alpha_e := \text{Angolo di spoglia efficace} \quad (4.12)$$

$$\alpha_n := \text{Angolo di spoglia normale} \quad (4.13)$$

$$\text{In generale: } \alpha_e > \alpha_n \quad (4.14)$$

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 .



Figura 4.6: Esempi di rompi-truciolo

4.4.1 Tornitura

Un esempio di tornitura è riportato alla figura 4.7c.

- 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.

4.4.2 Calcolo della forza ed energia

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.

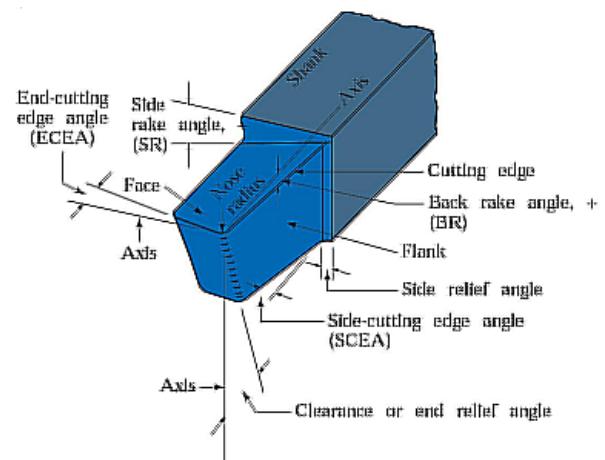


Figura 4.8: Esempio di utensile per tornitura

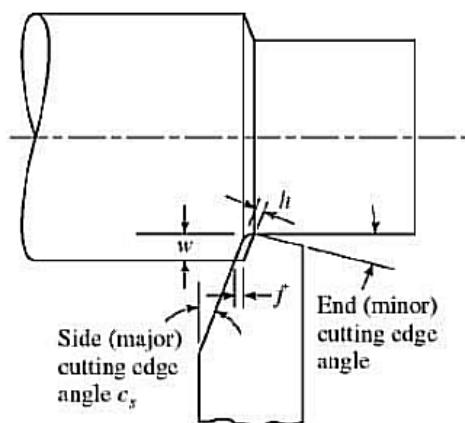
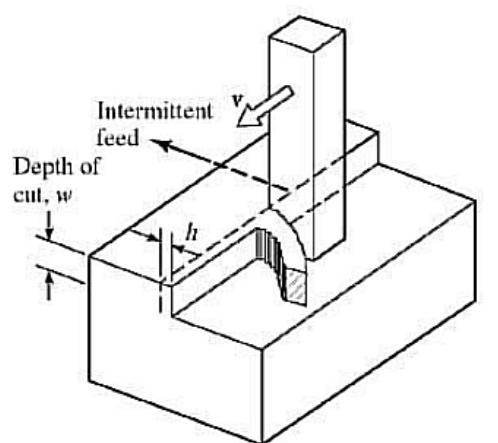
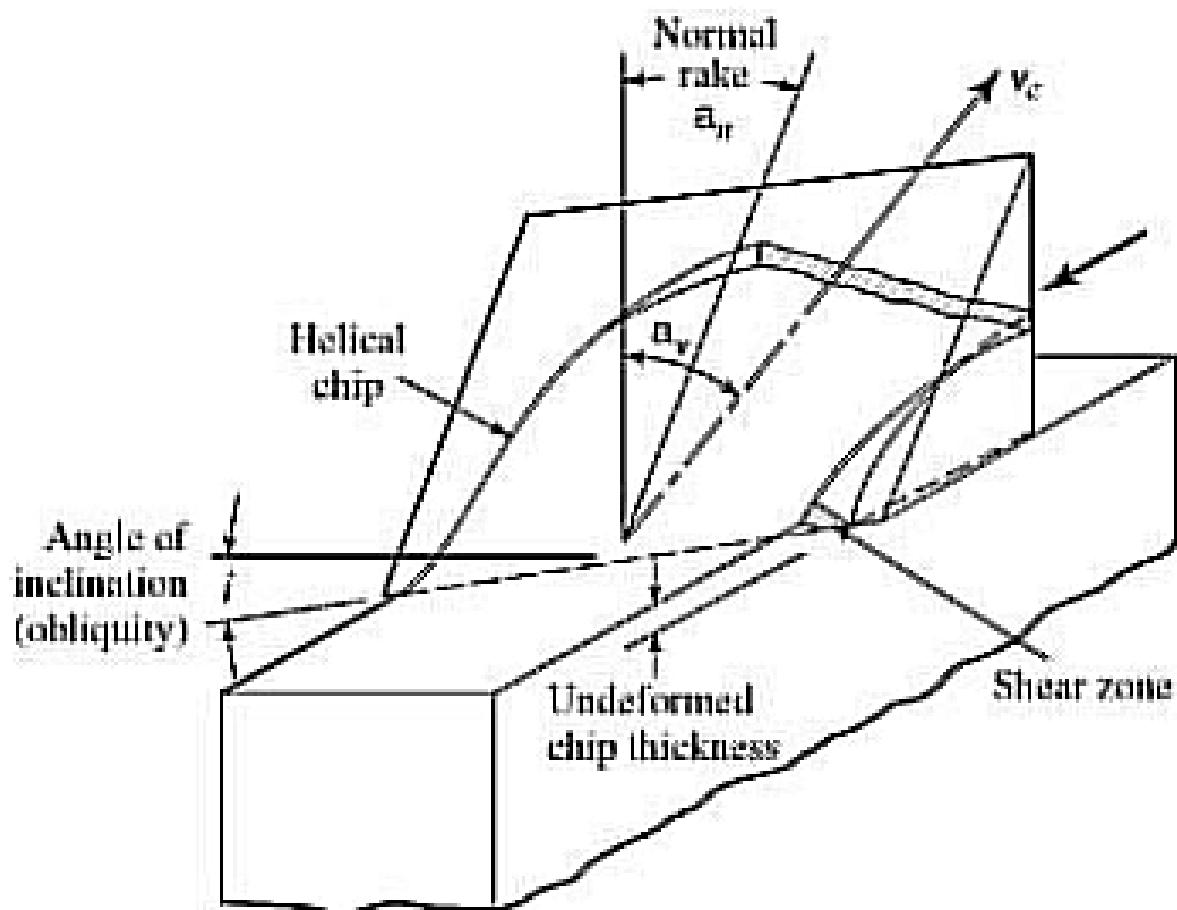


Figura 4.7: Il taglio obliquo

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 fermendo 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**.

$$p_c = \frac{\text{Componente parallela alla velocità di taglio}}{h \cdot w} \quad (4.15)$$

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

$$l := \text{lunghezza di taglio} \quad (4.16)$$

4.4.1 Definizione (Pressione ed energia di taglio specifica):

$$p_c = \frac{F_c}{h \cdot w} \quad (4.17a)$$

$$E_1 = p_c \cdot \frac{l}{l} [\text{Ws/m}^3] \quad (4.17b)$$

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

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

$$k_1 = \frac{1}{E_1} \quad (4.18)$$

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.

$$E = k \cdot h \cdot p \cdot l \quad (4.19)$$

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:

$$\frac{E_d}{h \cdot p \cdot l} \neq \text{cost.} \quad (4.20)$$

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:

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

$$E = E_1 \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{-a} = E_1 \cdot h^{-a} \quad (4.21)$$

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

$$\text{Power}(W) = \frac{E \cdot V_t}{\eta} \quad (4.22)$$

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

$$F_c = \frac{\text{Power}(W)}{v} \quad (4.23)$$

4.4.3 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 4.9, 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 se del calore, abbassa la temperatura del lavoro. Resta il calore trasferito all'utensile, il quale tende ad aumentare la temperatura considerevolmente. Infatti, come si vede proprio dalla figura 4.9, 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

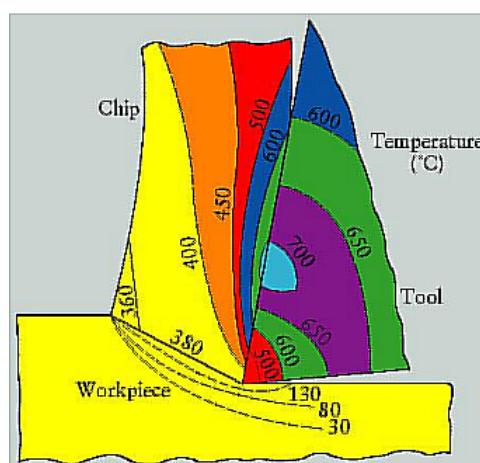
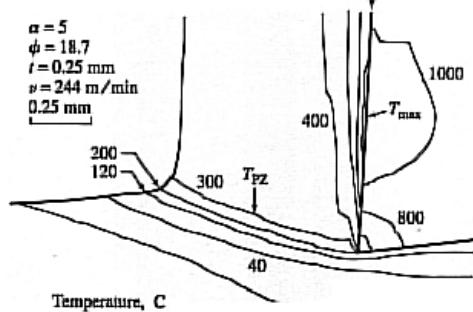
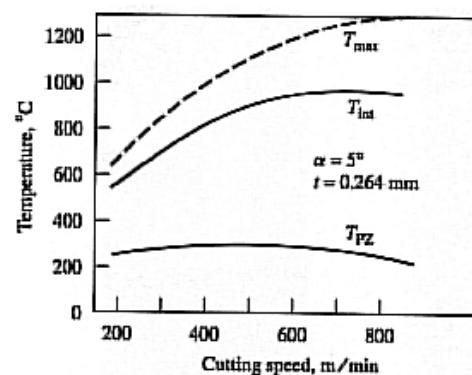


Figura 4.9: Analisi termica dell'aspor-



(a) Schema delle isoterme sulla faccia dell'utensile



(b) Relazione tra velocità di lavorazione e temperatura

Figura 4.10: Temperature durante le lavorazioni ad asportazione

è noto ma non così facile da porre analiticamente.

$$T_t = E \left(\frac{v \cdot h}{k \cdot \rho \cdot c} \right)^{1/2} \quad (4.24)$$

Dove:

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

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.

4.4.4 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. Perciò 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 contempo 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 temperature.

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

ù

I principali metodi per l'applicazione dei fluidi da taglio sono:

- Oliatore manuale o in pasta,
- Sistemi ad alta pressione,
- Attraverso gli utensili,
- Mediante ugelli e sistemi di ricircolo e filtraggio,
- Applicazioni a nebbia.

I fluidi da taglio hanno dei problemi in termini di smaltimento! Per cui spesso si lavora a secco o se ne usa il meno possibile.

4.4.5 L'usura degli utensili

Premessa: quando si parla di processi a deformazione si considera maggiormente come causa dell'usura pressione e forza. In genere l'usura arriva a 100000 pezzi prodotti, rendendolo un aspetto secondario nella scelta della lavorazione. Per l'asportazione di truciolo si hanno utensili che presentano una vita molto più breve. Si va dai 10 minuti, a qualche ora. Ovviamente ciò implica molti fermi macchina che si rendono evidenti sulla finitura superficiale. L'usura dipende dal materiale dell'utensile che può avere diverse specifiche forme.

4.4.4 Definizione (Usura): eredità di materiale da parte dell'utensile. Può essere

Progressiva dovuta allo strisciamento tra materiale e utensile.

Istantanea dovuta a distacchi improvvisi di materiale per diversi motivi quali: distacco del tagliente di riporto, vibrazioni ecc...

Usura del dorso si manifesta sul dorso dell'utensile dovuto allo strisciamento tra utensile e lavorato.

L'effetto è quello di perdere il controllo sulle tolleranze ottenute nella lavorazione, peggiorando di fatto la finitura. Consumando il tagliente, automaticamente, aumentano le forze necessarie per separare il materiale.

I parametri di riferimento sono:

V_B valore medio dell'estensione delle striature sul dorso dell'utensile

$V_{B_{max}}$ massima estensione delle striature dovute all'utensile.

Vengono identificati come in figura 4.11. La variazione di questi parametri dipende fortemente dalla velocità: più alta è la velocità di taglio, più bassa è la durata dell'utensile. Si può vedere alla figura 4.12.

Depth of cut line ovvero l'usura dentale. La zona dell'utensile che viene a contatto con la superficie del lavorato si consuma più velocemente per la possibilità della presenza di ossidi sulla superficie.

4.4.5.1 Usura della faccia

Le alte temperature possono formare delle **craterizzazioni** sulla faccia del dorso dovuta ad abrasioni e strisciamenti dei trucioli. Non è critica come l'usura del dorso. Si definisce:

$$KT := \text{caratterizzazione del cratere che si forma sulla faccia} \quad (4.25)$$

La misurazione è riportata alla figura 4.13. Può essere un problema più per le finiture che per le sgrossature.

L'arrotondamento del naso dell'utensile è una forma di usura. Va considerato soprattutto in termini di finitura superficiale, in quanto si vedrà, essere caratterizzante per la finitura superficiale. Le forme di usura dipendono dal materiale dell'utensile.

In genere è difficile misurare lo stato di usura di un utensile nell'ambito industriale. Dunque ci si basa sulla previsione dell'usura. Oppure si valutano operazioni di finitura, in cui al peggioramento della lavorazione si valuta l'usura. Analogamente per la sgrossatura in finzione del materiale asportato.

4.4.5.2 Previsione della durata dell'utensile

La previsione della durata è critica: se si coordina correttamente la durata dell'utensile con la durata della lavorazione, si può evitare di interrompere la lavorazione. Ciò si vedrebbe sulla superficie del lavorato. Come parametri da considerare per la previsione troviamo:

- L'usura cresce con la distanza percorsa dall'utensile
- La durata cala con la velocità di taglio:

$$\text{Se } V = \text{cost.} \Rightarrow d = \text{cost.} \times t \quad (4.26)$$

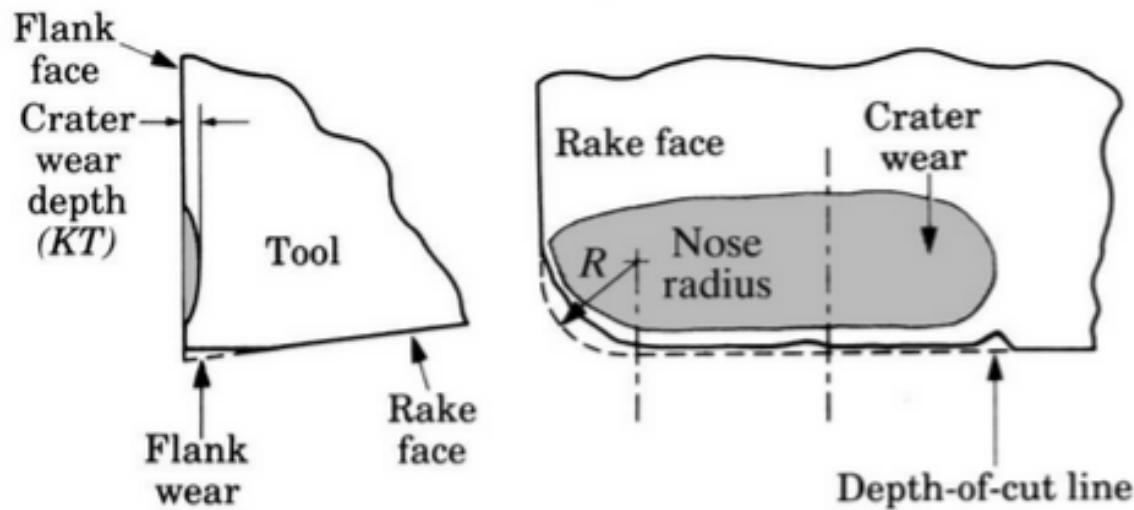


Figura 4.13: Caratterizzazione della craterizzazione sulla faccia dell'utensile

- La velocità d'usura cresce con la temperatura.
- La temperatura cresce con la velocità di taglio.

Allora nel tempo si è sviluppata la **Formula di Taylor**:

$$V \times t^n = C \quad (4.27)$$

Dove:

n dipende dal materiale dell'utensile

C dipende dal materiale del lavoro

All'epoca di Taylor non esistevano tutti i materiali per utensili sono in uso oggi. Dunque le relazioni non vanno sempre bene e, alle volte, sono troppo semplicistiche rispetto al metodo di usura per materiali moderni. Anche la tecnologia abordo macchina era completamente diversa per cui utensili usati oggi hanno, in generale, durata maggiore.

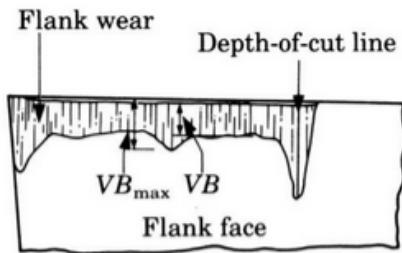


Figura 4.11: Tipiche striature dovute all'usura

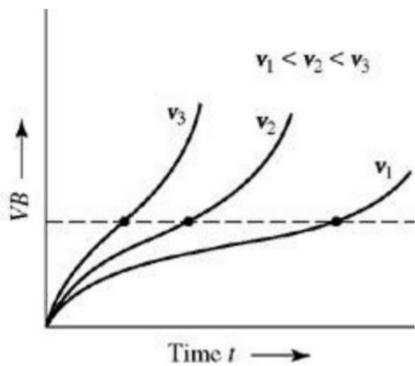


Figura 4.12: Velocità di generazione delle striatura, indice dell'usura dell'utensile.

Vale che $v_1 < v_2 < v_3$

Giusto per dare un'idea degli ordini di grandezza ecco alcuni esempi di parametri:

$$\begin{cases} \text{HSS: } n = 0.1 \div 0.25 \\ \text{Carburi: } n = 0.25 \div 0.4 \\ \text{Ceramici: } n = 0.4 \div 0.7 \end{cases} \quad (4.28)$$

Dalla formula (4.27) si osserva che all'aumentare di n la vita dell'utensile cala in maniera meno critica.

Lo stiching modifica la velocità di usura aumentandone la durata per via della sorta di protezione della faccia di spoglia superiore. Aumentando le temperature d'esercizio migliora la vita (grazie ai materiali che mantengono durezza elevata ad alta temperatura) per via del fatto che il materiale lavorato risulterà rammollito.

Allora si è sviluppata una formula alternativa della formula di Taylor che si adatta meglio ai tempi moderni.

$$t = \frac{K}{v^{1/n}} \Rightarrow t = \frac{K}{v^{1/n_1} f^{1/n_2} w^{1/n_3}} \quad (4.29)$$

In cui di solito vale che $n_1 < n_2 < n_3$ che per un acciaio rapido vale; $n_1 = 0.1$, $n_2 = 0.18$, $n_3 = 0.45$. Per cui si può osservare che dalla formula (4.29) la durata dell'utensile cala all'aumentare della velocità con un fattore 10. Infatti, $\frac{1}{n_1} = 10$, $\frac{1}{n_2} = 5.5$, $\frac{1}{n_3} = 2.2$. Allora conviene modificare, come parametri in base alla loro influenza, proprio w e f perché la durata del utensile risulta meno sensibile a questi.

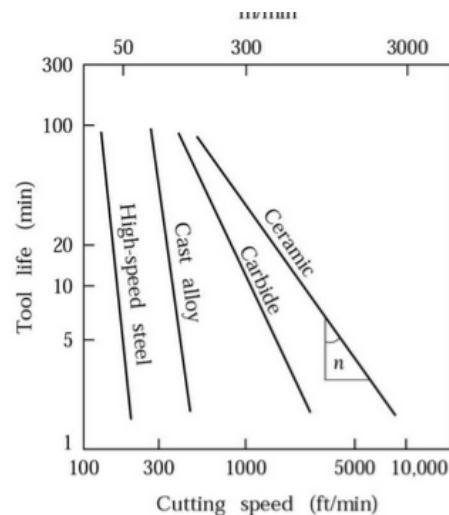


Figura 4.14: Grafici della formula (4.27) per diversi materiali

Ci sono dei casi che non sono prevedibili tramite le formule di Taylor (4.27) e (4.29):

- Rottura per schianto dell'utensile se di materiale molto fragile;
- Il comportamento statistico del materiale andrebbe considerato.

Alcune soluzioni migliorative possono essere:

- Addizione tra l'utensile e materiale radioattivo, che attraverso la misura delle radiazioni è possibile stimare quanto si sia consumato.
- Misurazione della coppia resistente per valutare l'usura. Ciò è valido solamente se la lavorazione è sempre uguale.

4.4.6 Qualità della superficie prodotta

Come si può misurare la qualità della superficie?

- Rugosità superficiale
- Tolleranze geometriche
- Tolleranze dimensionali
- Trasformazioni indesiderate del materiale
- Tensioni residue sia di compressione che di trazione
- Formazione di cricche

4.4.6.1 Rugosità superficiale

In condizioni ideali la rugosità del materiale dovrebbe essere 0. Picchi e avallamenti nel materiale sono misurabili tramite R_t ovviamente si presentano. Allora:

$$R_t = \frac{f^2}{8R} \quad (4.30)$$

Con R è il raggio di raccordo del naso dell'utensile. In più:

$$R_a \approx \frac{f^2}{32R} \quad (4.31)$$

Le situazioni che in generale peggiorano la rugosità superficiale sono ad esempio: la rugosità stessa del materiale di partenza, tagliente di riporto ed eventuali distaccamenti, tolleranze nella geometria dell'utensile, strappi per rottura del truciolo, cricche trasversali, vibrazioni, usura utensile. Per la finitura, l'usura dell'utensile viene decretata da quando la finitura non raggiunge le caratteristiche richieste.

Esempio. 4.4.1: Esempio di valutazione dell'avanzamento

Considerando di lavorare un acciaio automatico con utensile in carburo di tungsteno, usando il grafico 4.15 per raggiungere un livello di rugosità $R_a = 1.6\text{µm}$ e con una profondità di passata $w = 3.8\text{mm}$.

$$\begin{aligned} f &= \frac{0.5\text{mm}}{2} \text{ In finitura si ipotizza di dimezzare l'avanzamento} \\ R_a &\approx \frac{f^2}{32R} \Rightarrow R = \frac{f^2}{32R_a} \\ R &= 0.78\text{mm} \rightarrow R_{real} = 1\text{mm} \end{aligned}$$

Scegliendo un utensile con raggio di raccordo più grande si migliora la rugosità.

4.4.7 Lavorabilità

La lavorabilità è un concetto che convoglia diversi parametri che sono emersi nelle trattazioni precedenti. In generale si dice che un materiale quando:

- Quanto facilmente si possono ottenere componenti a basso costo
- Basse forze,
- Basso costo di lavorazione.

In generale si definiscono delle **scale di lavorabilità** per cui vengono fatte delle prove tecnologiche per confrontare i diversi materiali. Ad esempio:

- Si considera una lavorazione di riferimento: la tornitura,
- L'utensile deve durare 60 minuti prima che raggiunga determinati valori di WB o WB_{max} .
- Si valuta quale materiale può essere lavorato a più alta velocità.

Se si impone la velocità di taglio e si vuole valutare la lavorabilità allora si va a valutare il consumo dell'utensile. Come si può vedere esistono diverse prove tecnologiche.

I materiali fragili o con punto di fusione basso vengono considerati dei materiali con buona lavorabilità.

In generale meglio che il materiale del lavorato non sia chimicamente reattivo, così da non reagire col materiale.

Materiali con particelle dure sono considerati meno lavorabili, per via del fatto che generano urti contro i taglienti per cui si rischia distacchi dell'utensile. Materiali altamente termoconduttori sono preferiti in modo da smaltire il calore accumulato sull'utensile.

Alcune soluzioni migliorative prevedono di aumentare la temperatura davanti all'utensile in modo da rendere il materiale del lavorato più cedevole. Di certo si aumenta la probabilità di diffusione sull'utensile.

Ora si vedrà una disamina dei vari materiali maggiormente lavorati per asportazione di truciolo.

4.4.7.1 Acciai al carbonio

Hanno un'ampia gamma di durezze possibili. Si possono trovare allo stato ricotto, lavorati a freddo o induriti per precipitazione per soluzione solida.

4.4.7.2 Acciai automatici

Sono acciai contenenti due elementi che ne aumentano la lavorabilità:

Pb Punto di fusione basso, evita che si formi lo sticking e proteggere l'utensile

S i solfuri di manganese, in forma globulare favorisce la rottura del truciolo.

4.4.7.3 Acciai legati

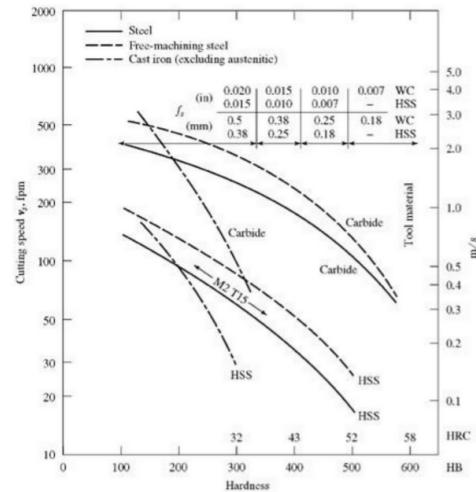


Figura 4.15: Indicazioni di velocità di taglio e avanzamento in funzione della durezza del materiale lavorato e di diversi utensili

La resistenza meccanica aumenta rispetto ai precedenti, provocando usura accelerata dell'utensile. Potrebbe essere possibile una ricottura per aumentare la lavorabilità. Spesso ottenuti per sinterizzazione per cui la porosità può causare urti dell'utensile col materiale. Si può ignorare questo effetto nel caso la densità sia superiore al 90% rispetto a quella vera.

4.4.7.4 Acciai inossidabili

Sono caratterizzati da scarsa lavorabilità in particolare gli austenitici e martensitici.

4.4.7.5 Ghise

Sono abbastanza lavorabili per via delle lamelle di grafite fragili delle ghise grigie. Per le altre la lavorabilità è abbastanza buona.

4.4.7.6 Zinco e Magnesio

Da prestare attenzione al punto di fusione abbastanza basso. Sono molto rigidi per cui godono di una buona lavorabilità. Il magnesio alle alte temperature può bruciare.

4.4.7.7 Alluminio

Più lavorabile se incruditi per abbassare la lavorabilità anche in caso di invecchiamenti e TT.

4.4.7.8 Rame

Come per l'alluminio anche il rame deve essere trattato per abbassare la duttilità altrimenti tende ad impastare l'utensile.

4.4.7.9 Nichel e superleghe

Ottime resistenze meccaniche anche ad alte temperature, per cui queste leghe sono particolarmente difficili da lavorare anche per asportazione.

4.4.7.10 Titanio

Si tratta di un materiale particolarmente fragile, per cui ben lavorabile per asportazione di truciolo.

4.4.8 Materiali per utensili

L'evoluzione dei materiali ha portato ad una migliore resa di materiali adatti per utensili. Anche le macchine hanno visto una forte evoluzione che porta a sfruttare al meglio le proprietà dei nuovi materiali.

Ricordando che:

Resilienza è la capacità del materiale di assorbire istantaneamente energia meccanica prima che il materiale giunga a rottura.

Tenacità è la capacità del materiale a resistere sollecitazioni meccaniche nel tempo.

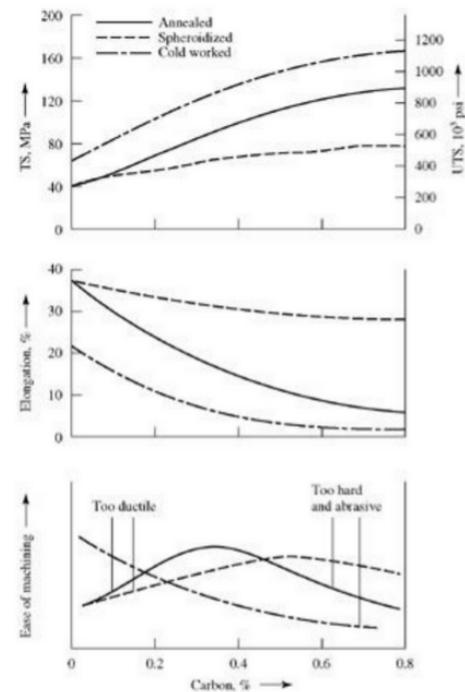


Figura 4.16: Caratteristiche meccaniche utili alla lavorabilità per la lavorabilità in asportazione

Dovrebbe essere che l'utensile sia più duro del materiale da lavorare. In più si cercano dei materiali che offrano maggiore resistenza, maggiore durata e minore deformazione plastica dell'utensile. Anche la resistenza agli shock meccanici è molto apprezzata. Sempre di questo passo, si ricerca una certa resistenza agli shock termici nei casi in cui l'utensile non è costantemente immerso nel materiale da lavorare. Anche se il materiale può offrire alta conducibilità termica viene apprezzato, in modo da smaltire il calore accumulato sulle facce dello stesso. Nei casi in cui ci sia adesione tra utensile-lavorato è necessario:

- bisogna evitare la saldatura tra i due e che eventualmente ci sia diffusione.
- Si può favorire l'adesione per garantire una sorta di protezione delle facce.

In generale si osserva che alcuni materiali che resistono ad alta temperatura presentano comunque una bassa resilienza ad alta temperatura.

Ora si avrà una disamina dei principali materiali usati per tale scopo.

4.4.8.1 Acciai Ipereutettoidici

Si favorisce la formazione della fase martensitica nell'acciaio. Offrono un primo rammollimento già a 250°C Per cui vengono utilizzati per lavorare materiali particolarmente teneri a bassa velocità. In generale possono avere $\alpha >> \sigma$ e si possono riaffilare.

4.4.8.2 Acciai HSS

Possono essere con matrici a base di **carburi di molibdeno** o **carburi di tungsteno**. Come temperatura limite di lavorazione si attesta attorno a 550°C. Sono ottenuti per deformazione plastica a caldo e poi TT e in fine la rettifica per affilarli. Offrono una buona resilienza e possono essere riaffilati. I TT servono per ottenerne ossidazione di Fe_3O_4 e nitruri (più apprezzati) o carburi di titanio. Si fanno per ottenere una durezza da 2 o 6 volte più grande.

4.4.8.3 Acciai per colata

Carburi vengono ottenuti per colata. La matrice è in genere di cobalto che conferisce particolare durezza. La resilienza inizia a calare perché il materiale è molto più fragile rispetto agli HSS. Sono riaffilabili e vengono fissati meccanicamente al gambo della macchina.

4.4.8.4 Carburi cementati

Sono ottenuti per sinterizzazione e normati da ISO. In genere vengono realizzati realizzati inserti. Non sono riaffilabili e vengono fissati tramite brasatura. Alcuni strati hanno lo scopo di rafforzare i legami tra gli strati. Oltre a garantire le proprietà di durezza.

4.4.8.5 Ceramici

Sono materiali ceramici legati con carburo metallico come allumina usato per monotagliente di finitura. Sono ottenuti per sinterizzazione.

4.4.8.6 CBN

Il nitruro cubico di boro è un materiale sintetico, il secondo più duro dopo il diamante. Viene sfruttato per tagliare le leghe di acciaio anche le più dure. Viene prodotto tramite alta pressione e alta temperatura. Di solito si realizzano piccoli taglienti che vengono legati ad un'utensile di carburo per poi essere legato al gambo. Non è riaffilabile.

4.4.8.7 Diamante policristallino

Siccome nei diamanti naturali sono presenti delle impurità. Allora si sono sviluppati questi sintetici perché siano più prevedibili e meno costosi. Vengono usati per lavorare leghe di alluminio e altre leghe non ferrose. Come per i precedenti vengono usati come piccoli taglienti applicati su utensili di carburo.

4.4.9 Morfologia degli utensili

Gli acciai rapidi hanno resilienza tale da permettere la realizzazione di utensili monoblocco. Inoltre il costo rimane basso. Già coi carburi si possono realizzare degli inserti per via del fatto che costano di più e sono più fragili. Con gli inserti non raffilabili si girano i vertici in modo da consumarli in tutti i senti. I taglienti con angolo di spoglia grande dovranno essere raccordati per garantire un usura uniforme. Per gli inserti costosi o molto fragili vengono realizzate delle unghie applicate all'inserto tramite brasatura.

4.4.10 Portautensili e elementi di serraggio

Il problema di serraggio deve essere fatto in modo che eviti delle vibrazioni che porterebbero a rottura gli utensili. Ormai grazie alle ai centri Flexible Manufacturing Systems ([FMS](#)), che predispongono un proprio magazzino utensili, i portautensili vengono realizzati in modo che siano intercambiabili sul mandrino. Spesso il cambio utensile viene realizzato tramite un opportuno leveraggio che sposta gli utensili dal magazzino al mandrino. Alcuni portautensili possono essere predisposti per garantire la fornitura di fluido da taglio in pressione alle cavità dell'utensile.

Forme geometriche snelle sono preferite per limitare le vibrazioni e la facilità d'innesto nella macchina. In più si evita la flessione di tutto il sistema.

4.4.11 Lavorazioni

Le principali lavorazioni ad asportazione di truciolo sono classificate in base alla quantità di utensili taglienti che contemporaneamente sono immersi nel materiale. Il grafico [4.18](#) mostra le varie classificazioni.

Fanno eccezione le lavorazioni di forma in cui i taglienti sono plurimi ma non rientrano nella classificazione dei taglienti plurimi. Si dicono di forma per l'appunto. La figura [4.19](#) riporta degli esempi di utensili di forma.

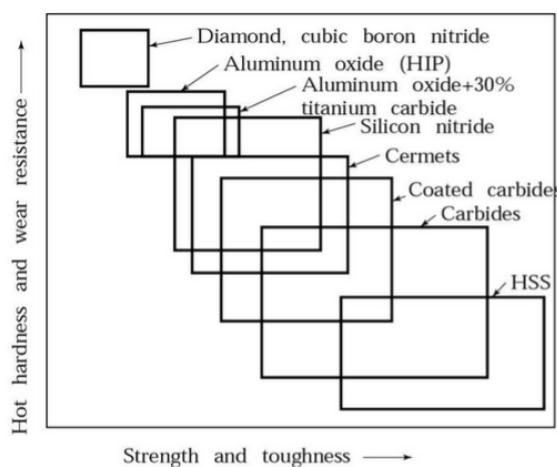


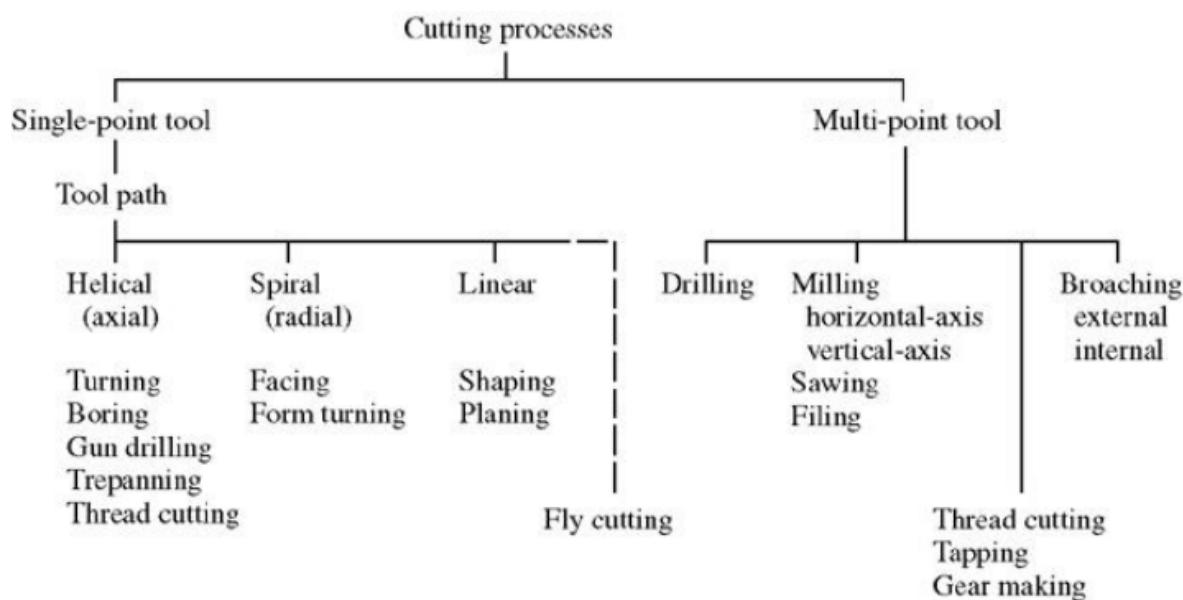
Figura 4.17: Range di caratteristiche dei principali materiali per utensili

Tabella 4.1: Confronto tra le morfologie degli utensili e i loro costo

Approximate Cost of Selected Cutting Tools

TABLE 21.6

Tool	Size (in.)	Cost (\$)
High-speed steel tool bits	1/4 sq.x 2 1/2 long	1-2
	1/2 sq. x 4	3-7
Carbide-tipped (brazed) tools for turning	1/4 sq.	2
	3/4 sq.	4
Carbide inserts, square 3/16" thick		
Plain	1/2 inscribed circle	5-9
Coated		6-10
Ceramic inserts, square	1/2 inscribed circle	8-12
Cubic boron nitride inserts, square	1/2 inscribed circle	60-90
Diamond-coated inserts	1/2 inscribed circle	50-60
Diamond-tipped inserts (polycrystalline)	1/2 inscribed circle	90-100

**Figura 4.18:** Suddivisione delle principali lavorazioni in asportazione di truciolo

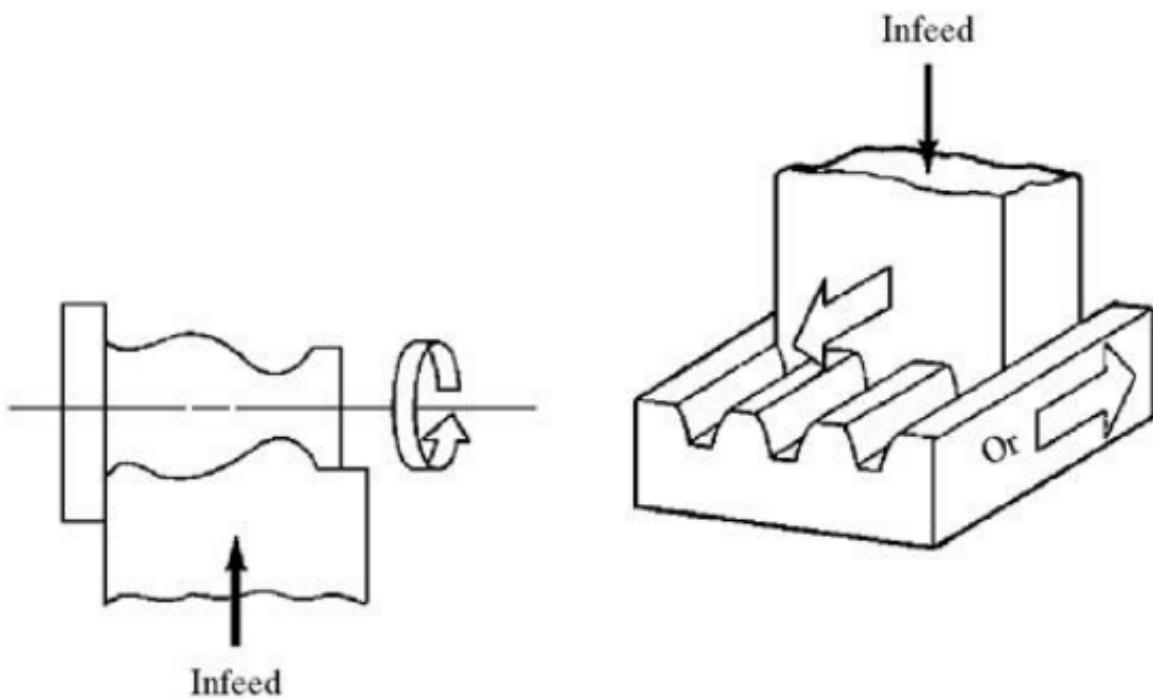


Figura 4.19: Alcuni esempi di utensili di forma

CAPITOLO 5

Tornitura

Si sfrutta un'utensile monotagliente ma la qualità sta nella bravura del operatore. Di fatto è la prima rappresentazione applicativa di taglio obliquo. Gli angoli di riferimento sono dipendenti dall'inclinazione del utensile rispetto al pezzo in lavorazione, come si vede dalla figura 5.1. Esiste una norma che definisce nel dettaglio gli angoli di riferimento. Nella rettifica si sfrutta un disco rotante piuttosto che far ruotare il pezzo. Ciò per dire che il mandrino può mettere in rotazione sia il pezzo che eventuali utensili.

5.1 Tornitura cilindrica

Data la varietà di lavorazioni fattibili con la tornitura, è possibile che i torni presentino ulteriori supporti, dette mezzelune, per impedire la flessione dei lavorati particolarmente lunghi o cedevoli. In più anche la presenza della contropunta permette di mantenere in asse il pezzo, però resta il limite della flessione imposta dall'utensile stesso.

Di seguito vengono riportate ulteriori lavorazioni possibili al tornio.

Nello specifico:

Barenatura viene usata per allargare dei fori, finire interiormente i fori o se ne modifica la forma. Il tema è l'utensile:

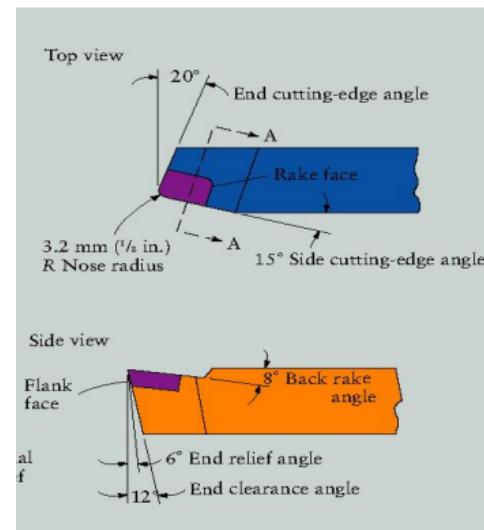


Figura 5.1: Schematizzazione degli angoli per un'utensile da tornitura

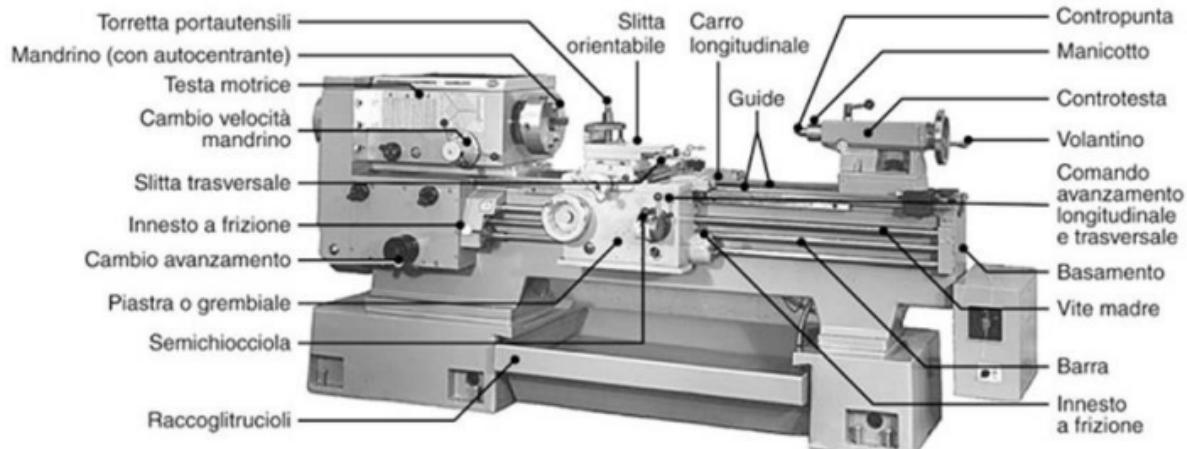


Figura 5.2: Specifiche di un tornio classico

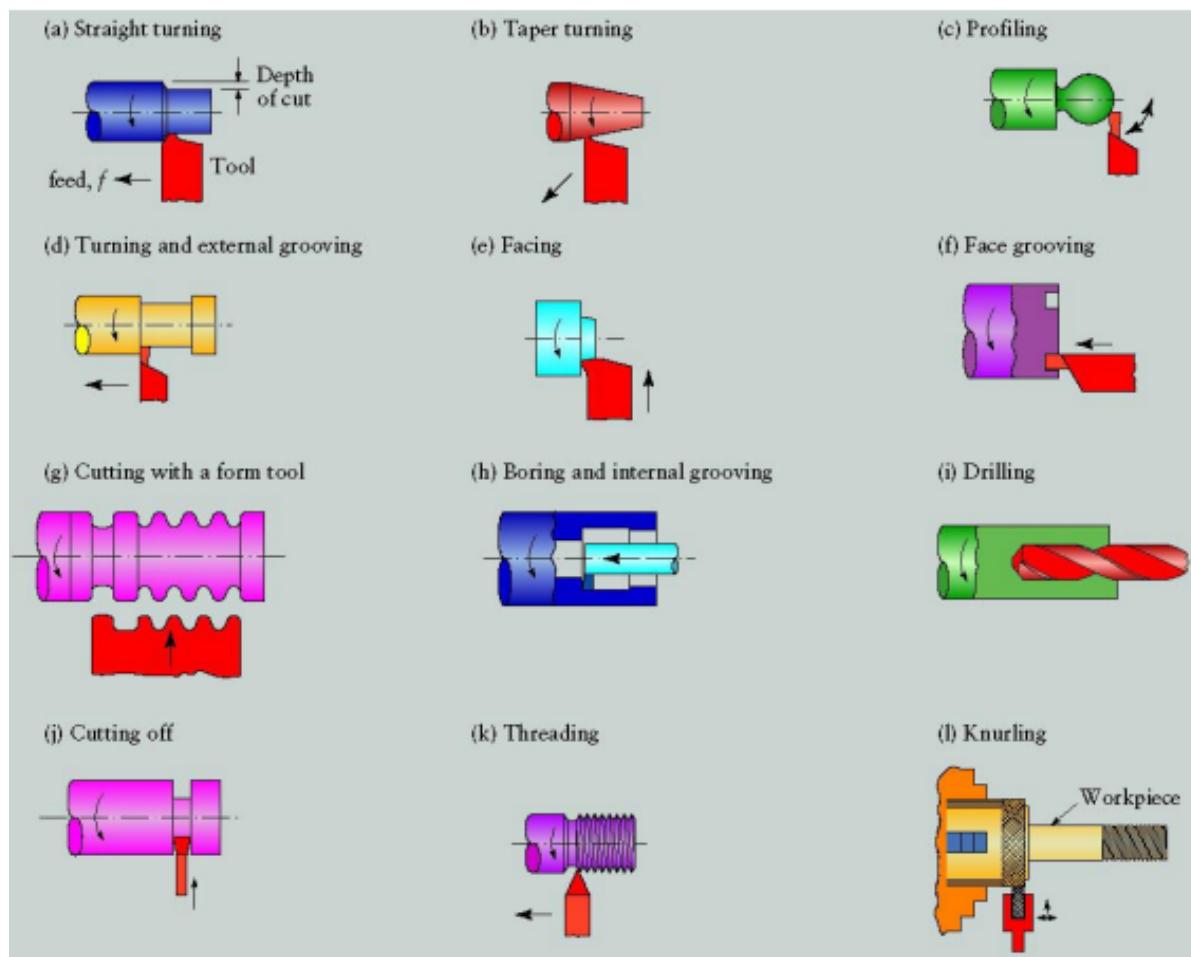


Figura 5.3: Ulteriori lavorazioni ottenibili tramite tornitura

essendo che deve entrare profondamente nel foro questo può essere molto lungo, cioè può essere sottoposto a flessione. Risultando in una finitura peggiore.

Troncatura Nel caso si voglia separare una parte di materiale in tornitura, l'utensile presenterà più taglienti. In più si presenta un'ulteriore problema: la velocità angolare di taglio cambia in funzione del raggio a cui si sta lavorando, infatti:

$$v_c = \omega \cdot r \Rightarrow \text{Se } r \rightarrow 0 \text{ o } v_c \rightarrow 0 \quad (5.1)$$

Quando ci si avvicina all'asse di rotazione la qualità superficiale peggiora.

Lavorazioni di forma Siccome la forza applicata è considerevole si preferisce tenere uno sbalzo limitato.

Limatura e piallatura Realizzano delle superfici piane, non c'è un moto di rotazione ma di traslazione. In questo caso l'utensile è a sbalzo che può essere problematica. Cambia solo il moto relativo ma non il risultato.

In generale è da evitare troppi fissaggi per il fatto che possono introdurre distorsioni nel lavorato.

5.2 Altre tipologie di torni

Torni automatici È una macchina automatica in grado di eseguire in modo molto rapido la stessa operazione. È sparita perché mancante di versatilità: dunque sostituiti con i centri di lavoro **CNC**.

Torni per viti Vengono usati per realizzare forme parecchio complicate, anche se ormai la viteria viene realizzata per deformazione plastica a meno di filettature a diverse specifiche.

Torni svizzeri Hanno deflessioni molto piccole per garantire toleranze molto piccole $\approx 2.5\text{ }\mu\text{m}$. Ciò è possibile grazie a utensili posti su più assi e regolati molto accuratamente.

CAPITOLO 6

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 6.2a 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 rompitruciolo.

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.

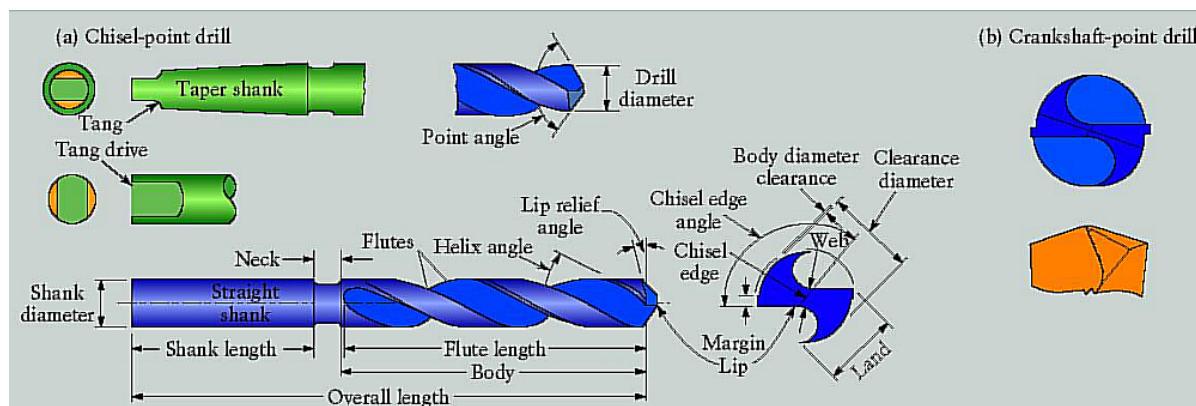
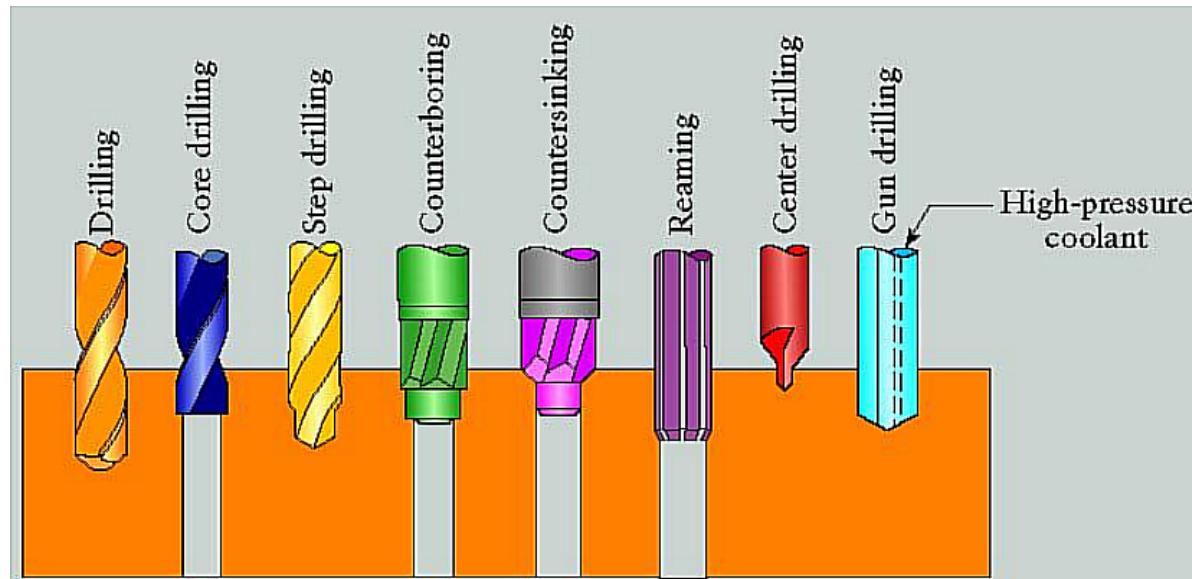
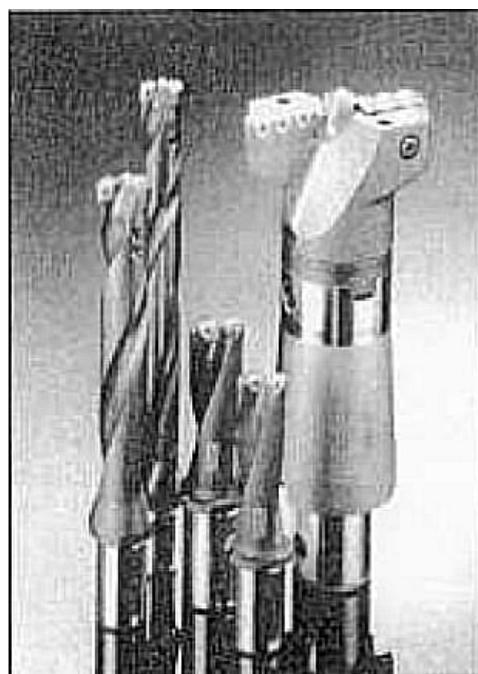


Figura 6.1: Alcune punte da trapano per diverse forature



(a) Principali punte da trapano



(b) Punte per foratura



(c) Esempi di meccie

Figura 6.2: 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 6.2a, 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 6.2c. 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.

6.1 Tipologie di trapani

Alcuni esempi di trapanio sono riportati alle figure 6.4. Risulta molto riduttivo parlare di macchine che eseguono solo trapanature (nonostante esistano e vengano tutt'oggi prodotte) perché ormai soppiantate dai centri di lavoro FMS. Di fatto l'evoluzione dei centri FMS ha ormai inglobato quasi tutte le possibili lavorazioni per asportazioni di truciolo in un'unica macchina. Di questo se ne parlerà nel capitolo 10 a pagina 102.

WORKPIECE MATERIAL	SURFACE SPEED	FEED, mm/rev	DRILL DIAMETER	RPM	
	m/min	1.5 mm	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 6.3: Velocità consigliate di trapanatura

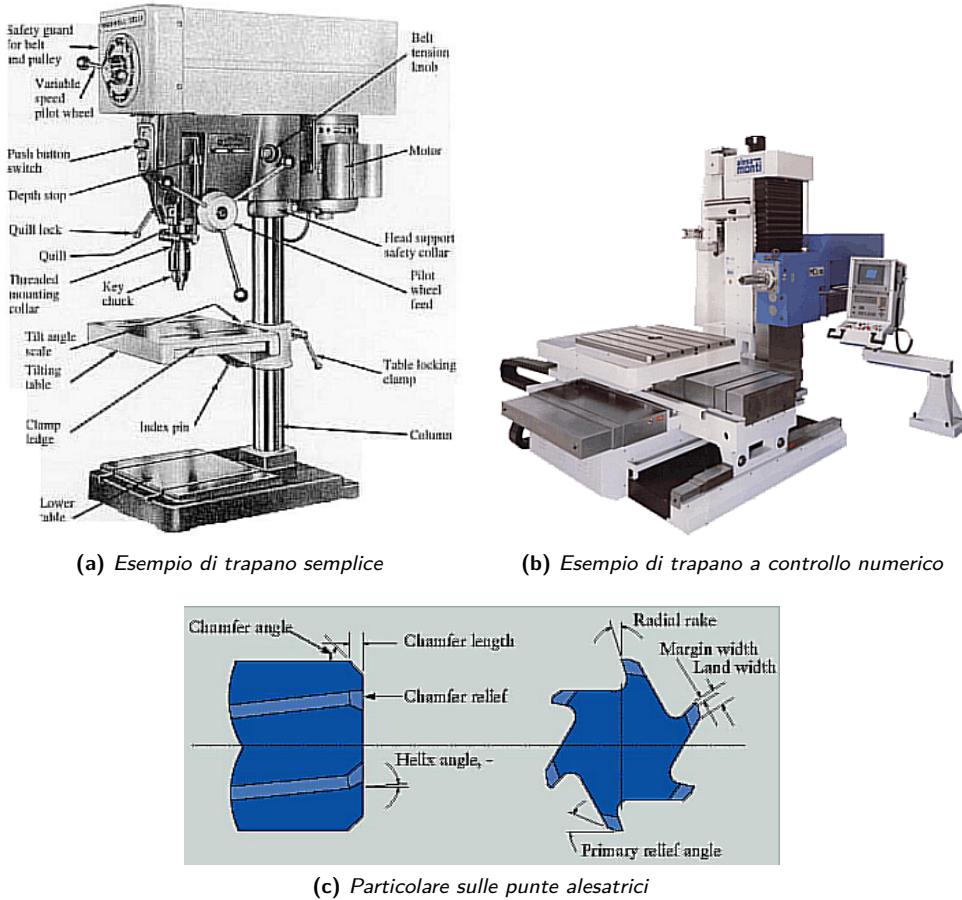


Figura 6.4: Alcuni esempi di trapani e dettaglio punta alesatrice

Piccolo approfondimento per le punte da alesaggio.

Le punte da alesaggio **6.4c** 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 7

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: 7.1 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*.

7.1 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 7.2b o opposizione 7.2a. 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 7.2d, 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 7.2c, 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.

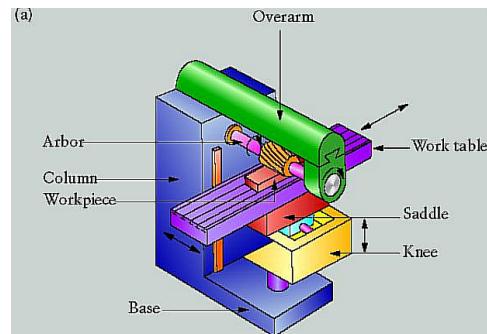


Figura 7.1: Esempio di fresatrice orizzontale

7.2 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.

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

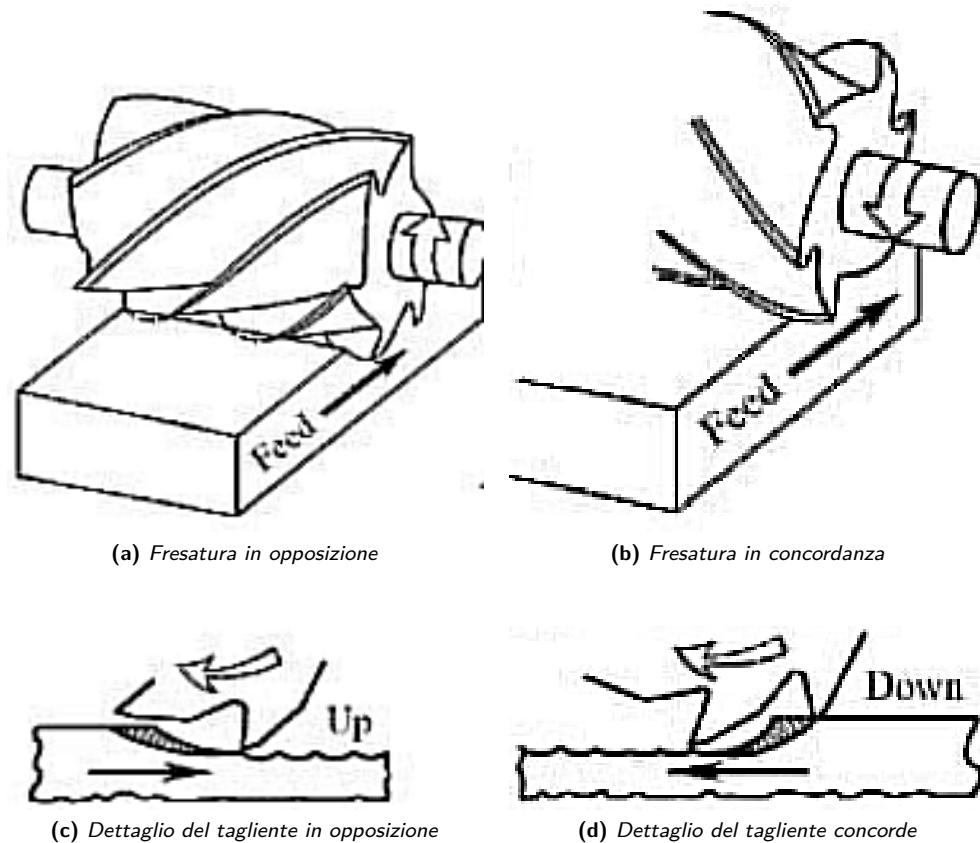


Figura 7.2: Fresatura in opposizione e concordanza

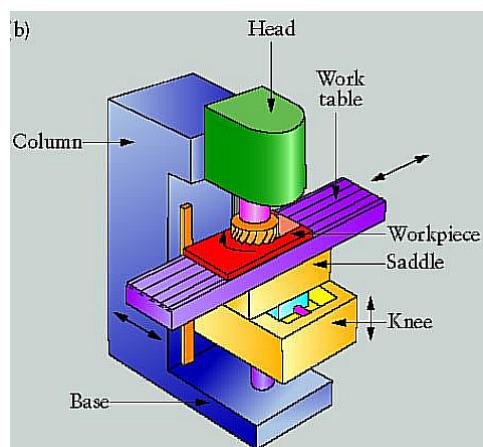


Figura 7.3: Esempio di fresa verticale

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

7.2.1 Fresa a codolo

La fresa a codolo, in figura 7.4, 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, 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, **7.5**, 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).

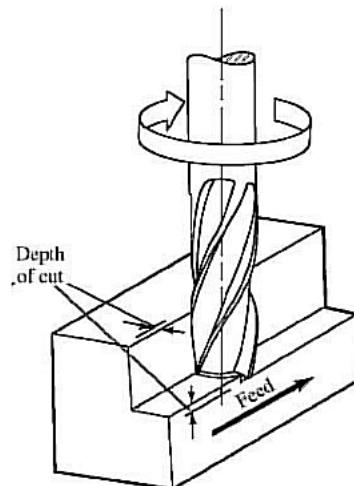


Figura 7.4: Schematizzazione della fresatura a codolo



Figura 7.5: Esempio di frese a testa sferica

CAPITOLO 8

Altre Lavorazioni

8.1 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 8.1a ne sono presentate alcune.

8.2 Brocciatura e taglio di filetti

8.2.1 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 *boccia*, in figura 8.2a, che realizza forme particolari 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 8.2b, 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.

8.2.2 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.

8.3 Aspetti conclusivi

Alla figura 8.4, vengono riportate quali sono le principali lavorazioni ottenibili per asportazione di truciolo. Vengono anche specificate le tolleranze minime ottenibili. Mentre alla figura 8.5, sono indicati quali siano le produttività.

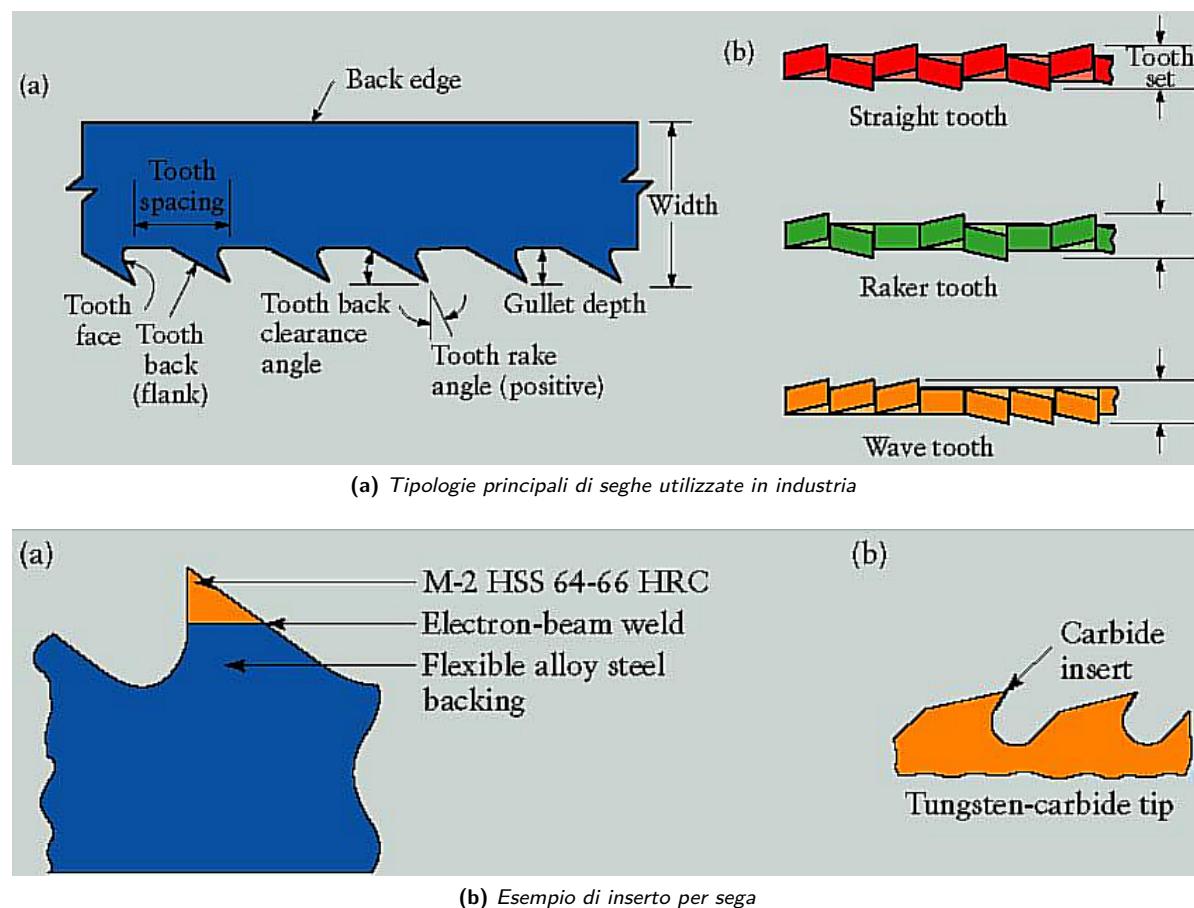
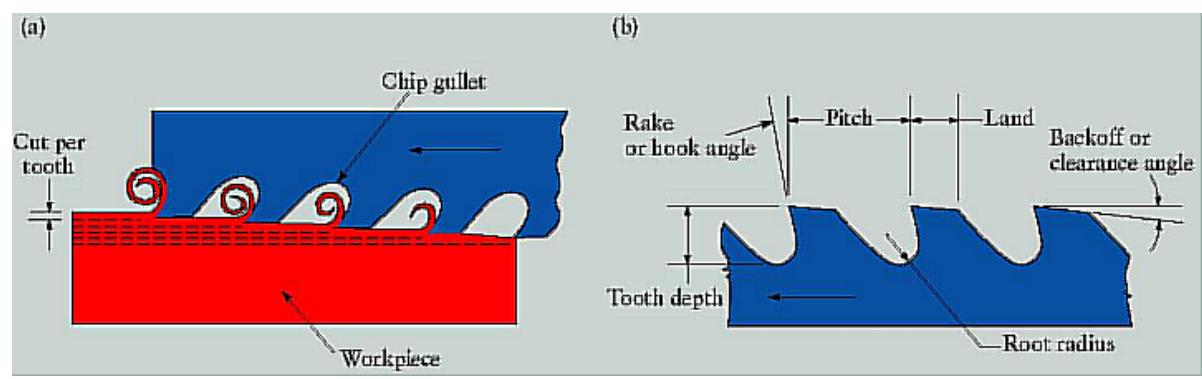
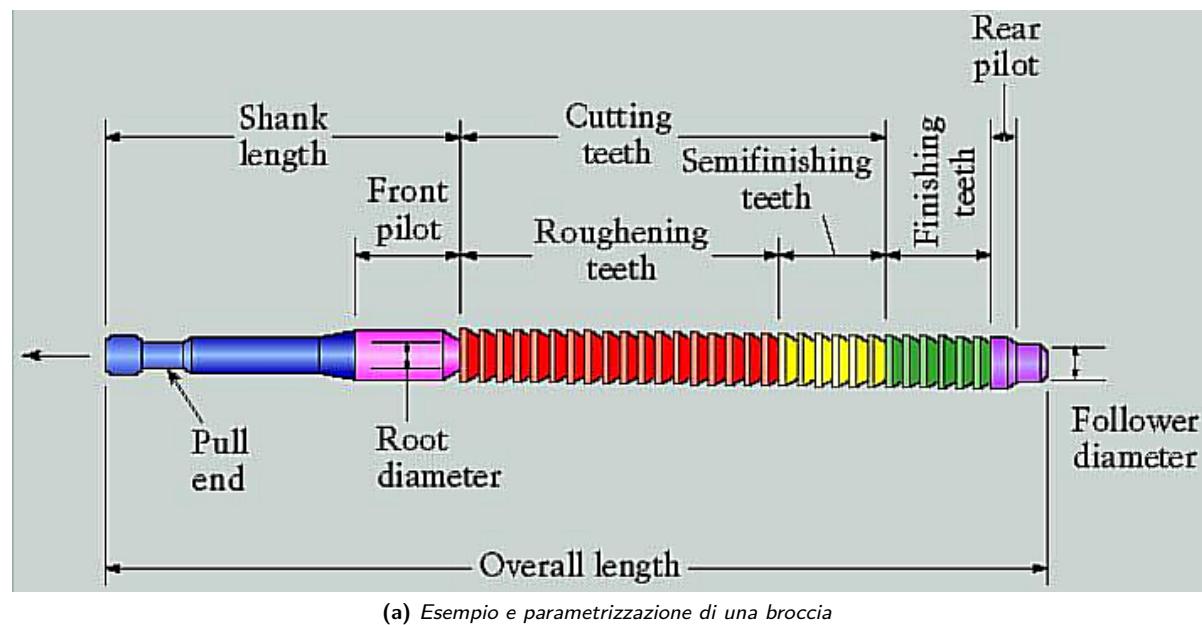
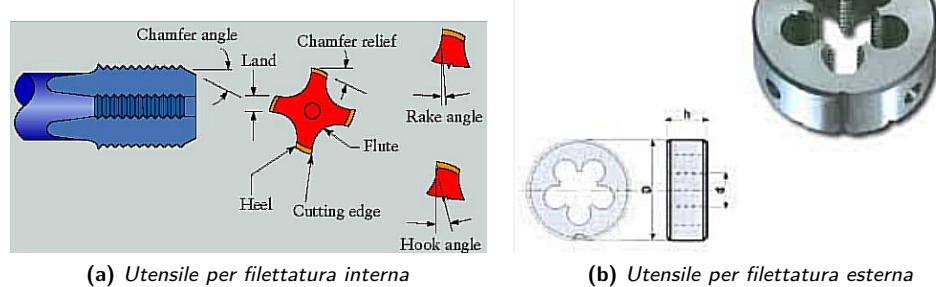


Figura 8.1: Breve descrizione delle seghe industriali

8.4 Produzione di ingranaggi

Per la produzione di ingranaggi si sfruttano quasi tutte le lavorazioni che si sono viste in precedenza come evidenziato dalla figura 8.6. 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 8.2:** Brocciatura**Figura 8.3:** 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 8.4: 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 8.5: Indicazioni sulla produttività delle specifiche lavorazioni per asportazione di truciolo

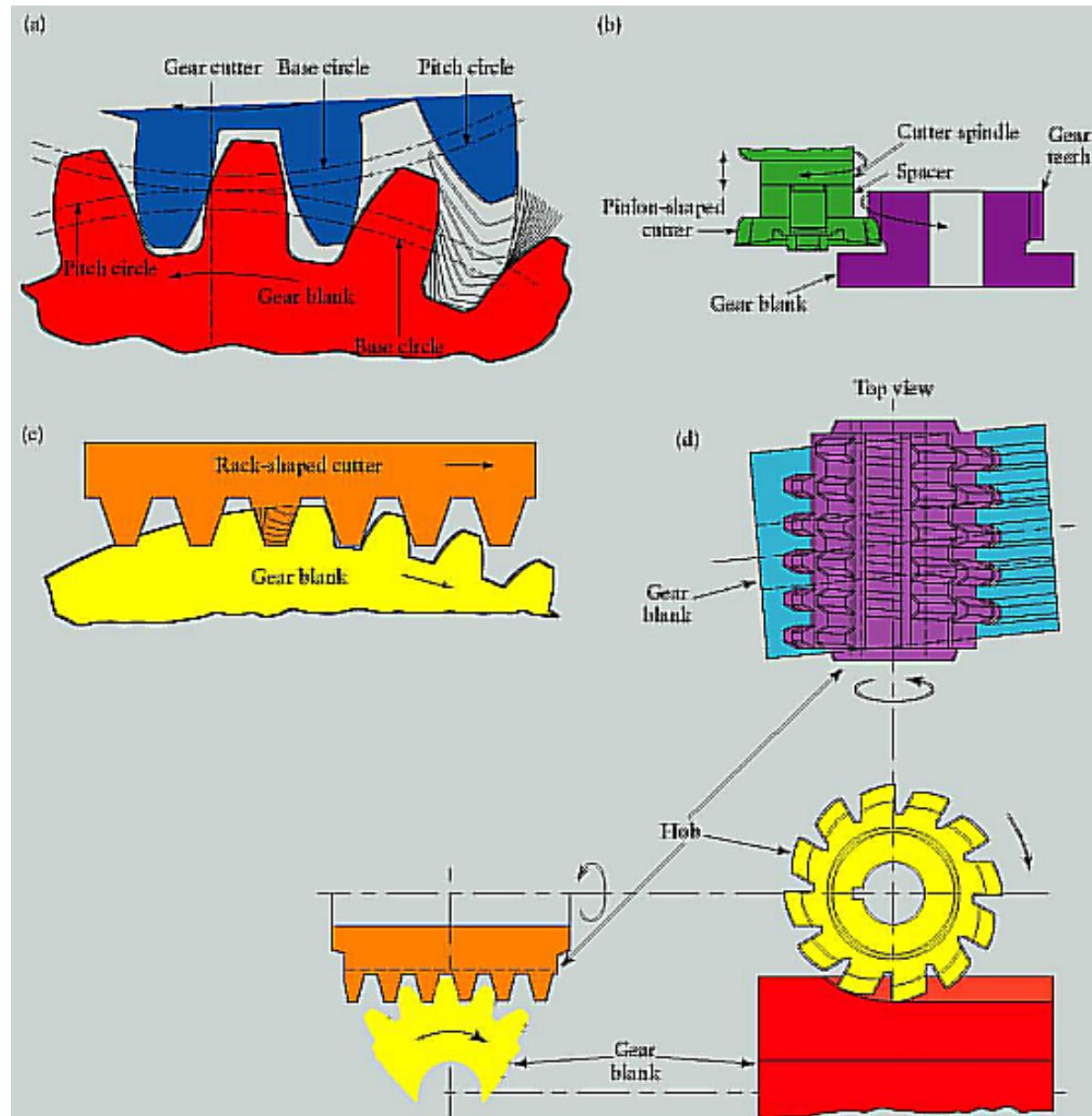


Figura 8.6: Alcuni utensili per la produzione di ingranaggi

CAPITOLO 9

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 9.1 e 9.2.

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 9.1 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 9.2 vengono disposti per lavorazioni simili alla precedente ma su materiali non ferrosi, come indicati nella didascalia del grafico.

I grafici 9.1 e 9.2 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 9.3 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:

$$v = Z_v * v_s \quad (9.1)$$

$$f = Z_f * f_s \quad (9.2)$$

$$w = \text{Depth of cut} * w_s \quad (9.3)$$

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 broccatura 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.

9.1 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

$$t_c = \frac{\text{velocità di taglio}}{\frac{v_c}{V_t}} \quad (9.4)$$

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.

9.1.1 Esempio applicativo

Un esempio applicativo per il calcolo dei parametri utili per una lavorazione in asportazione di truciolo è riportato all'appendice A a pagina 176.

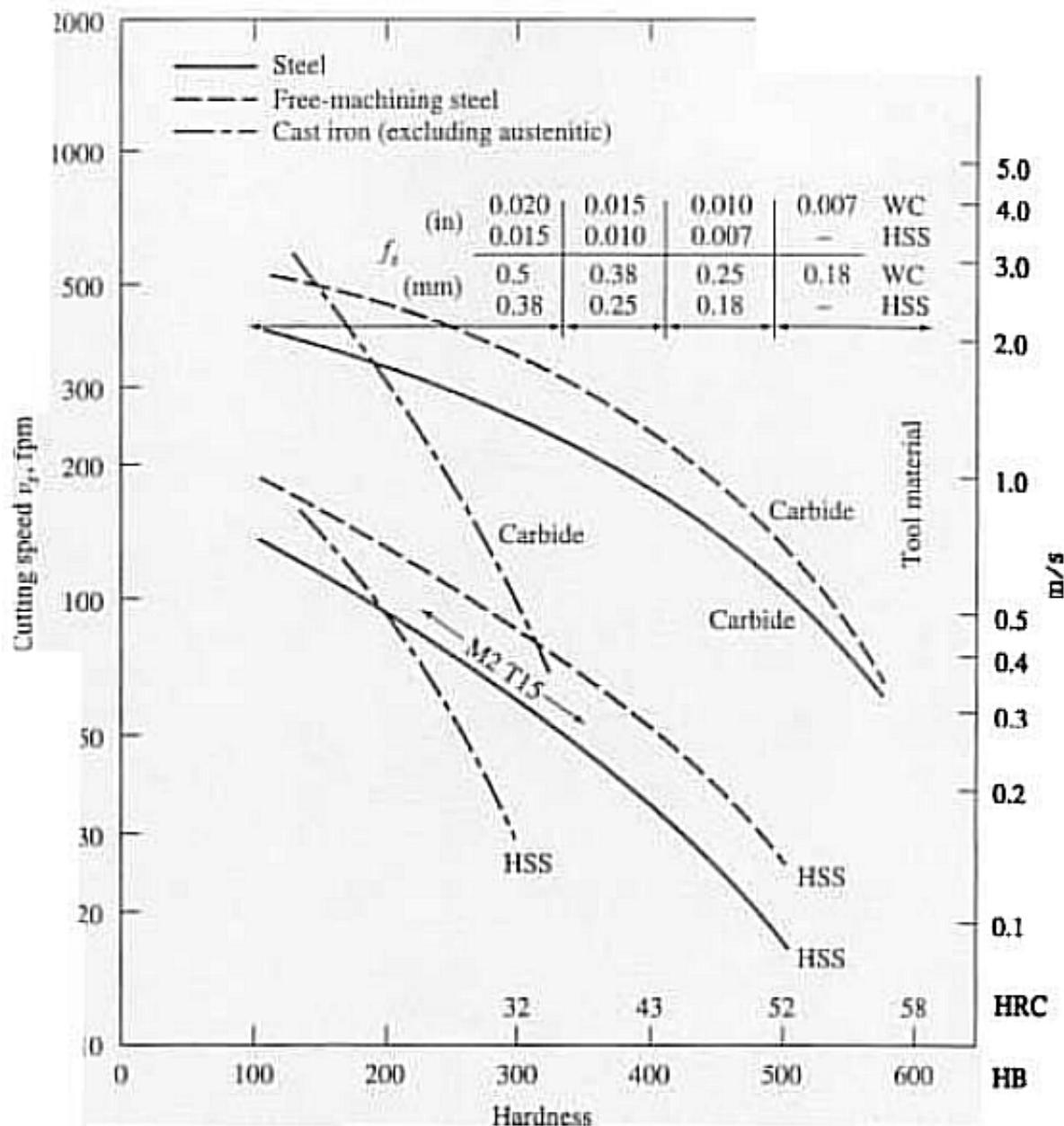


Figure 16-45 Typical speeds and feeds for roughing ferrous materials with a 3.8-mm (0.150-in) depth of cut. Increase speed by 20% for throwaway carbide inserts; reduce speed by 20–30% for austenitic stainless steels and for tool steels containing over 1% carbon.

Figura 9.1: Relazione tra durezza del materiale lavorato, velocità della lavorazione e avanzamento dell'utensile.

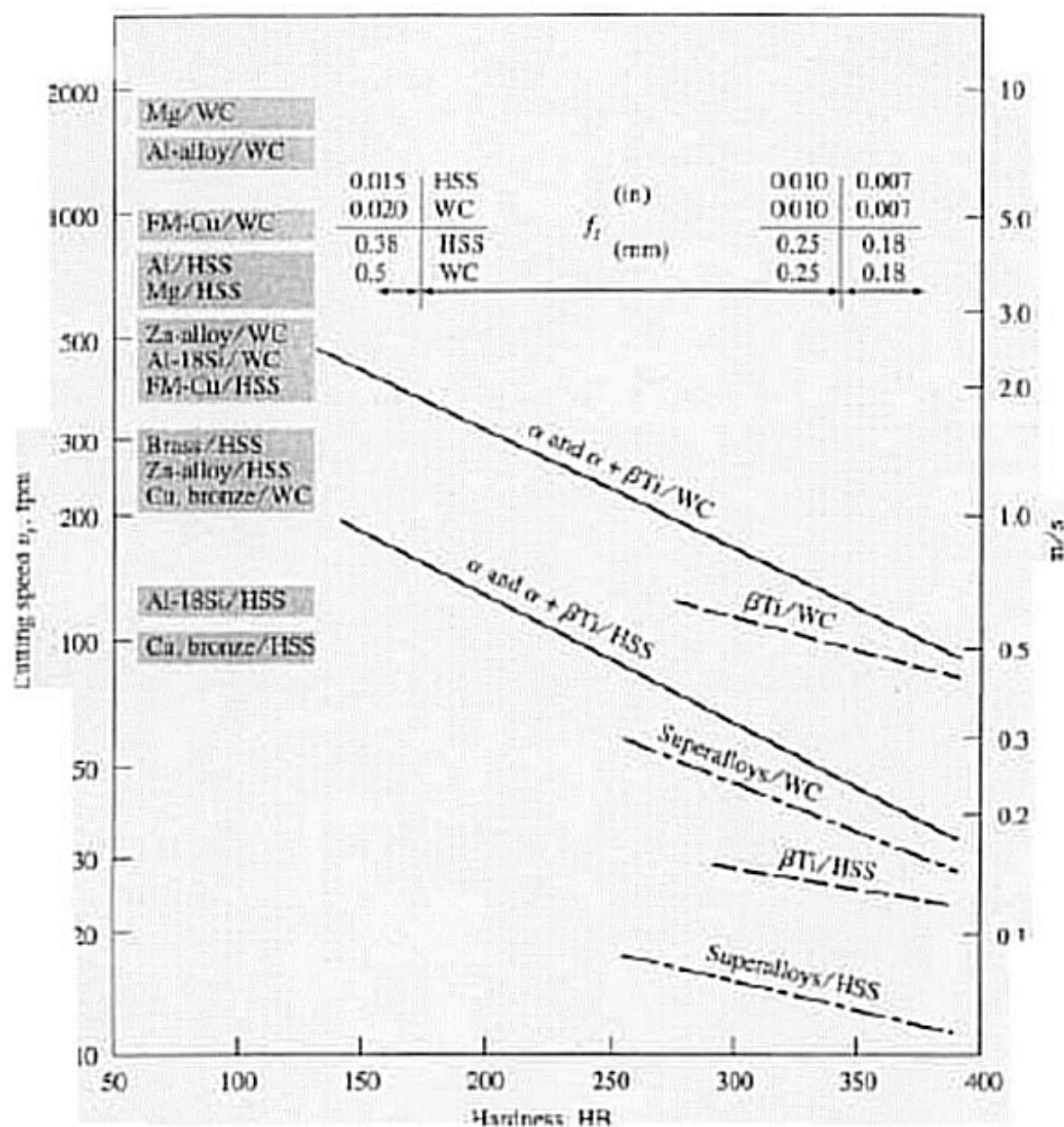


Figure 16-46 Typical speeds and feeds for roughing nonferrous materials with a 3.8-mm (0.150-in) depth of cut (FM stands for free-machining metal, WC for carbide tool).

Figura 9.2: 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 9.3: Parametri modificatori per lavorazioni diverse da quelle di riferimento (tornitura in sgrossatura)

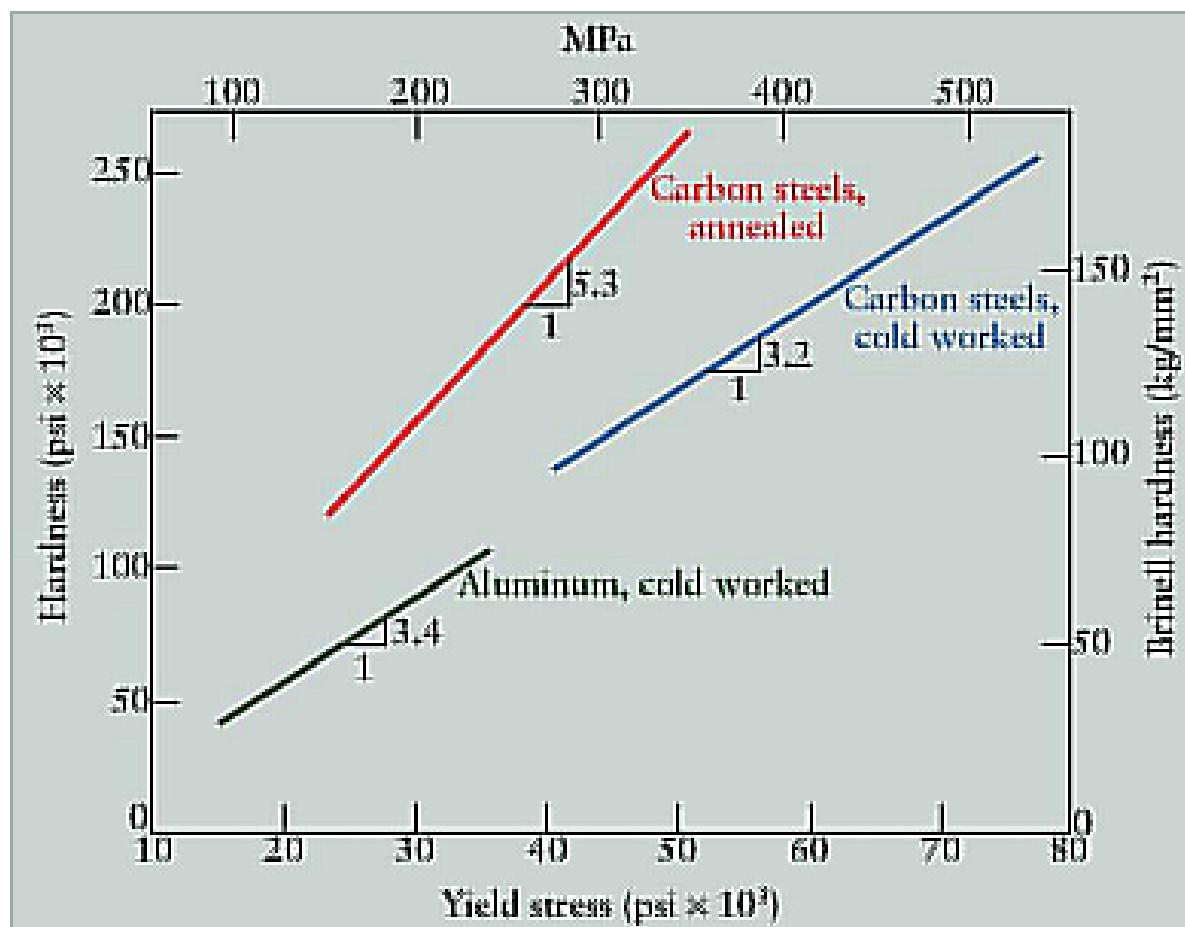


Figura 9.4: Specifiche durezza dei materiali

CAPITOLO 10

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.

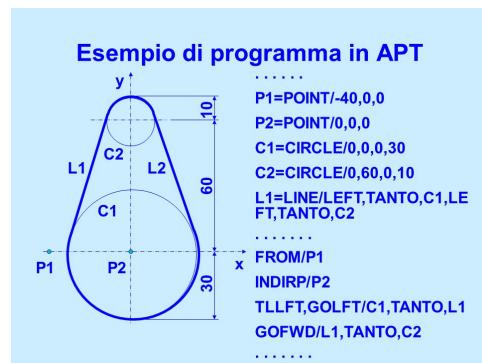
Si era già accennato lo sviluppo delle macchine **CNC**. La diffusione di tali macchine è dovuta all'integrazione tra macchina e processore. La programmazione di queste macchine è in linguaggio ISO, in figura 10.1a. Non è un linguaggio particolarmente comprensibile. Dunque gli sviluppi successivi hanno portato allo sviluppo del linguaggio APT, in figura 10.1b. 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 M08  
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
```

(a) Esempio di programmazione in codice ISO



(b) Esempio di programmazione in codice APT

Figura 10.1: Esempi di programmazione per macchine CNC

10.0.1 Esempio di controllo numerico

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

10.1 Ottimizzazione delle lavorazione 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.

$$vT^n = \text{cost}. \quad (10.1)$$

Le costanti note devono essere: n e cost .

Parametri che verranno considerati:

t_c durata lavorazione pezzo [s],

R_t costo unitario [\$/min]



Figura 10.2: 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 (10.2).

$$C_{tp} = \frac{1}{N_t} (T_{ch} R_t + C_t) \quad (10.2)$$

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:

$$C_{pr} = t_c R_t + \frac{1}{N_t} (T_{ch} R_t + C_t) \quad (10.3)$$

Siccome la lavorazione dura:

$$t_c = \frac{l}{v} \quad (10.4)$$

e il numero di pezzi prodotti:

$$N_t = \frac{\overbrace{t}^{\text{Durata utensile}}}{t_c} \quad (10.5)$$

Allora:

$$C_{pr} = \frac{l}{v} R_t + \frac{t_c}{t} (t_{ch} R_t + C_t) \quad (10.6)$$

La durata utensile è rappresentata da:

$$t = t_{ref} \left(\frac{C}{v} \right)^{1/n} \quad (10.7)$$

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

$$C_{pr} = \frac{l}{v} R_t + \frac{l}{t_{ref} C^{1/n}} (t_{ch} + r_t) v^{(1-n)/n} \quad (10.8)$$

per trovare il costo di produzione minimo derivo nella velocità la formula di Taylor opportunamente costruita (10.8):

$$\frac{dC_{pr}}{dv} = 0 = -\frac{l}{v} R_t + \frac{1-n}{n} \frac{l}{t_{ref} C^{1/n}} (t_{ch} R_t + C_t) v^{(1-2n)/n} \quad (10.9)$$

Si può esprimere a partire da (10.8) un'espressione della velocità minima della lavorazione per garantire il raggiungimento del target della (10.9):

$$v_{c,min} = C \left[\frac{n}{1-n} \left(\frac{t_{ref} R_t}{t_{ch} R_t + C_t} \right) \right] \quad (10.10)$$

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...

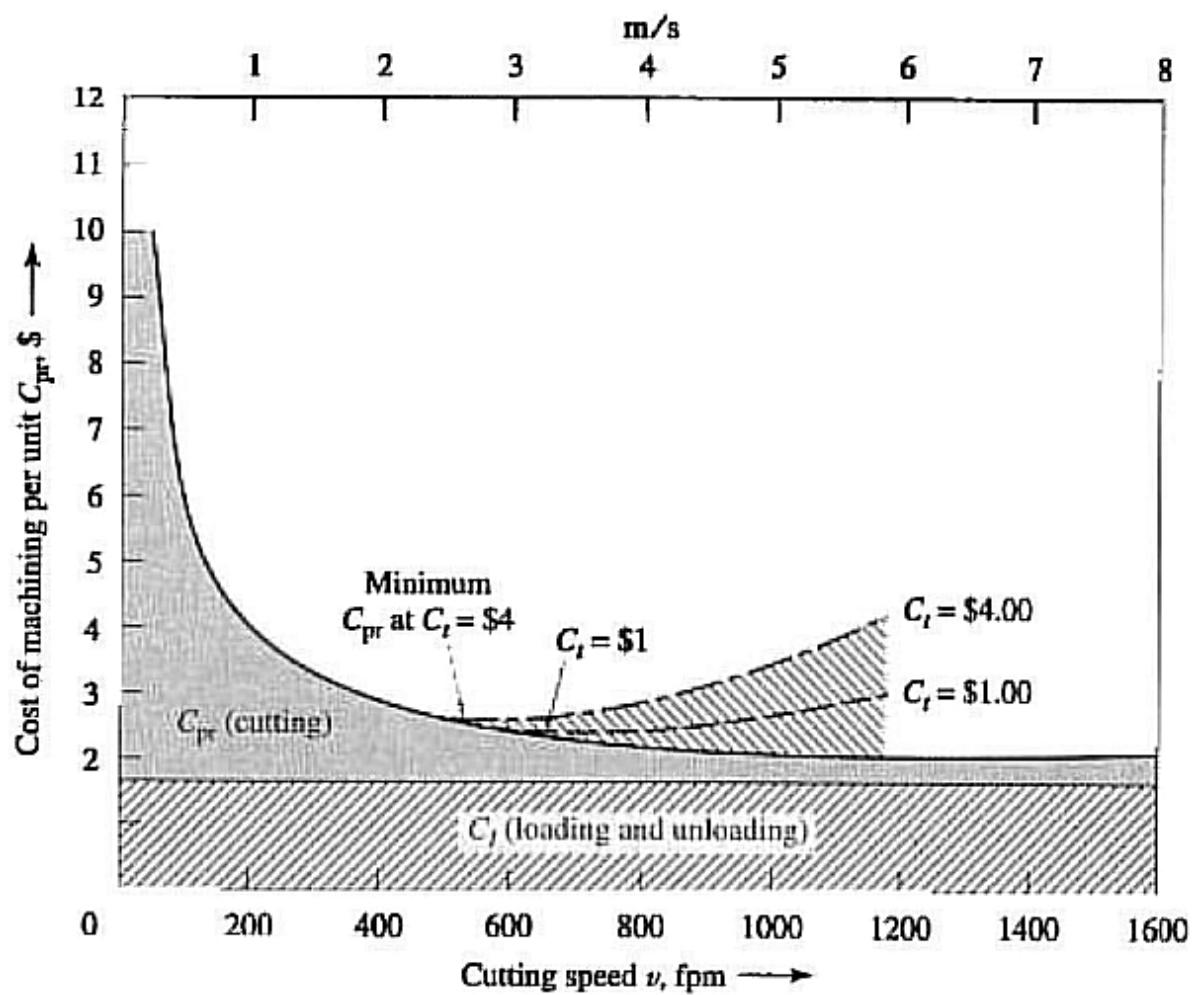


Figura 10.3: Rappresentazione della funzione (10.8)

CAPITOLO 11

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 (11.1) 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 11.2a 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 11.2b. Se siamo fortunati allora il tagliente riesce effettivamente a rimuovere il materiale e tagliare come in figura 11.2c.

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 11.3, 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 tolgo 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 attaccino 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.

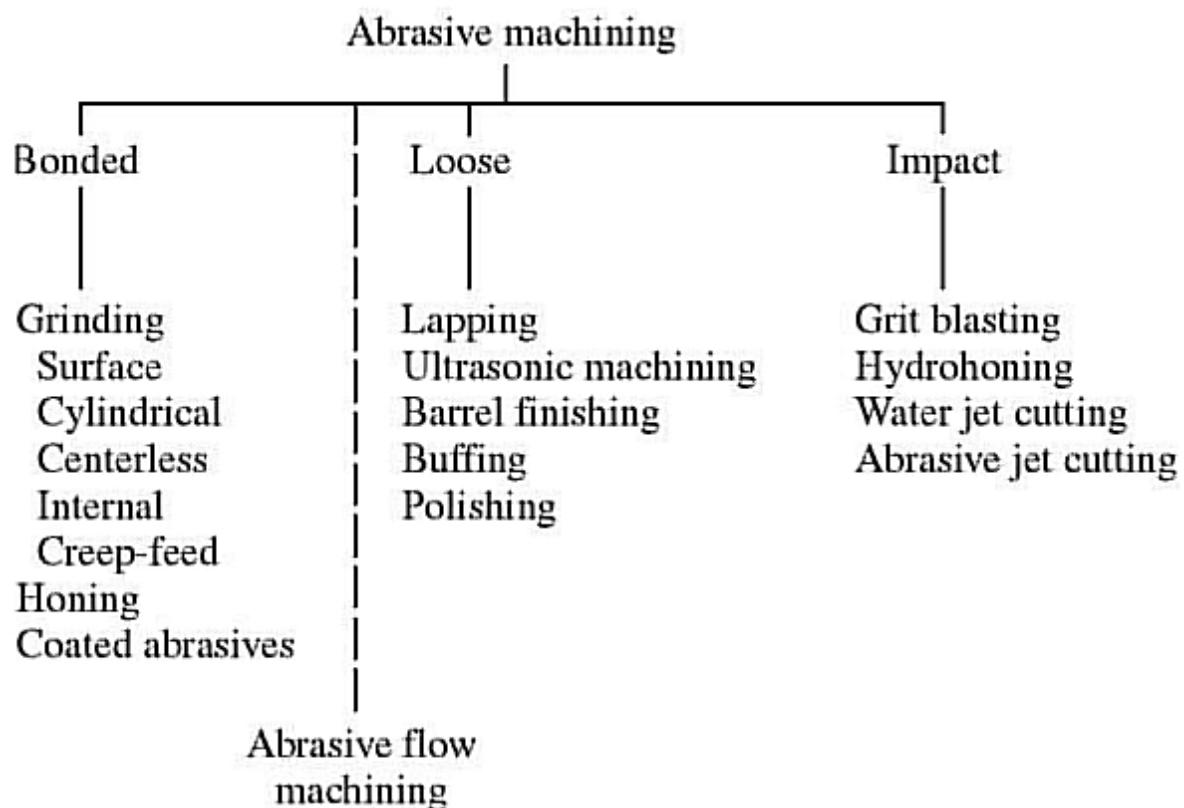
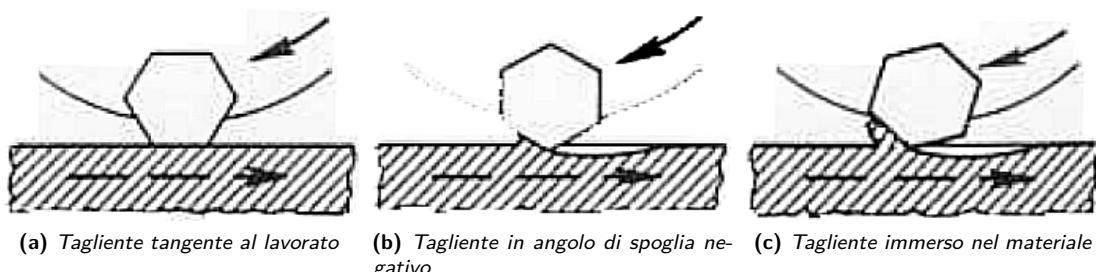
11.1 Rettifica

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

$$G = \frac{\text{Materiale rimosso dalla mola}}{\text{materiale asportato dal pezzo}} \quad (11.1)$$

Z_w
 $\underbrace{Z_s}_{\text{materiale asportato dal pezzo}}$

**Figura 11.1:** Principali lavorazioni abrasive**Figura 11.2:** Casistiche in cui si può trovare la particella tagliente

Material	Hardness, HB	Specific I 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 11.3: Tabella delle energie specifiche di lavorazione per diversi materiali

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.

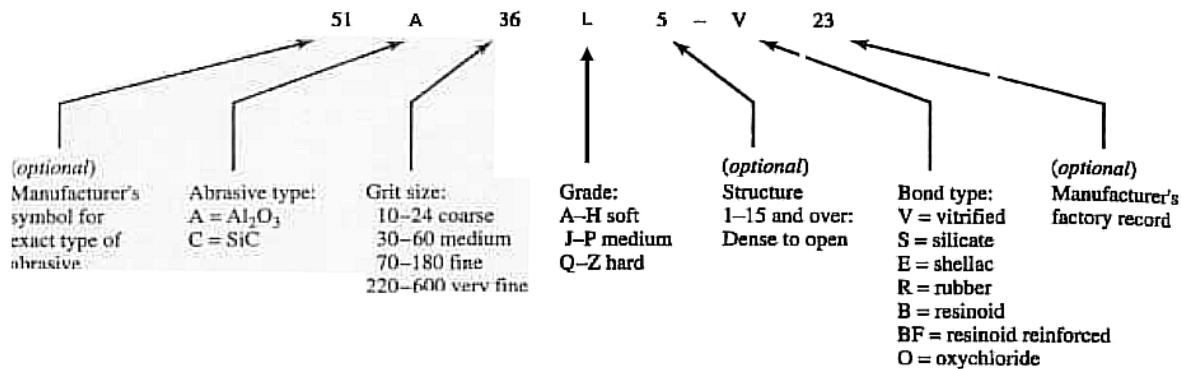
Il legante più usato è il vetro, ciò dipende da che tipo di mola si sta utilizzando e per quale tipo di lavorazione di deve eseguire. Altri leganti possono essere delle sostanze organiche che risultano meno forti del vetro. Il vetro non si usa per i *superabrasivi*, in quel caso viene utilizzato il bronzo 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 11.4 si vedono i parametri.

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

**Figura 11.4:** Descrizione della sigla per le mole

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 rinvivatura si realizza tramite la pressione di un utensile piuttosto semplice.

11.1.1 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 un polvere molto fine di materiale asportato che si infiltra nella porosità della mola.

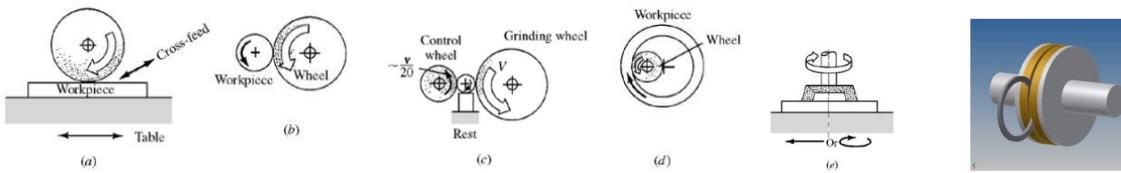
Si cerca di limitare l'utilizzo di tali fluidi perché creano poltiglia tra fluido da rettifica e polvere del materiale asportato. Grazie ai fluidi si abbassa di molto l'energia specifica per la rettifica la quale spesso viene trasformata, durante la lavorazione, in energia termica che può essere problematica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

11.1.2 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.

(a) *Rettifica orizzontale e cilindrica*(b) *Rettifica senza centri e rettifica interna*(c) *Rettifica al lapitello e di forma***Figura 11.5:** Esempi di rettifica

11.1.2.1 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.

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.

11.1.2.2 Esempio

Un esempio applicativo dei parametri utili alla realizzazione di una corretta rettifica è riportato all'appendice ?? a pagina ??.

11.1.3 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.

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.

11.1.4 Levigatura

Si presenta un utensile, [11.6a](#), con dei settori abrasivi. I quali hanno anche un ulteriore movimento in senso radiale. L'operazione viene utilizzata 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 [11.6b](#).

11.2 Abrasione non legata

11.2.1 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.

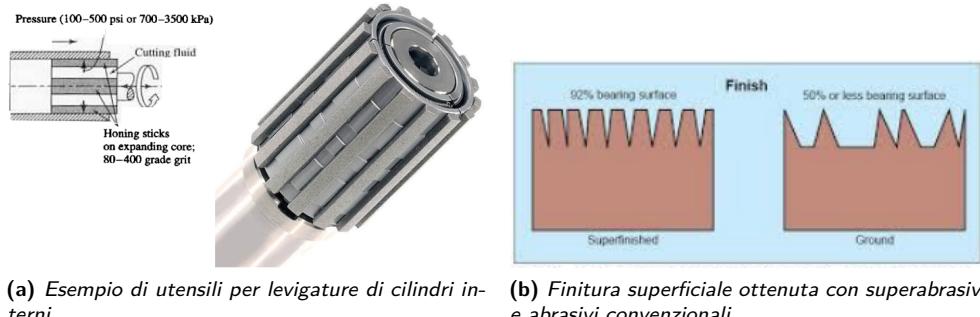


Figura 11.6: Considerazioni sulla levigatura

Alla figura 11.7a vengono mostrati lo schema di funzionamento e un macchinario per la lappatura. Viene spesso usata per realizzare oggettistica tridimensionale come possono essere le lenti.

L'abrasione ad ultrasuoni è una lavorazione particolarmente adatta per materiali fragili. Vedi figura 11.7b.

11.2.2 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. In figura 11.7c. 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.

11.2.3 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

11.3 Considerazioni finali

L'asportazione di truciolo si apprezzano 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

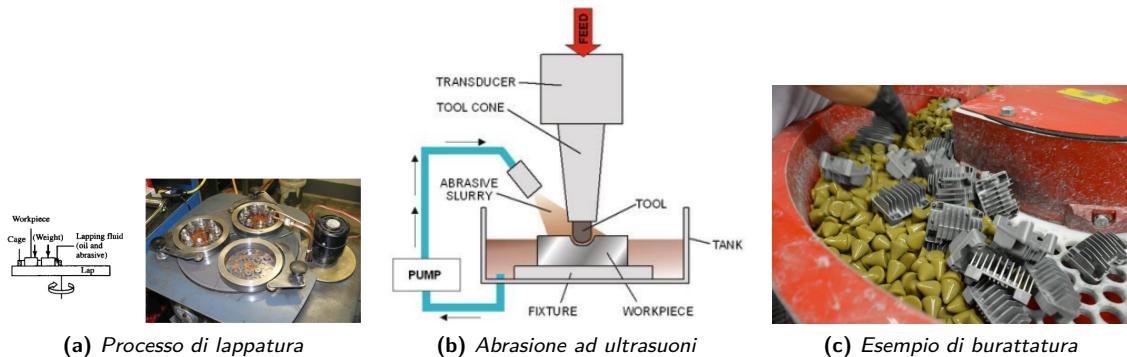


Figura 11.7: Lavorazioni abrasive non legate

Tabella 11.1: Confronto delle lavorazioni abrasive a confronto con altre lavorazioni ad asportazione. 'A' indica un parametro ottimale, 'E' il peggiore

Characteristics	Machining Process					
	Lathe Turning	Automatic Screw Machine		Drilling	Milling	Grinding
	All	All	All	All	Hard	Hard
<i>Part</i>						
Material	All	All	All	All	Hard	Hard
Preferred		Free-machining	Free-machining	Free-machining		
Shape*	R0-2; T0-2; Sp; U1-4	As turning	T0.6	B; S; SS; F0-4, 6, 7; U7	As turning, milling	R0-2; B0-2, 7; T0-2, 4-7; F0-2; Sp
Min. section, mm	< 1 diam.	< 1 diam.	0.1 (hole diam.)	< 1	< 0.5	< 0.5
Surface configuration	Axially symmetrical	As turning	Cylindrical	Three-dimensional	As turning, milling	Flat, cylindrical, 3-D
<i>Cost†</i>						
Equipment	B-D	A-C	D-E	A-C	A-C	B-D
Tolling	D-E	A-D	D-E	A-D	E-D	A-E
Labor	A-C	D-E	B-D	A-B	A-E	B-D
<i>Production</i>						
Operator skill†	A-C	D-E	B-E	A-B	A-D	C-E
Setup time†	C-D	A-C	C-E	A-C	B-D	C-E
Rates (pieces/h)	1-50	10-500	10-500	1-50	1-1000	1-1000
Min. quantity	1	1000	1	1	1	1

Tabella 11.2: Forme lavorabili per abrasione

Abbreviation	Increasing spatial complexity →							
	0 Uniform cross section	1 Change at end	2 Change at center	3 Spatial curve	4 Closed one end	5 Closed both ends	6 Transverse element	7 Irregular (complex)
R(ound)								
B(ar)								
S(ection, open) SS(emclosed)								
T(ube)								
F(lat)								
Sp(herical)								
U(ndercut)								

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.

11.3.1 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.
- Trapanatura, fresatura ed altre operazioni producono bave.
- La sbavatura è molto costosa e lo spessore della bava determina la modalità di rimozione.
- La possibilità di raggiungere una determinata accuratezza dipende dalla dimensione del componente.
- Le macchine devono essere estremamente rigide, con mandrini e guide precisi.
- Anche gli afferraggi devono essere precisi e la forza applicata tale da non provocare distorsioni.
- La temperatura deve essere controllata.

Parte IV

Lavorazioni non convenzionali

CAPITOLO 12

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 12.1 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.

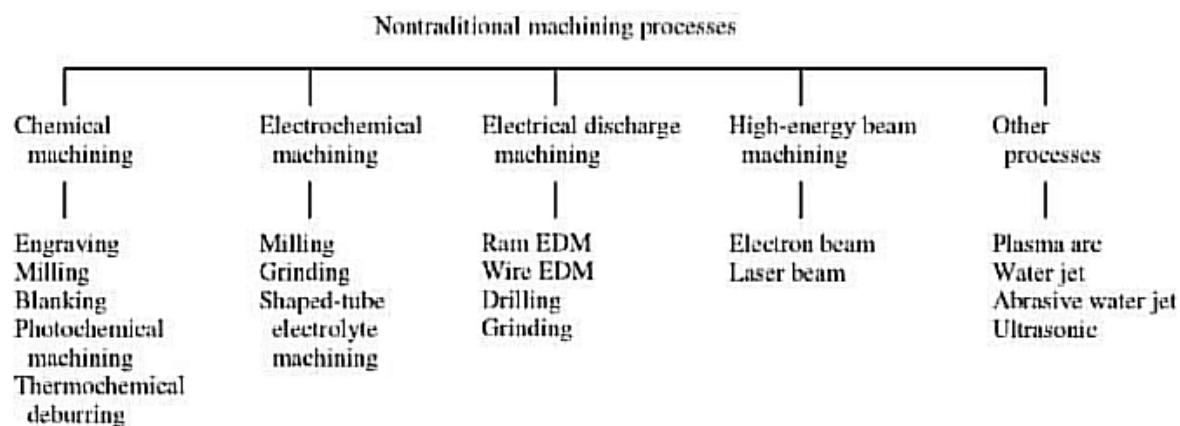


Figura 12.1: Classificazione lavorazioni non convenzionali

12.1 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 12.2 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 12.3, 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 il 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 lamierie sottili. Quando la maschera viene ottenuta tramite tecniche fotochimiche, il processo viene chiamato lavorazione fotochimica.

12.2 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 costituirsi uno strato di ossido, ma può essere facilmente rimosso tramite scintille. Il funzionamento è illustrato alla figura 12.4.

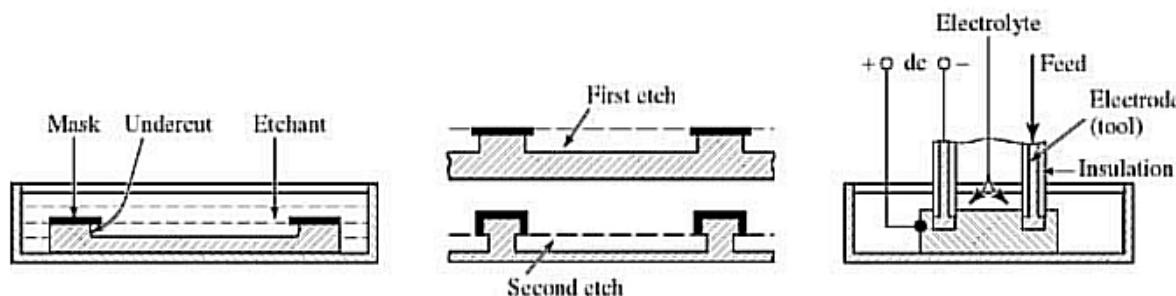


Figura 12.2: Modalità di attacco chimico

	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 12.3: Risultati ottenibili con le lavorazioni chimiche

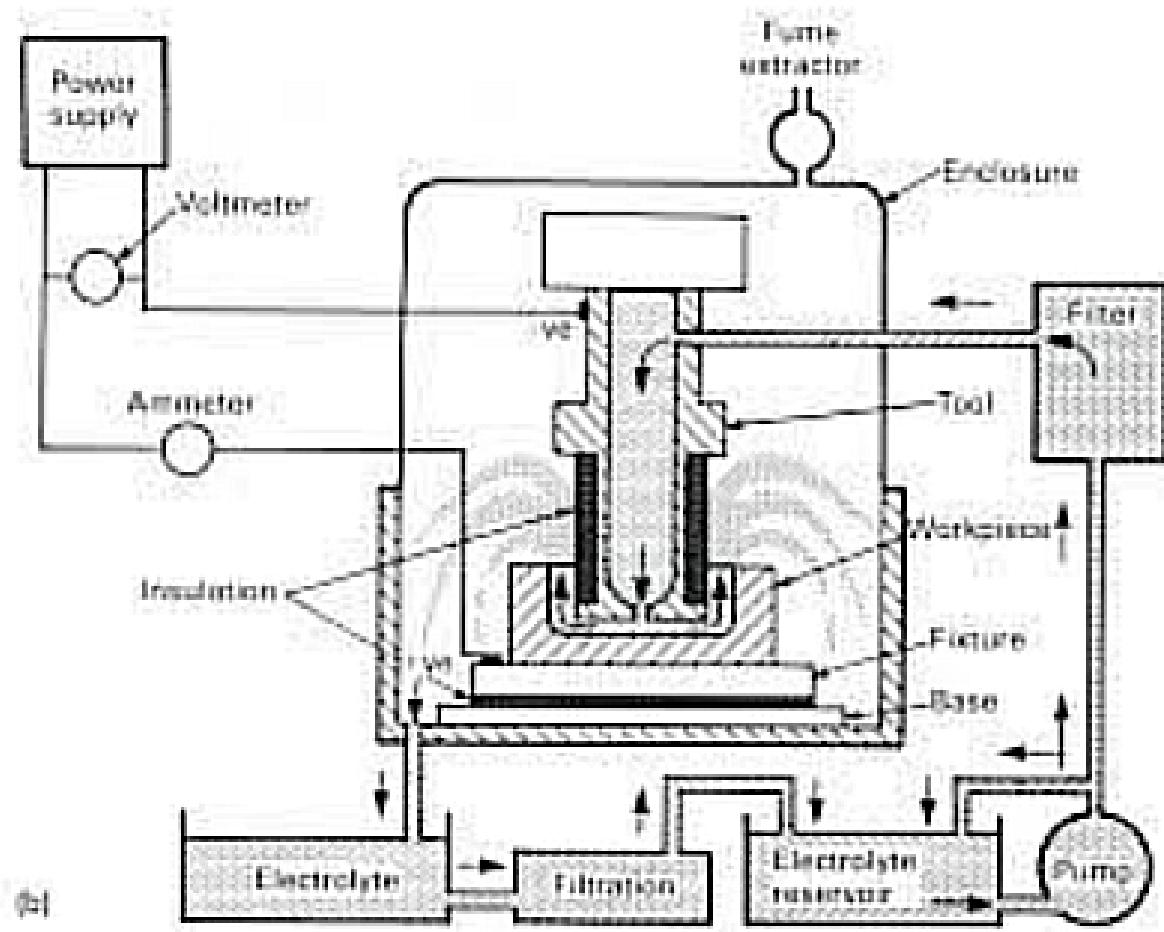


Figura 12.4: Schema generale delle lavorazioni elettrochimiche

12.2.1 Elettroerosione

Si tratta di una lavorazione molto importante perché permette di finire gli stampi. Anche se ultimamente sta perdendo disegno. Alle figure 12.5 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. Oltretutto 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.

12.2.2 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 12.5a.

I dielettrici più usati sono

- olio dielettrico
- Eventualmente acqua

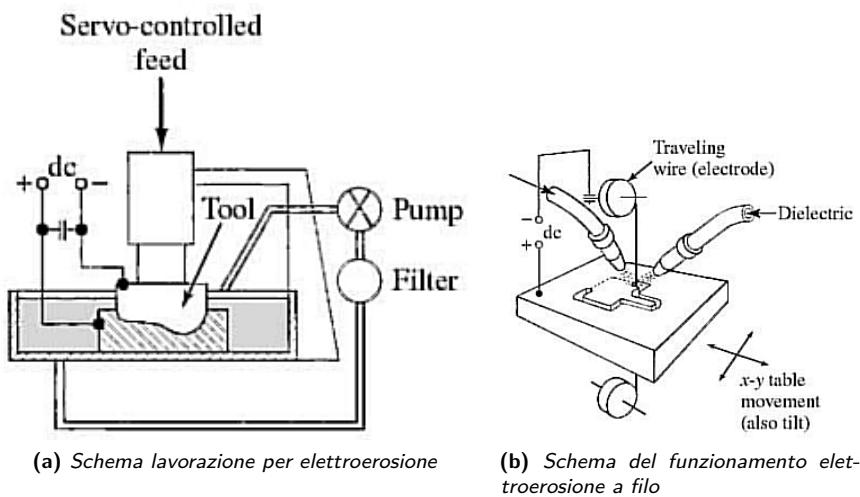
In qualche caso, l'elettrodo ha movimento laterale ma è una casistica molto rara. In più, grazie all'avvento delle macchine CNC è possibile realizzare forme parecchio complesse con degli elettrodi piuttosto semplici.

12.2.3 Elettroerosione a filo

Si parte da un blocco di materiale e tramite l'elettroerosione a filo , 12.5b, 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 traciatura.

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

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

**Figura 12.5:** Possibilità dell'elettroerosione

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.

12.3 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.

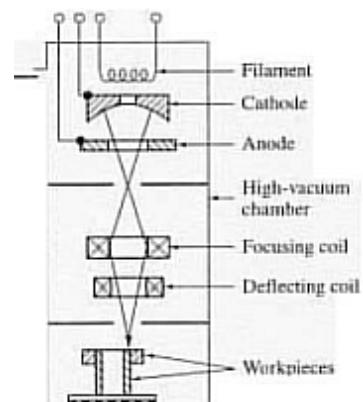
12.3.1 A fascio elettronico

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 12.6. 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 lavorato.

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.

**Figura 12.6:** Schema funzionamento tubo catodico

12.3.2 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 12.7. 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 nascosti. Un esempio è riportato alla figura 12.7b.

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 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 CO_2 . Di certo, essendo più concentrata l'energia si può trasmettere a distanze maggiori. In più con opportune ottiche si può suddividere in più fasci.

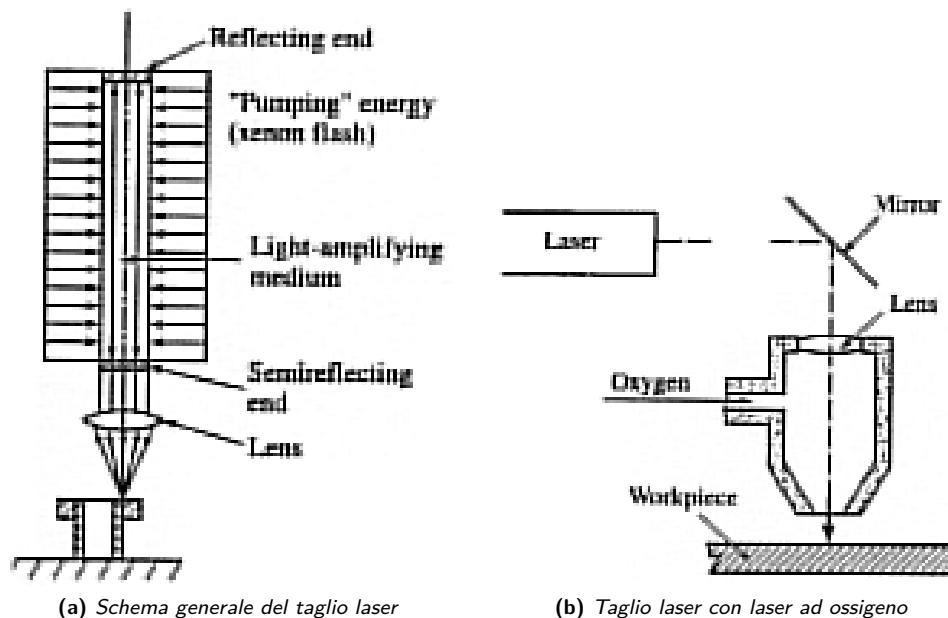


Figura 12.7: Esempi di taglio laser

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 altopondenti. 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 CO_2 , fino ad arrivare al 1 μm per il laser ad eccimeri.

12.3.3 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 [12.8a](#).

12.3.4 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 [12.8b](#).

12.4 Taglio ad acqua

Si usa l'energia meccanica generata da un getto d'acqua contenente delle particelle abrasive come in figura [12.8c](#). 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 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.



Figura 12.8: Altre lavorazioni non convenzionali

Parte V

Tecniche di giunzione

CAPITOLO 13

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.

13.1 Classificazione delle tecniche

Le principali tecniche di fissaggio sono quelle della figura 13.1a.

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.

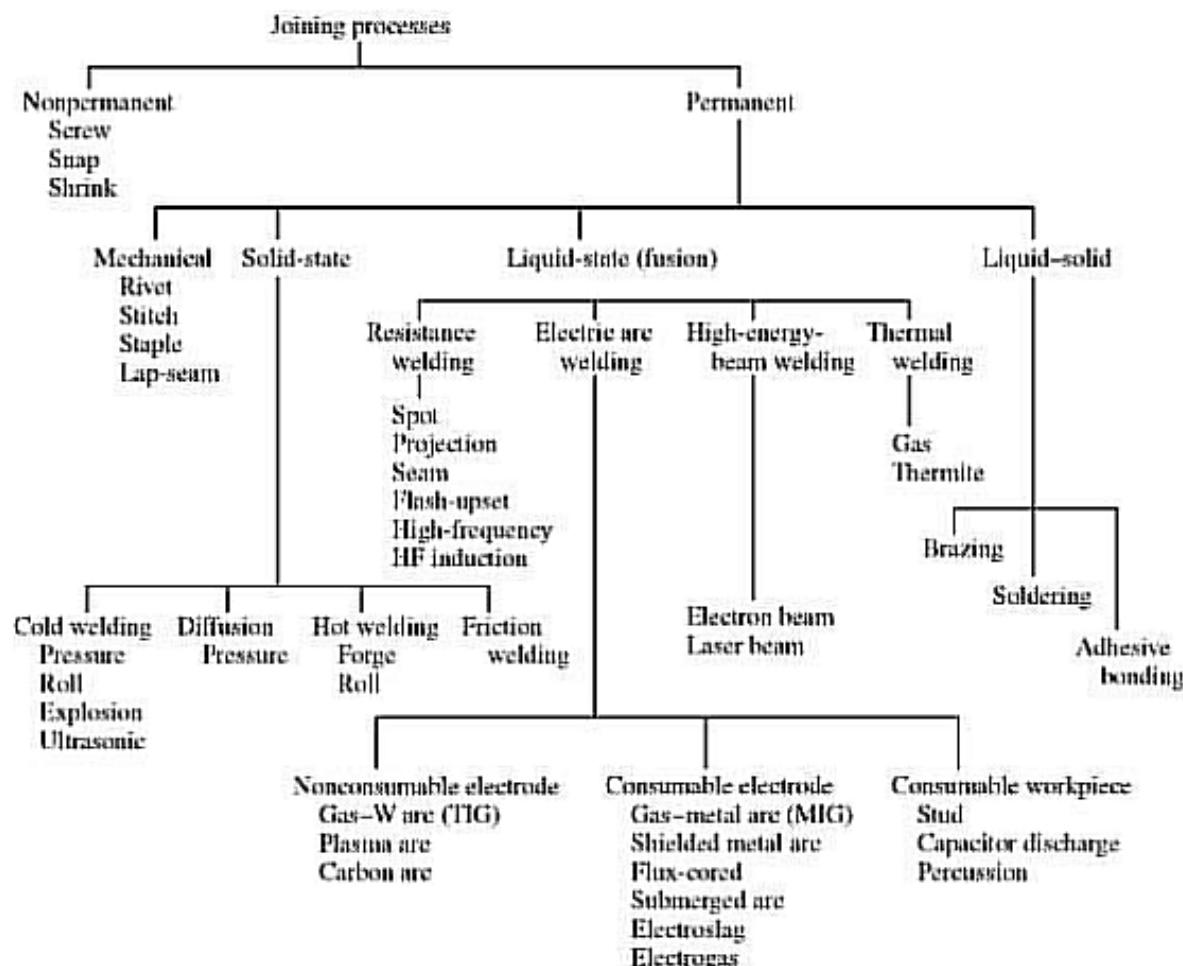
Bullonatura Si sfruttano dei componenti meccanici per mantenere uniti più pezzi.

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 13.1: Fissaggi

CAPITOLO 14

Giunzioni meccaniche

14.1 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 14.1.

La più comune tra le rivettature è a **Rivetti ciechi** come quelli in figura 14.2.

Il fatto che la rivettatura sia costosa rispetto ad altre giunzioni per il fatto che i componenti da giungere 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 14.3a. Bisogna lasciare il giusto spazio affinché la macchina che crea la testa possa lavorare correttamente, caso 14.3b. Anche il fatto di forare vicino ai bordi può essere fonte di pessimo comportamento a fatica, caso 14.3d.

14.1.1 Grafettatura

Si possono realizzare giunzioni tramite una graffetta per lamiera, 14.4a. Non hanno alti carichi di giunzione ma vengono alle volte usate per la realizzazione di mobili.

14.1.2 Aggraffatura

Si era anticipato l'argomento al capitolo 1 a pagina 2. Comunque in figura 14.4b è riproposto il processo per realizzare tale tipo di giunzione.

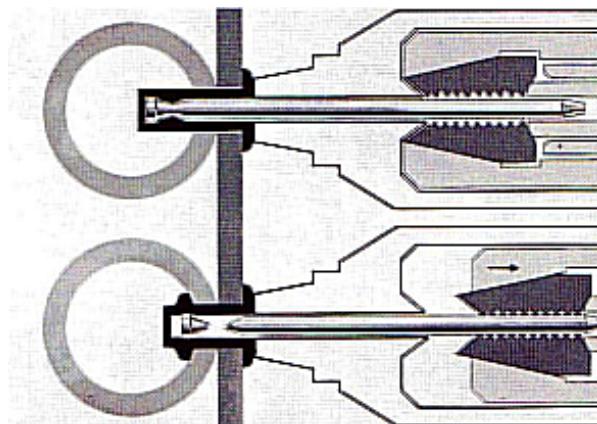
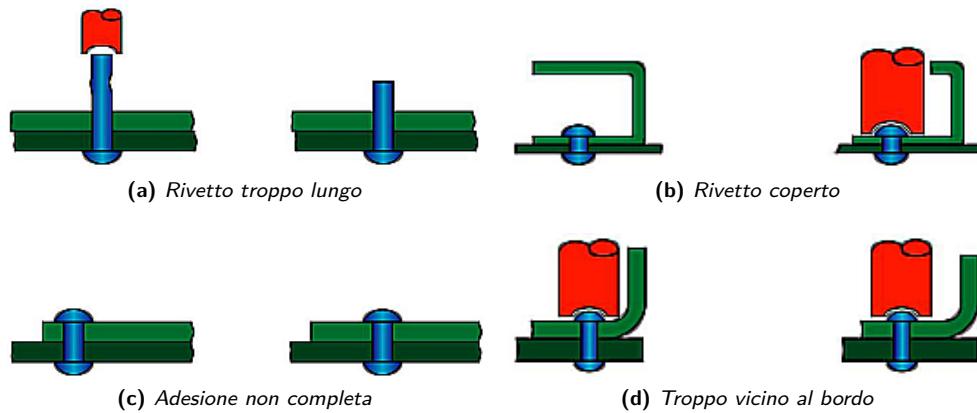
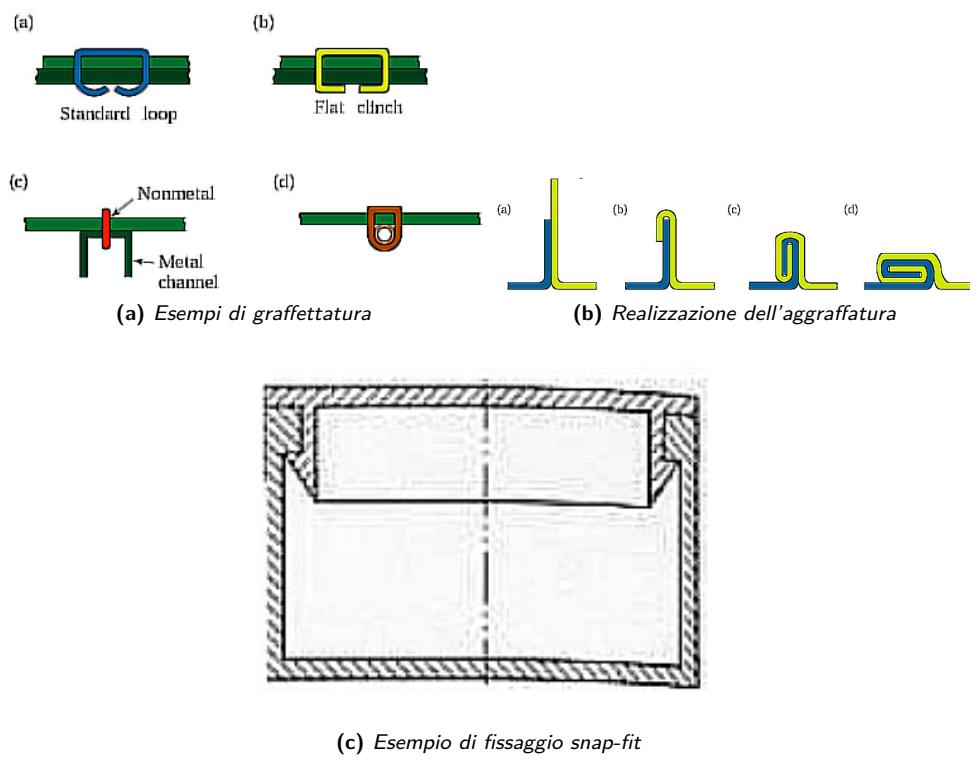


Figura 14.2: Rivettatura cieca

**Figura 14.3:** Considerazione sulla corretta rivettatura**Figura 14.4:** Fissaggi meccanici di graffettatura, aggraffatura e snap-fit

14.2 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 14.5.

14.2.1 Sanp-fit

Detta anche chiusura a scatto, 14.4c. 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.

14.2.2 Ribattitura

Si "gonfiano" le lamiere e successivamente viene deformata per poter fissare entrambe tramite la deformazione di entrambe. Il processo è riportato alla figura 14.6. Viene usata per la realizzazione dell'accoppiamento tra lattina e aprilattina.

Invece, alla figura 14.7 sono riportati ulteriori metodi di fissaggio meccanico.



Figura 14.1:
Tipologie di rivetti

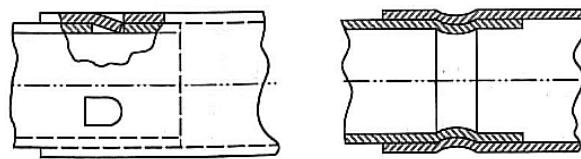


Figura 14.5: Alcuni esempi di fissaggio per deformazione plastica

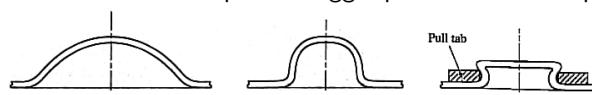


Figura 14.6: Processo di ribattitura

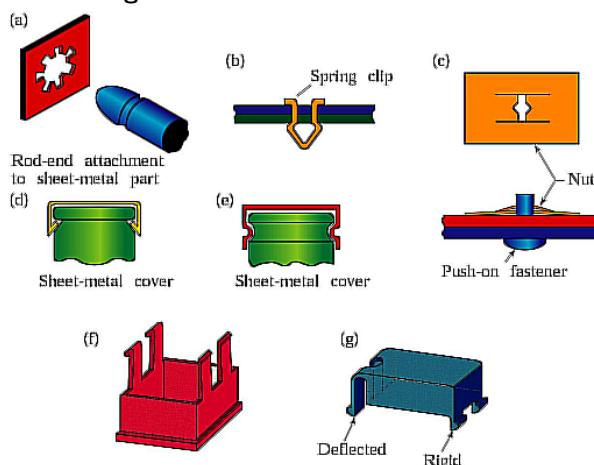


Figura 14.7: Ulteriori metodi di fissaggio meccanico utilizzati

CAPITOLO 15

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 15.1a.

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.

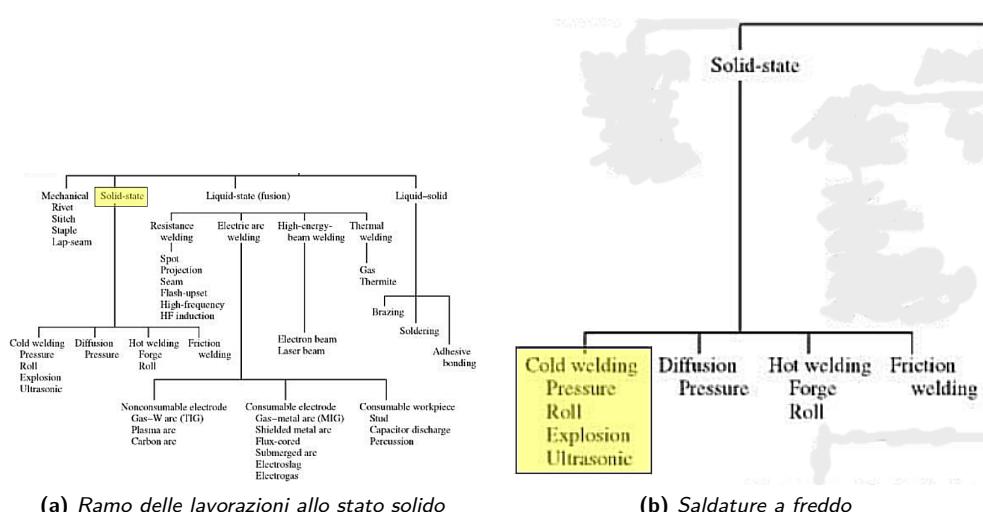


Figura 15.1: Saldature allo stato solido col dettaglio delle lavorazioni a freddo

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.

15.0.1 Saldature a freddo

Le possibilità della saldatura a freddo, come illustrato dal grafico [15.1b](#), sono:

Saldatura a freddo per sovrapposizione Si basa su una forte dilatazione delle superfici come illustrato alla figura [15.2a](#).

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 [15.2a](#).

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 [15.2b](#) 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 [15.2d](#) e [15.2e](#), 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 [15.2f](#).

15.0.2 Saldature per diffusione

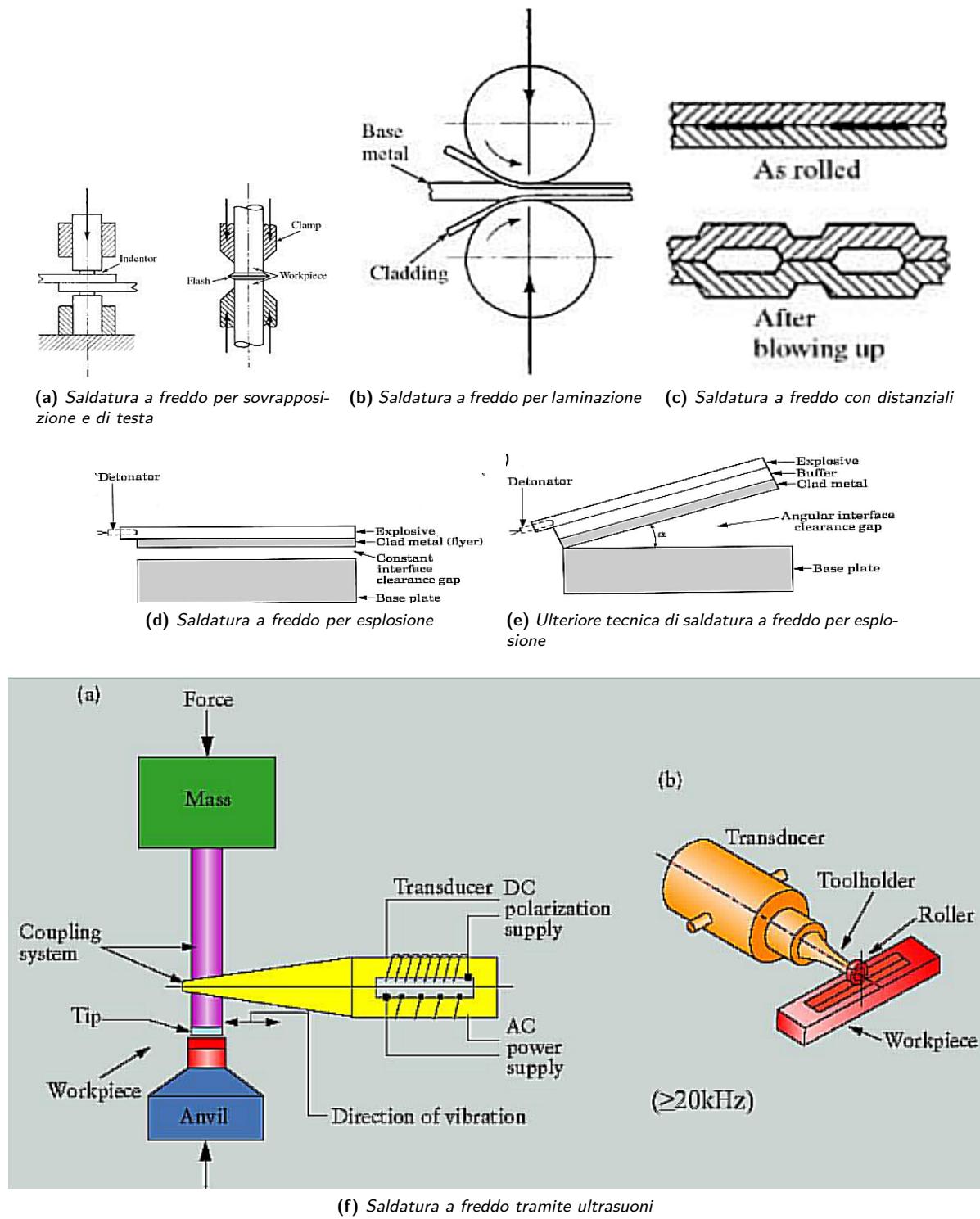
Si potrebbero eseguire anche senza avere temperature eccessivamente alte $\approx 0.5T_m$. Nella pratica vengono comunque sfiorate le temperature normali per favorire la corretta avvenuta della giunzione. Di fatto favorendo la diffusione degli atomi dei due materiali. Tale tecnica si usa da secoli per 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 giungere per ottenere una qualità migliore. Tale tecnica permette di realizzare degli oggetti saldati alternativamente senza dover subire ulteriori lavorazioni. Ciò viene realizzato interponendo dei distanziatori 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 [15.3](#) 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.

15.0.3 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 *saldoforgiatura*. I pezzi caldi e preformati vengono forgiati insieme per provocare la fuoriuscita di ossidi, scorie e contaminanti.

**Figura 15.2:** Principali tecniche di saldatura a freddo

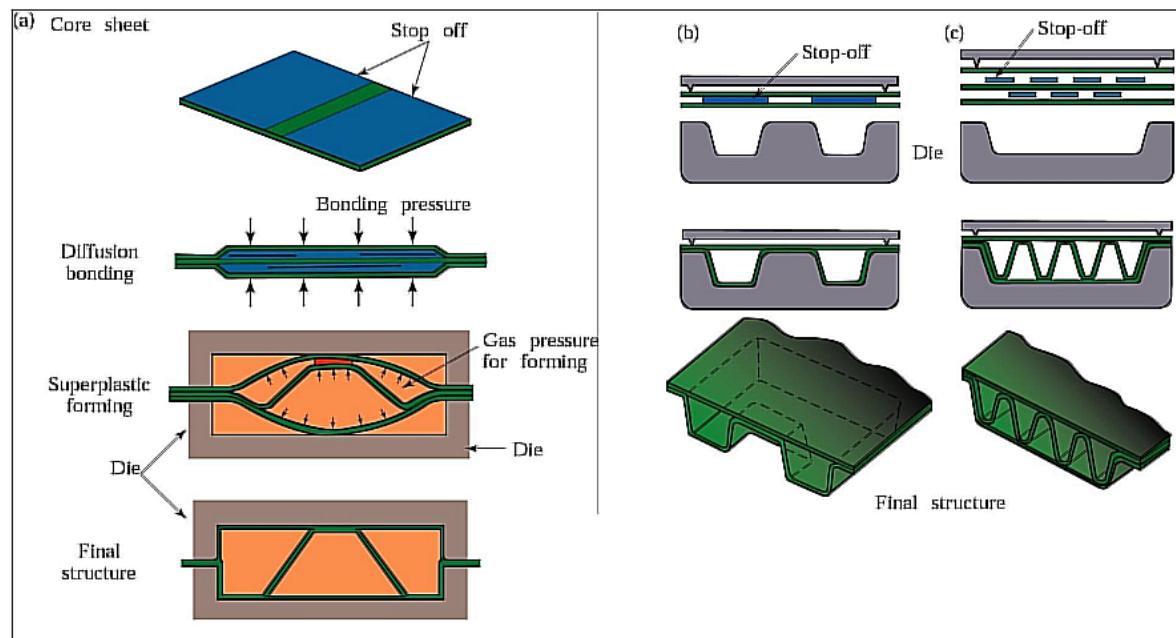


Figura 15.3: Realizzazione per saldatura a diffusione di profili utilizzati in aeronautica

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. Le figure 15.4 rappresentano alcune delle modalità con cui scaldare il materiale per poi applicare la pressione al fine di rompere gli strati superficiali e separare il fuso da impurità.

La differenza con le saldature allo stato fuso è che in questo caso, sebbene si scaldi il materiale, non lo si porta a fusione,

Eventualmente il riscaldamento può essere realizzato tramite torce a gas. Altre tecniche di saldatura possono essere realizzate tramite laminazione a caldo. Il processo è del tutto analogo alle lavorazioni a caldo per deformazione plastica.

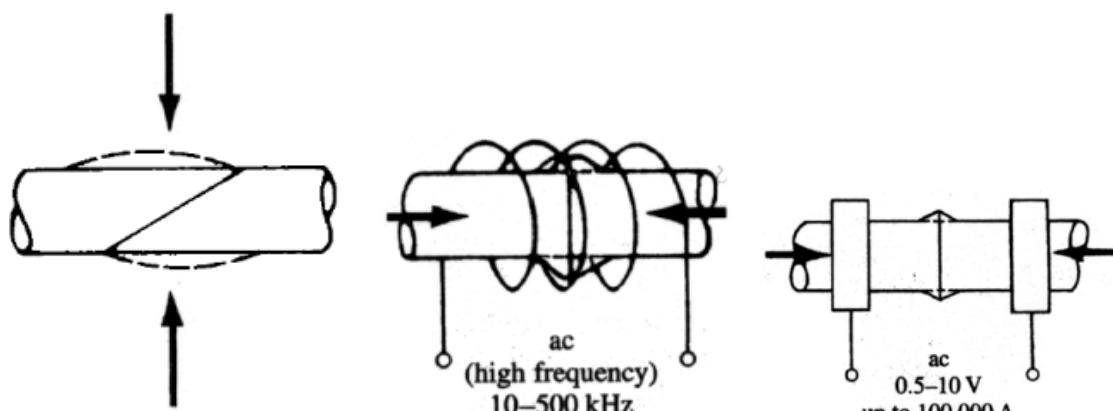


Figura 15.4: Principali modalità di saldature a caldo

15.0.4 Saldatura a frizione

Si tratta di una tecnica con cui scaldiamo gli elementi da giuntare. Una parte è tenuta saldamente ferma mentre l'altra viene messa in rotazione con l'applicazione simultanea della pressione assiale. In genere viene utilizzata per giuntare dei pezzi per figure rotazionali.

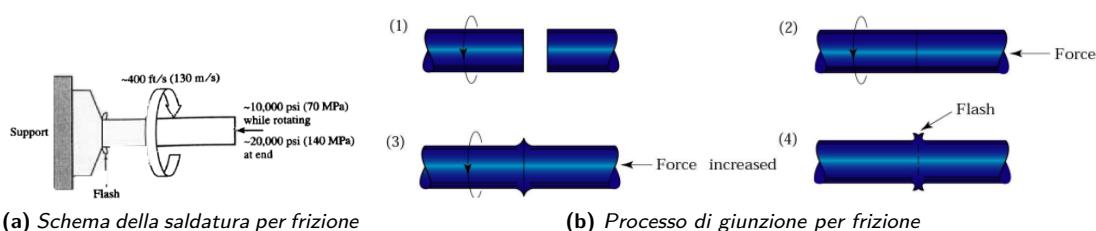
L'attrito determina il riscaldamento dell'interfaccia in più la pressione simultanea andrà a giuntare i due pezzi. Si forma un colletto di bava come si vede dalle figure 15.5b.

Si presenta un piccolo errore nella figura 15.5b 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.

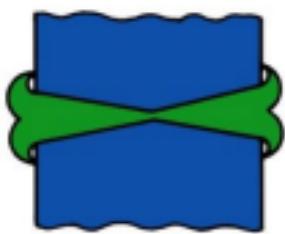
15.0.4.1 Friction Stir Welding

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.

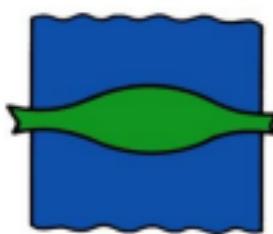
L'utensile ruota, scalda il materiale delle due lamiere avvicinate, percorre un qualsiasi percorso di saldatura come se fosse una fresa. Alla figura 15.6 se ne vede un esempio.



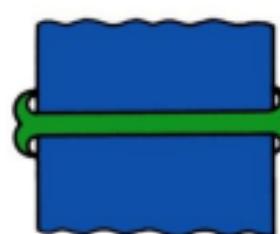
(a) High pressure or low speed



(b) Low pressure or high speed



(c) Optimum



(c) Risultati per la saldatura a frizione

Figura 15.5: Saldatura allo stato solido per frizione

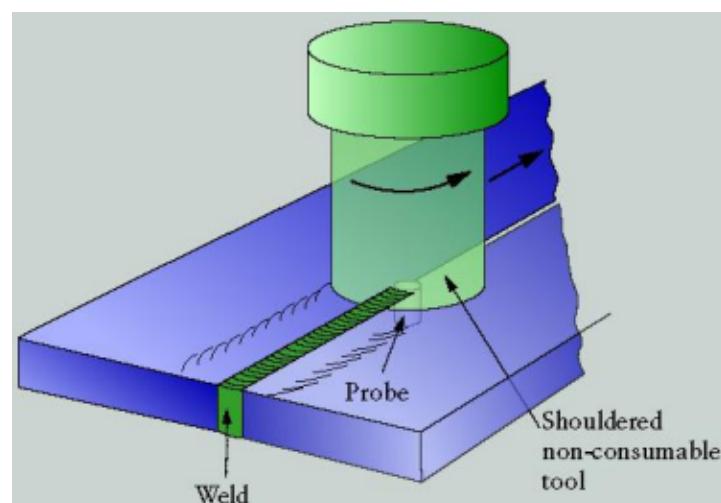


Figura 15.6: Esempio di Friction stir welding

CAPITOLO 16

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 eterogenea se si apporta un terzo materiale per effettuare la saldatura, altrimenti omogenea.

Le principali categorie di saldatura sono:

Saldatura a resistenza

Saldatura arco elettrico

Saldature per fasci ad alta energia

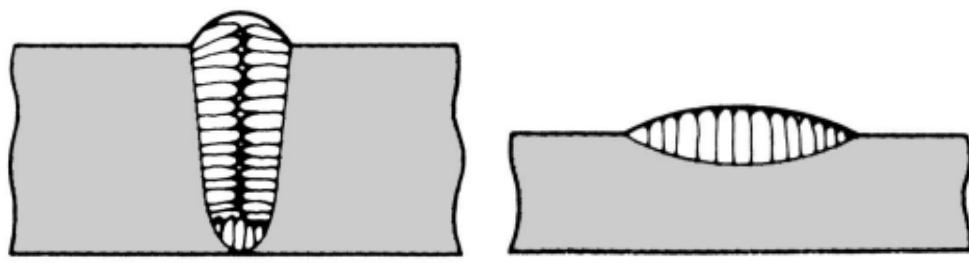
Saldatura ad alta temperatura

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 riussita della saldatura. Infatti alta energia con una velocità adeguata di saldatura porta a cordoni di saldatura migliori come quelli 16.1a. Al contrario si ha un cordone di saldatura particolarmente fino e disteso come in figura 16.1b.

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.

Se il materiale era incrudito c'è il rischio di ricristallizzazione 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. Alla figura 16.3 viene riportato il particolare della ZTA. La **pozza**



(a) *Cordone di saldatura profondo e ben eseguito*

(b) *Cordone di saldatura fino e superficiale*

Figura 16.1: Possibilità delle saldature

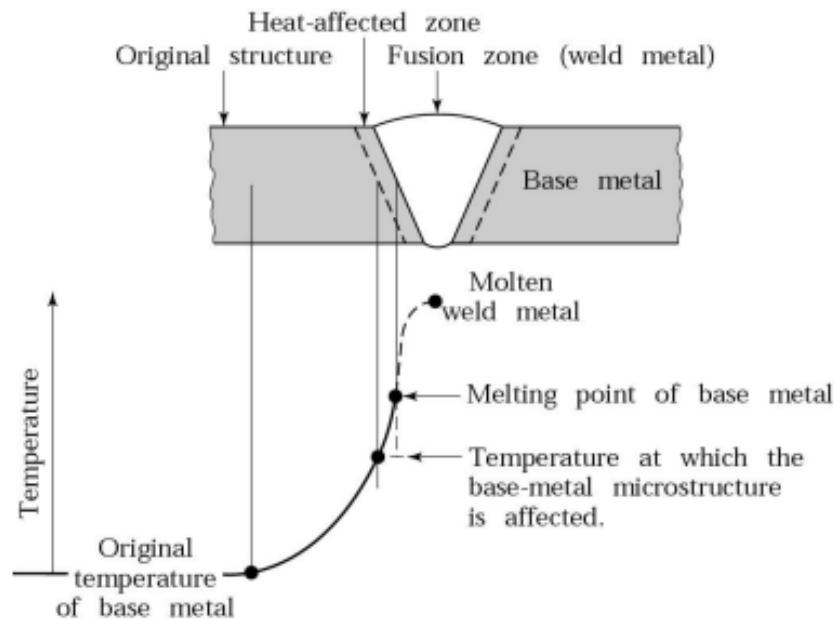


Figura 16.2: Andamento della temperatura nella prossimità del cordone di saldatura

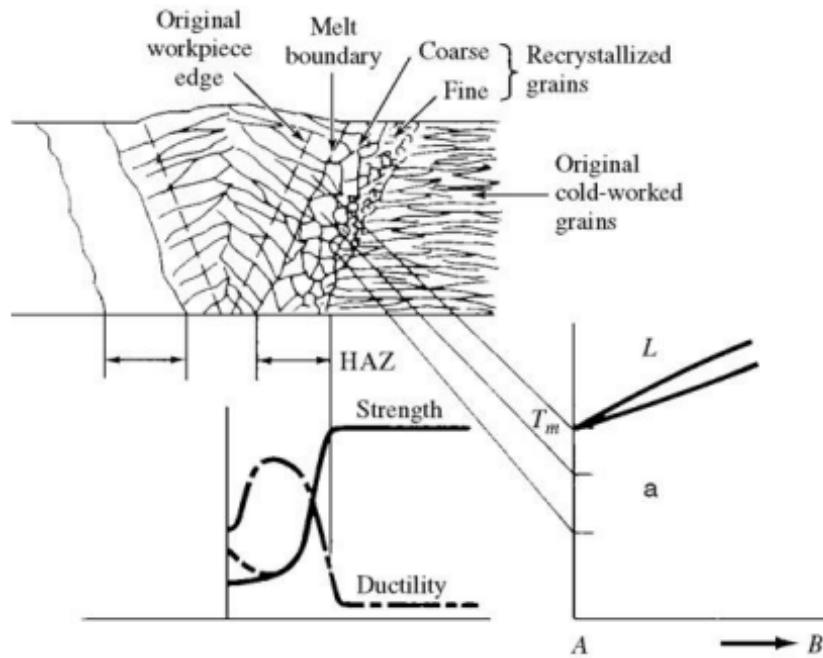


Figura 16.3: Particolare sulla ZTA in termini di caratteristiche meccaniche e temperature trasmesse

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, [16.4a](#). 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, [16.4b](#).

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

16.1 Caratteristiche del giunto

Passando da due materiali monofasici a delle leghe. In corrispondenza del cordone 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 **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 trasformazione 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 [16.5](#) 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.

16.1.1 Difetti e qualità della saldatura a fusione

Nella realizzazione della saldatura a fusione possono verificarsi dei difetti. Si farà riferimento ad una saldatura per fusione con materiale d'apporto. La temperatura di fusione determina, insieme al calore specifico

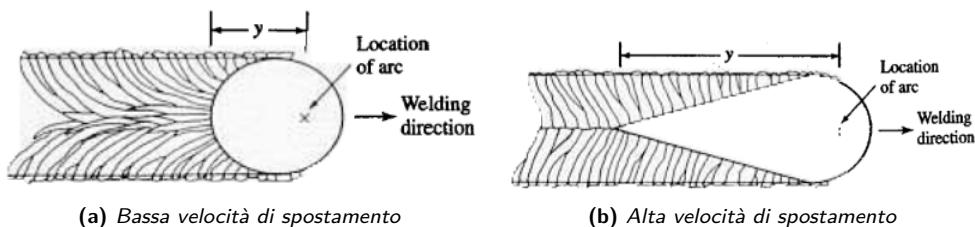


Figura 16.4: Tipologie di grani in funzione della velocità di movimento della saldatura

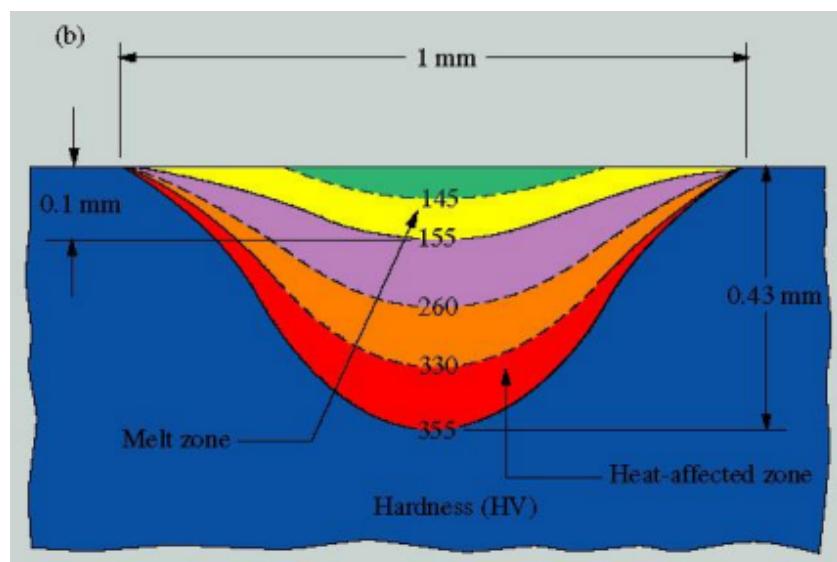


Figura 16.5: Intervalli di durezza in prossimità del cordone di saldatura

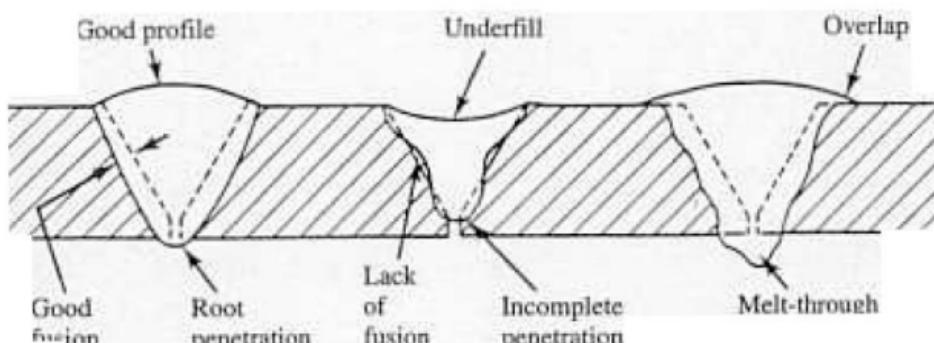


Figura 16.6: Cordoni di saldatura a confronto: (a) ben eseguito, (b) mancanza di fusione e penetrazione detto underfill, (c) Saldatura eccessiva detta overfill

e al calore latente di fusione, la quantità di calore richiesto per la fusione. In riferimento alla figura 16.6 si hanno tre possibili cordoni di saldatura. Il primo sarebbe il caso ideale, per cui calore apportato e quantità di materiale d'apporto sono ben ottimizzati. 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

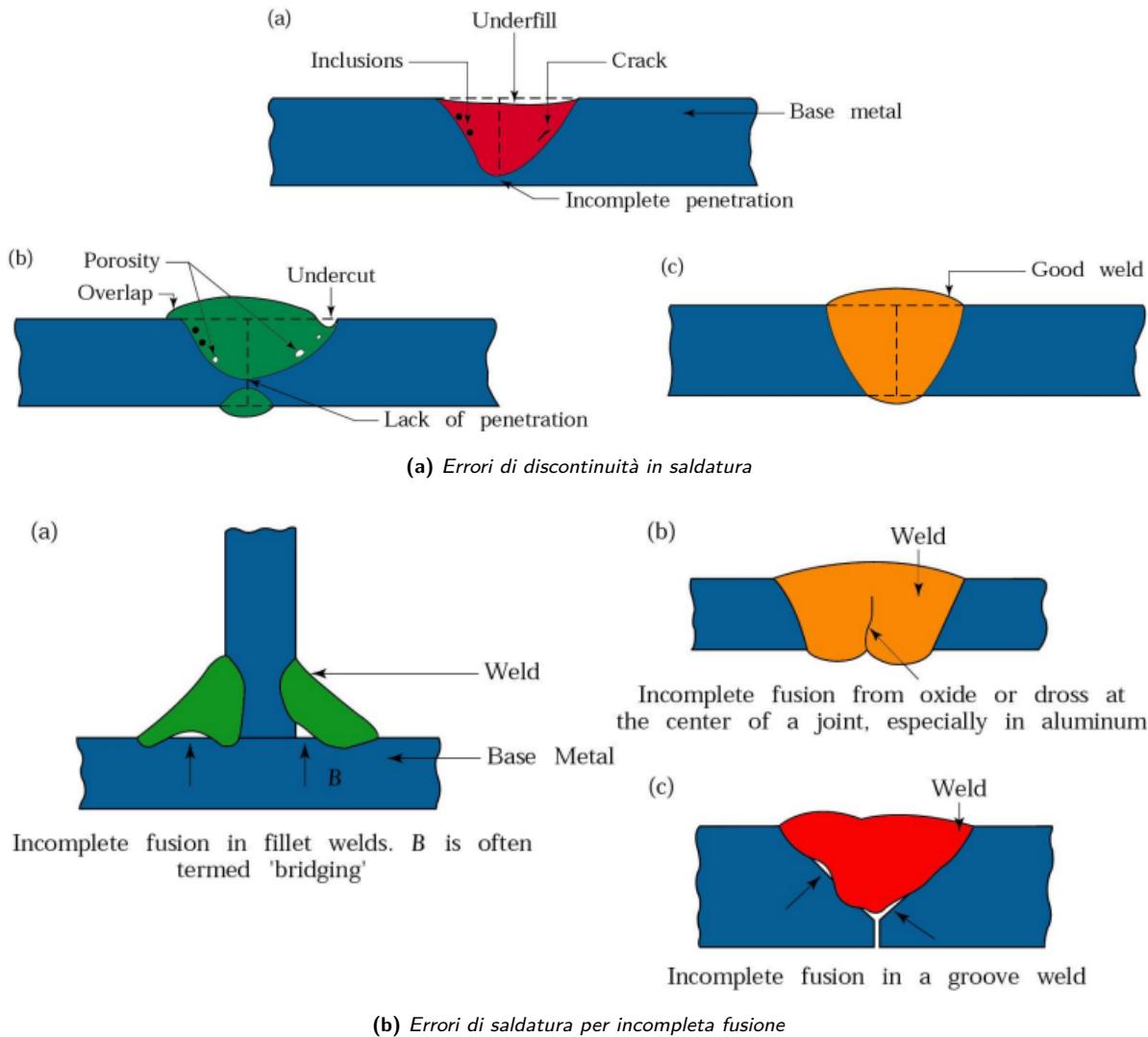


Figura 16.7: Errori di saldatura che possono compromettere le performance della giunzione

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

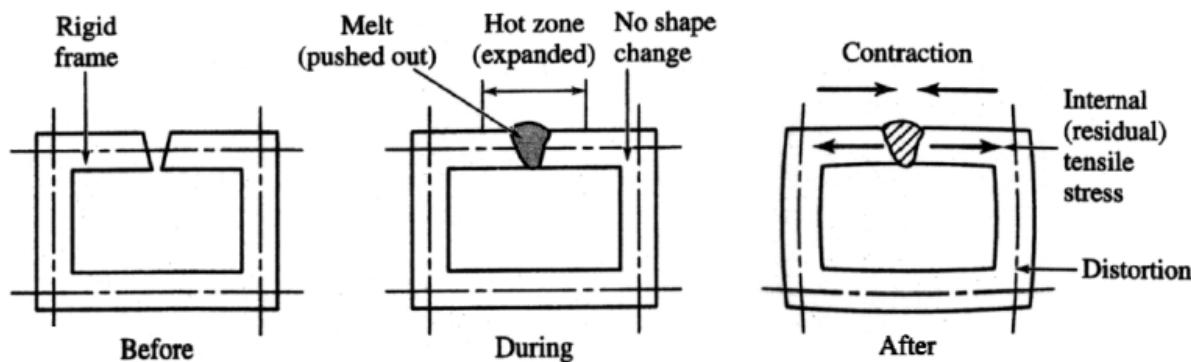


Figura 16.8: Tensione indotta dalla dilatazione termina nella saldatura e conseguente ritrazione del materiale

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.

16.1.2 Intensità di energia

L'intensità di energia è:

$$I_e = \frac{\text{Energia ceduta al sistema}}{\underbrace{E_c}_{\text{Area di saldatura}}} \quad (16.1)$$

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 keyhole.

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.

16.2 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.

Ghise materiale d'apporto ad alto contenuto di nichel viene spesso utilizzato per stabilire la forma grafitica. Con la ghisa grigia la bacchetta di saldatura è ricca di silicio e, per garantire la formazione di grafite sferoidale, nella bacchetta è presente anche magnesio.

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 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 tanta è la facilità di creare ossidi: per cui si preferisce usare delle tecniche di saldatura ad alta intensità di energia.

16.3 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. Le principali tecniche di saldature a resistenza sono evidenziate alla figura 16.9.

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.

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

$$J = I^2 R t \quad (16.2)$$

La massima resistenza elettrica **deve** 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, allumino) 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.

16.3.1 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. La figura 16.9 (b) è un esempio di saldatura su rilievo.

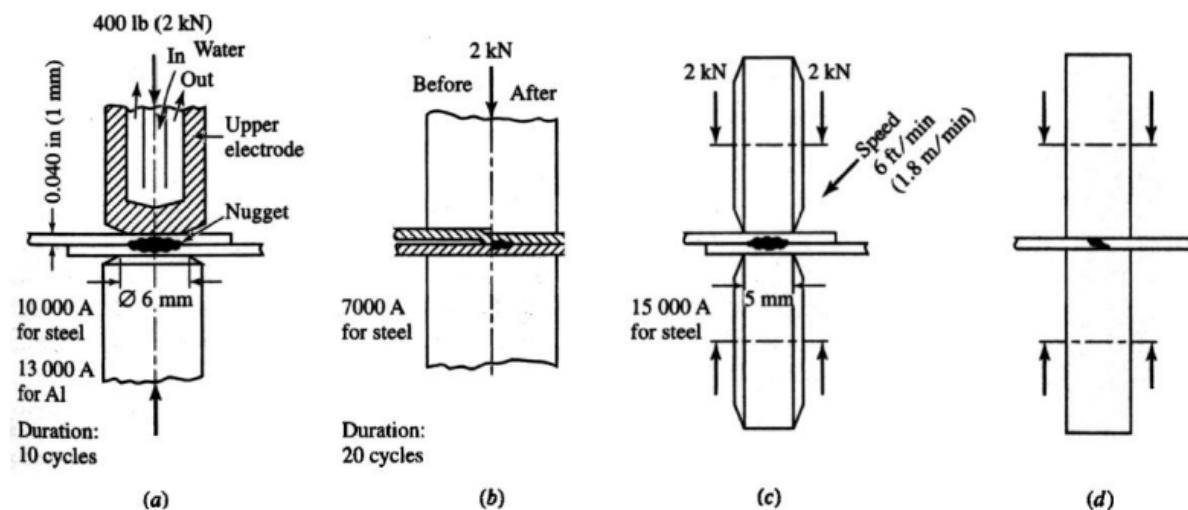


Figura 16.9: Tipologie principali di saldature a resistenze: (a) saldatura a spot, (b) saldatura a rilievo, (c) saldatura a rulli, (d) saldatura a punzone

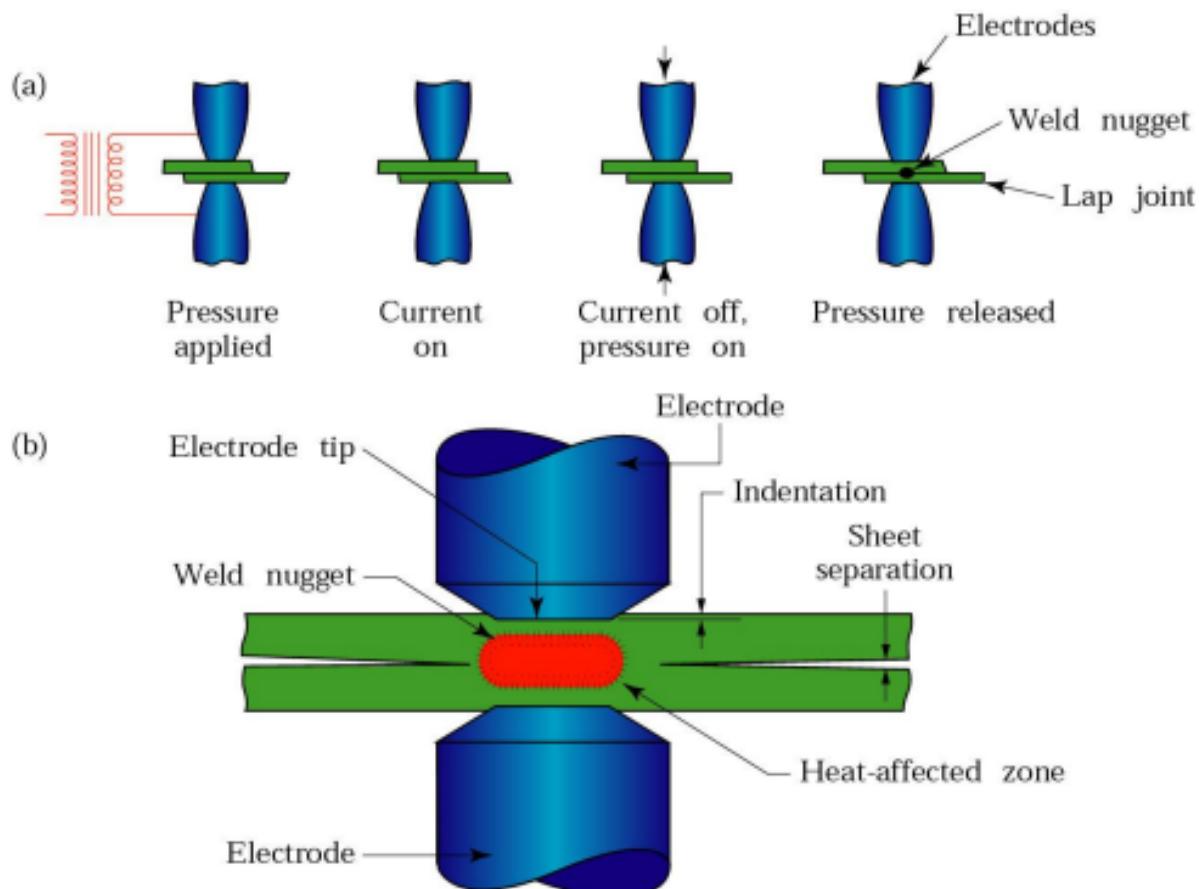


Figura 16.10: Processo di saldatura a resistenza

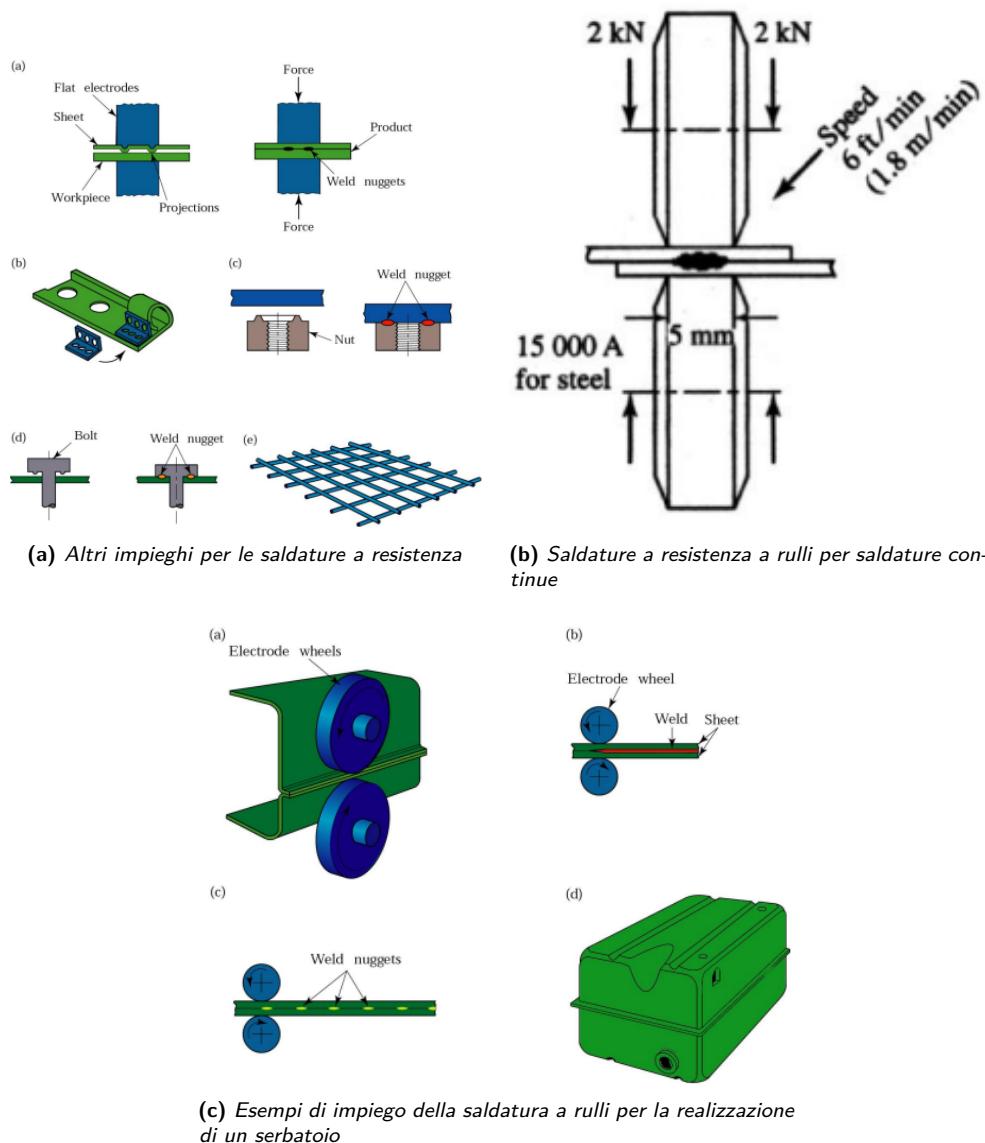


Figura 16.11: Esempi di saldature a resistenza

16.3.2 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

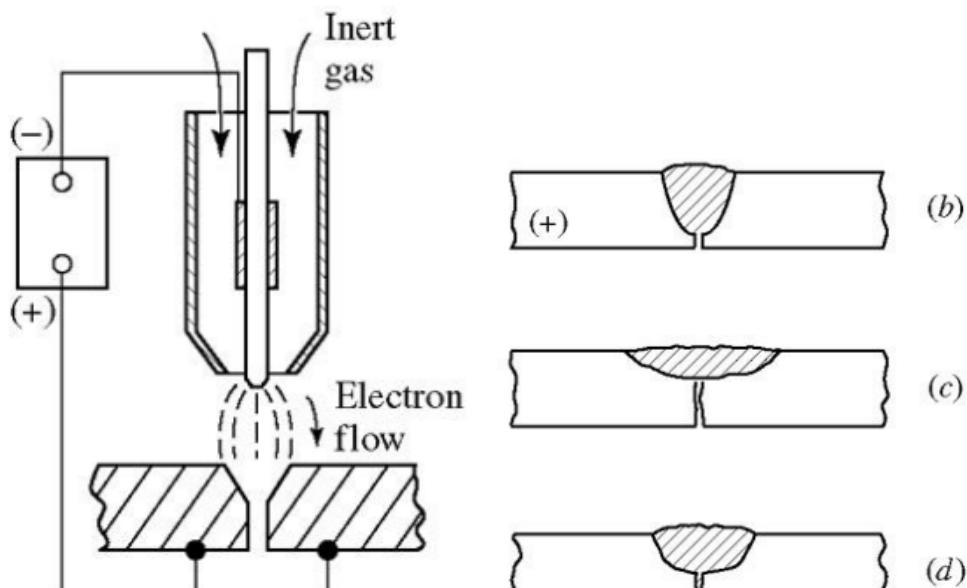
In questo caso il metallo fuso viene espulso. La saldatura si forma ricalcando le superfici calde e solide. Una buona saldatura verrà prodotta solo de la velocità di avvicinamento, corrente e tensione, corsa totale e pressione di ricalcatura sono strettamente controllati. La bava viene rimossa. La fusione deve spostare il materiale verso l'esterno. Le due superfici dovrebbero essere uguali.

16.4 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 elettronni 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.



(a) Schema di funzionamento della saldatura ad arco

(b) Risultati della saldatura ad arco: (b) pozza di saldatura in corrente continua, (c) pozza in corrente continua opposta ai riferimenti 16.14, (d) pozza in corrente alternata

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 può essere calcolato tramite (16.3). Il calore prodotto è in parte disperso nell'ambiente circostante, soprattutto in presenza di correnti molto basse.

$$H = \frac{EI}{v} \quad (16.3)$$

Dove:

E Differenza di potenziale tra elettrodo e metallo base

I Corrente trasportata dal flusso di elettroni

v Velocità dell'elettrodo

Siccome lo smaltimento del calore richiede tempo, è necessario proteggere dall'aria circostante il cordone di saldatura.

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. Le sigle vengono illustrate alla tabella 16.1.

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

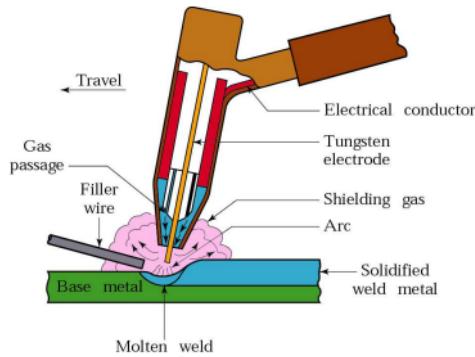
16.4.1 Saldatura ad arco con elettrodo permanente

È detta saldatura Gas Tungsten Acr Welding (**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. La torcia per la saldatura **GTAW** è raffigurata in ??.

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.

Tabella 16.1: Nomenclature delle tecniche di saldatura ad arco.

Elettrodo permanente	Elettrodo consumabile	Legenda	
GTAW (TIG)	GMAW (MIG)	AW = Arc Welding	FC = Fondente intubato
PAW	SMAW	G = Gas	SA = arco sommerso
	FCAW	M = Metal	ES = Elettroscoria
	SAW	T = Tungsteno	S = Perno
	ESW	P = Plasma	
	SW	SM = Elettr. Rivestito	

*Esempio di torcia per saldatura GTAW*

Per attivare l'arco: l'elettrodo viene allontanato a velocità controllata o si usa un 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.

16.4.2 Saldatura ad arco al plasma

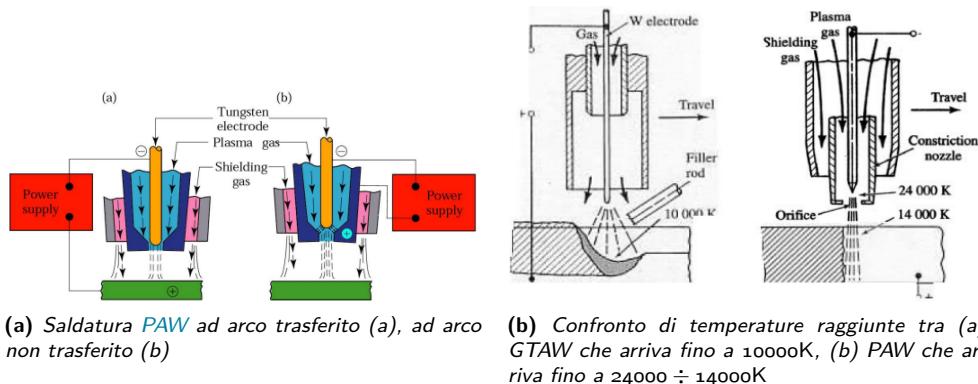
Detta PAW. In questo caso, a differenza della precedente, si hanno 2 gas: uno di protezione della saldatura e l'altro che verrà ionizzato per realizzare il plasma. Di solito si preferisce far passare il plasma attraverso un piccolo foro per garantire maggiore concentrazione del plasma. Inizialmente il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

Alla figura 16.12a, sono riportate le tecniche principali di tecniche usate tramite la PAW. 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.

**Figura 16.12:** Saldature PAW e poi un confronto tra le temperature raggiunte dalle tecniche di saldatura

La figura 16.12b si propone un confronto tra **GTAW** e **PAW**. 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.

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

16.4.3 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**, 16.13. Anche qui si sfrutta un gas protettivo. I principali gas protettivi utilizzati sono:

Argon adatto a tutti i materiali;

Elio maggiore potenziale di ionizzazione e dunque maggiore generazione di calore;

CO₂ Per acciai al carbonio.

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 gas 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 rochetti. In più il processo può essere semi-automatizzato: dove l'operatore determina il percorso della pistola e parametri di processo oppure 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.

16.4.4 Saldatura ad arco con elettrodo rivestito

Si tratta di una tecnica Shield Metal Arc Welding (**SMAW**), 16.14a. In questo caso l'elettrodo è ricoperto da un materiale protettivo che permetterà la formazione delle scorie. Rappresentata alla figura ???. Ciò è un problema perché tale tecnica è eseguita manualmente per il fatto che le bacchette hanno una lunghezza

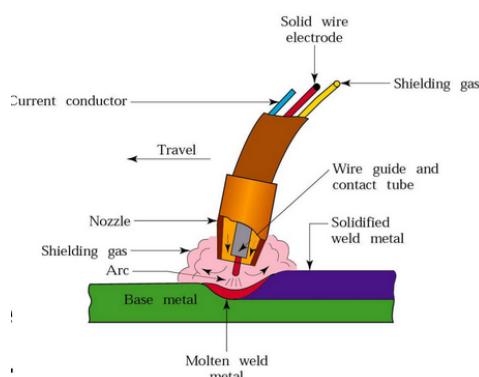


Figura 16.13: Schema di funzionamento della saldatura **GMAW**

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.

16.4.5 Saldatura ad arco con fondente intubato

Trattasi della tecnica Flux-Cored Arc Welding ([FCAW](#)), [16.14b](#). 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.

16.4.6 Saldatura ad arco sommerso

Indicata Submerged Arc Welding ([SAW](#)), [16.14c](#). 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.

16.4.7 Saldatura ad arco con elettroscoria

La sigla è ElectroSlag Welding ([ESW](#)). In questo caso la saldatura deve essere realizzata in verticale, [16.14d](#). 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.

16.4.8 Saldatura ad arco a perno

Sigla Socket Welding ([SW](#)), [16.14e](#). 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 l'uno contro l'altro. Un anello ceramico concentra l'arco, protegge dall'ossidazione e contiene il fuso. Il diametro del perno viene scelto in modo che il giunto sia nel perno e non sulla lamiera.

L'anello ceramico svolge varie funzioni:

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

16.5 Automazione delle saldatura

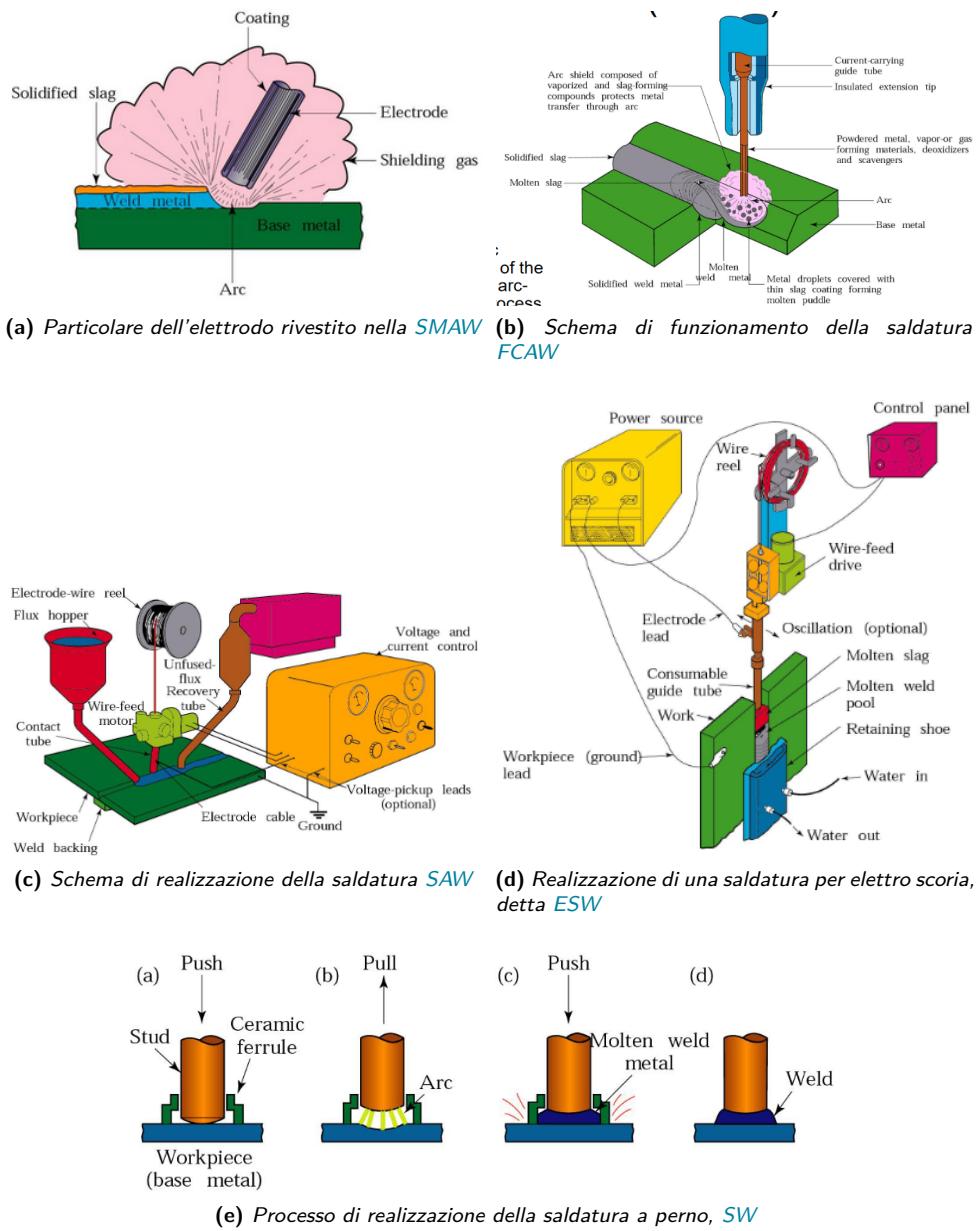


Figura 16.14: Tecniche di saldature ad arco

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, sia per contenere i costi.

I valori ottimali di corrente, velocità di spostamento, velocità di avanzamento degli elettrodi vengono impostati e controllati. Vengono introdotti controlli alla **CNC** e adattivi che usano sensori di temperatura non a contatto, sensori di distanza elettrodo-pezzo ecc... .

L'operazione può essere automatizzata facilmente nel caso di percorsi elementari. Il mantenimento dell'arco è difficile nel caso di operazioni manuali.

La cianfrinatura o bisello; **16.15**, è una particolare lavorazione che serve a preparare i lembi prima che subiscano il processo di saldatura. I vantaggi di questa operazione sono:

- facilitare la saldatura;
- assicurare una buona penetrazione del bagno fuso;
- creare un buon posizionamento del giunto saldato;
- Pulire i lembi da eventuali scorie presenti.

La preparazione della giunzione e il suo posizionamento accurato dovrebbero consentire alla torcia di seguire un percorso predeterminato. Quando non è possibile, bisogna pensare a un sistema ad inseguimento: rotella o sonda davanti alla torcia, sensori per rilevare le variazioni di corrente al variare della distanza scanalatura-torcia.

I sistemi laser operano mediante triangolazione e sono usati anche per pianificare e programmare la sequenza di saldatura, posizionare l'elettrodo durante la lavorazione, fermarla e ispezionare il risultato.

In alcuni casi viene eseguita in passate successive. Si nota dalla figura **16.16** che le successive passate dovrebbero essere eseguite alternativamente tra faccia superiore e faccia inferiore.

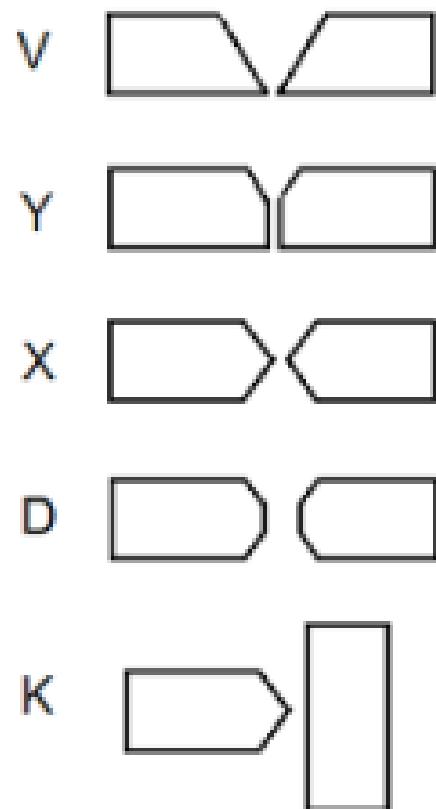


Figura 16.15: Esempi di preparazione dei metalli base da saldare tramite cianfrinature

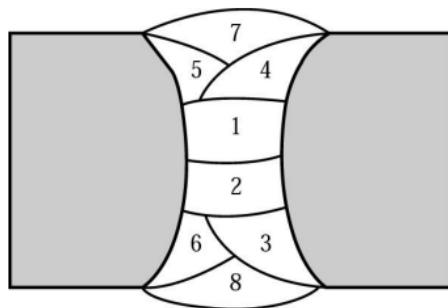


Figura 16.16: Dimostrazione della sequenza di passate per saldature plurime

16.6 Saldature chimiche

16.6.1 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 fiamme che si possono ottenere sono 3 tipi, 16.18:

Fiamma neutra, 16.18a Ottenuta dalla combustione di uguali parti di ossigeno e acetilene. Si suddivide in tre parti a diversa temperatura:

- Cono interno $3040 \div 3300^{\circ}\text{C}$;
- Cono intermedio $\approx 2100^{\circ}\text{C}$;
- Cono esterno $\approx 1260^{\circ}\text{C}$.

Fiamma ossidante, 16.18b composta da due coni: cono interno e sviluppo esterno particolarmente piccolo e rastremato.

Fiamma riducente, 16.18c Composta da tre coni: cono interno luminoso, strato di acetilene, sviluppo blu.

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 lavorare su materiali molto diversi.

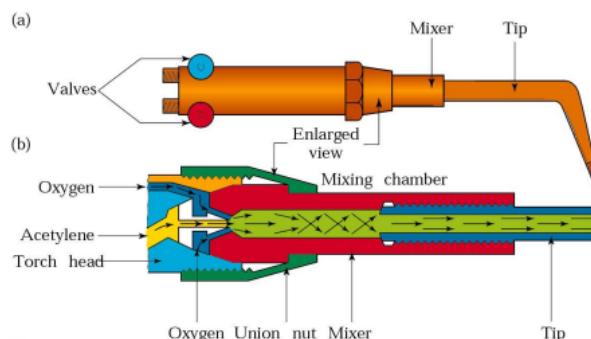


Figura 16.17: Esempio di cannello ossiacetilenico

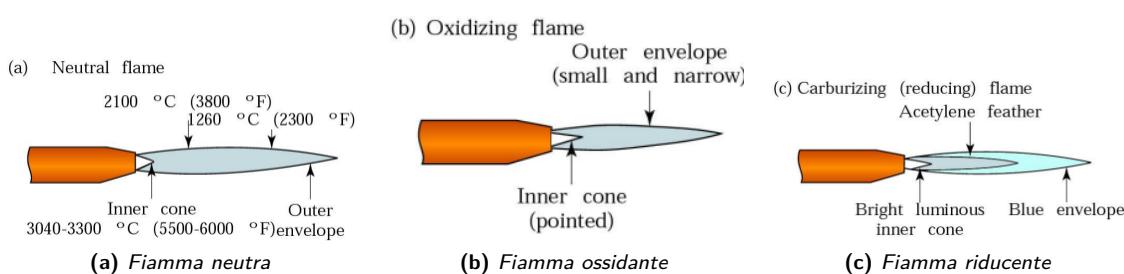
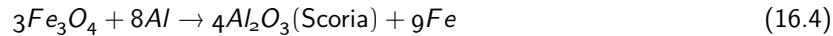


Figura 16.18: Tipologie di fiamme

16.6.2 Saldatura alla termite

Si tratta di una tecnica che può sostituire la saldatura a resistenza tramite scintillio.



Si usa per saldare grosse sezioni. Si costruisce uno stampo da fonderia attorno alla zona del giunto. Si dà fuoco alla polvere in un crogiolo sopra lo stampo e il ferro cola nello stampo attraverso un foro. Dopo la solidificazione si distrugge lo stampo e si rimuove il ferro in eccesso.

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.

16.7 Saldature con fasci ad alto contenuto energetico

16.7.1 EWB

Il calore di fusione può essere fornito convertendo in calore l'energia cinetica di un fascio di elettroni o quella di un fascio di luce.

Nel fascio elettronico **EWB** il metallo fuso che procede il foro di vapore fluisce per riempire il vuoto, allora si può anche fare a meno del materiale d'apporto. La **ZTA** è moto stretta.

Con molti materiali si può anche operare a pressione atmosferica. Il processo è adattabile a varie situazioni e può essere automatizzato.

16.7.2 LBW

Nella **LBW**, laser può scaldare la superficie o tutto lo spessore del materiale. Il riscaldamento dipende dall'emissività della superficie perciò i laser sono più adatti per materiali riflettenti, ma non sono usabili con vetro e polimeri. Normalmente il materiale deve essere protetto con un gas, tranne nella spot welding. L'ossigeno riduce la riflettività aumentando la velocità di processo, i gas inerti aumentano il trasferimento di calore con in metalli non ferrosi. Si usa soprattutto con piccoli spessori in modo programmato.

CAPITOLO 17

Brasatura

Si tratta di una tecnica di saldatura in cui non si porta il materiale base a fusione. La resistenza del giunto è dovuta soprattutto all'adesione tra il materiale d'apporto e il materiale base. Non è indispensabile accedere a tutte le parti del giunto.

Nella giunzione il materiale d'apporto si diffonde grazie alla capillarità. Il giunto trae la sua forza dal supporto che il metallo d'apporto riceve dal metallo base. Affinché il giunto sia più resistente, lo strato di metallo d'apporto deve essere così sottile che il vincolo dato dal metallo base previene la strizione. La resistenza a taglio è inferiore rispetto le altre tecniche di saldatura considerate fin ora. La massima resistenza si sviluppa solo se c'è un perfetto legame interatomico tra materiale base e materiale d'apporto. Per garantire il legame le superfici devono essere bagnate dal materiale d'apporto. Alla figura 17.1 si riporta l'esempio di una brasatura ad argento con le relative resistenze meccaniche in funzione dello spessore della giunzione.

La luce ottimale deve esistere alla temperatura di processo, pertanto l'espansione differenziale deve essere presa in considerazione quando si uniscono metalli dissimili. Anche la rugosità della superficie deve essere controllata. L'azione capillare è possibile solo se c'è **bagnabilità**, in figura 17.2. Il metallo d'apporto dovrebbe avere preferibilmente un intervallo di fusione stretto.

Il materiale d'apporto viene applicato sotto forma di filo, strisce, preforma, polvere o pasta. IN alternativa, è preapplicato sulla superficie di una delle parti a contatto come rivestimento, spesso mediante rullatura, deposizione eletrolitica o immersione a caldo.

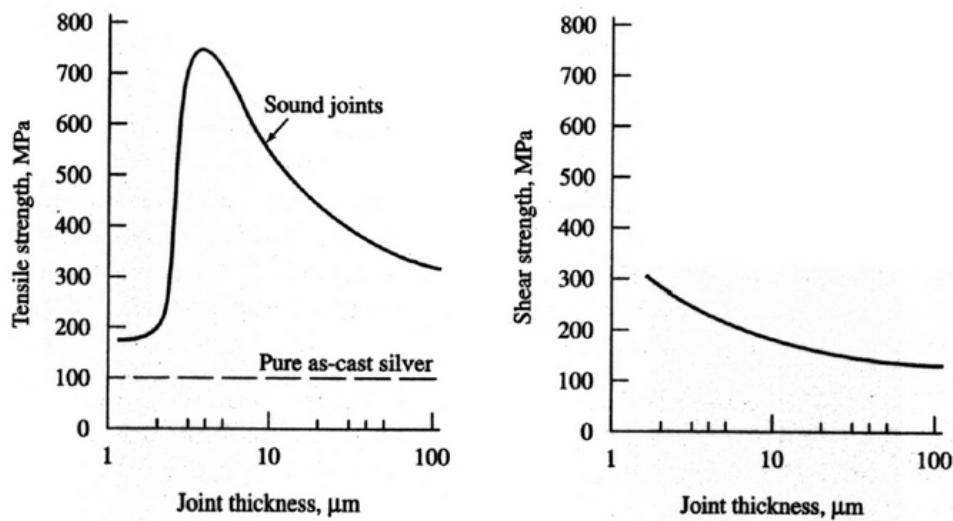


Figura 17.1: Resistenza meccanica e di taglio della brasatura ad argento

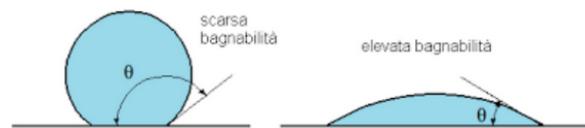


Figura 17.2: Indice di bagnabilità

Si devono rimuovere film superficiali che ostacolino la bagnabilità. Per evitare l'ossidazione durante il processo si usano atmosfere protettive o il vuoto. I fondenti evitano l'ossidazione, hanno bassa viscosità per essere allontanati dal legante e vengono rimossi facilmente a fine processo. I fondenti sono sotto forma di polvere, pasta o sospensione. Sono necessarie atmosfere fortemente riducenti o fondenti più attivi quando si formano ossidi stabili. Le parti da unire sono assemblate e temporaneamente tenute insieme in posizione da dispositivi di fissaggio meccanico.

Il riscaldamento può essere ottenuto:

- in forno,
- con una torcia,
- con resistenze,
- a induzione,
- a infrarossi,
- con fascio laser o di elettroni.

17.0.1 Brasatura ad alta temperatura

In generale i metalli d'apporto di elevato punto di fusione danno forza maggiore, ma maggiore temperatura di brasatura può influenzare la resistenza del metallo base. Il magnesio modifica il film di ossido nella brasatura di leghe di alluminio.

Il materiale d'apporto viene spesso applicato come rivestimento con uno spessore del 5 ÷ 10% su uno o entrambi i lati di una lamiera. Temperature più elevate accelerano l'ossidazione, pertanto, i fondenti devono essere più aggressivi.

Nella brasatura sottovuoto la pressione nel forno viene ridotta per prevenire l'ossidazione e, in alcuni casi, non è necessario alcun fondente. Nella brasatura per immersione il calore deriva dall'immersione del complesso in sale fuso.

Nella **saldobrasatura** differisce dalla brasatura in quanto si usa una fresatura molto più ampia e quindi viene a mancare l'azione capillare.

17.0.2 Brasatura a bassa temperatura

I giunti brasati sono meno resistenti di quelli saldobrasati, ma le parti possono essere unite senza esporle a calore eccessivo. Le temperature più basse rendono più difficile una buona bagnabilità. Se il giunto è sottile risulta più resistente grazie al supporto del materiale base. Se la temperatura è bassa, la bagnabilità diventa più critica, perciò le superfici vengono preparate e si usano fondenti. Il materiale d'apporto viene scelto verificando nei diagrammi di stato la possibilità di formazione di soluzioni solide. Le leghe per brasatura più utilizzate erano quelle a base di stagno e piombo. Un contenuto di stagno basso conferisce maggiore resistenza.

Alla tabella 17.1 sono riportate le principali leghe usate come materiali d'apporto per la brasatura. A causa della sua tossicità, il piombo viene usato poco. I metalli rivestiti facilitano la brasatura.



Figura 17.3: Esempi di brasatura e saldobrasatura

Tabella 17.1: Principali leghe usate come apporto per la brasatura

Composition	Melting Range	
	Liquidus, °C	Solidus, °C
Sn-5Pb	240	233
Sn-30Pb	193	183
Sn-37Pb	183	183
Sn-50Pb	216	183
Sn-58Pb-2Sb	231	185
Sn-95Pb	312	308
Pb-5.5Ag-0.25Sn	380	304
Sn-4Ag	221	221
Sn-5Sb	240	233
Sn-9Zn	199	199
Sn-50In	125	117
Zn-5Al	382	382

CAPITOLO 18

Giunzioni Adesive

Il materiale del giunto è un polimero o, più raramente, un ceramico. la resistenza del giunto è determinata solo dall'adesione del polimero al substrato e dalla resistenza dell'adesivo. Gli unici legami che si possono formare tra metalli e polimeri sono di tipo secondario.

L'incollaggio ha molti vantaggi:

- si opera a basse temperature,
- la superficie esterna rimane liscia,
- materiali dissimili e piccoli spessori possono essere uniti,
- l'adesivo contribuisce ad assorbire energia negli urti e in presenza di vibrazioni,
- basso costo.

18.0.1 Adesivi strutturali

Spesso si parla di adesivi strutturali quando sono usati per unire in modo permanente due elementi a maggiore resistenza meccanica. L'adesivo deve avere una sufficiente forza coesiva alla temperatura di esercizio. Se l'adesivo è un termoindurente, i legami secondari possono essere incrementati per aumentare la resistenza al creep. L'adesivo deve essere in grado di distribuire il carico. L'adesivo non deve degradarsi a causa di acqua, raggi UV o altro. Molti adesivi sono applicati in fase liquida, perciò devono avere viscosità adeguata. Le superfici devono essere bagnate dall'adesivo. Caratteristiche meccaniche di alcuni collanti sono riportate ai grafici 18.1.

I film organici superficiali sono dannosi per la maggior parte degli adesivi. Un film di ossido poroso fortemente legato o un rivestimento di conversione è utile. Sono state sviluppate speciali tecniche di preparazione della superficie per promuovere l'adesione. Primer e promotori dell'adesione sono necessari quando c'è un ritardo tra la preparazione della superficie e l'applicazione dell'adesivo. La rugosità superficiale può essere desiderabile poiché determina un'area di contatto più ampia e provoca un collegamento meccanico.

18.0.2 Impiego degli adesivi

Termoindurenti I termoplastici sono applicati a caldo. Una buona giunzione incollata dovrebbe essere più resistente dell'elemento più debole. Alcuni termoplastici devono essere scaldati oltre T_g (temperatura di transizione vetrosa), il rapido raffreddamento provoca i legami. Hanno buona resistenza all'acqua, ma scarsa al calore e al creep.

Nastri e film termoindurenti Nastri e film termoindurenti si applicano a temperatura ambiente e reticolano ad alta temperatura. Si usano supporti di rinforzo, come griglie in vetroresina. Applicando pressione si ottengono giunti tenaci. Le paste di solito consistono di un polimero e riempitivi.

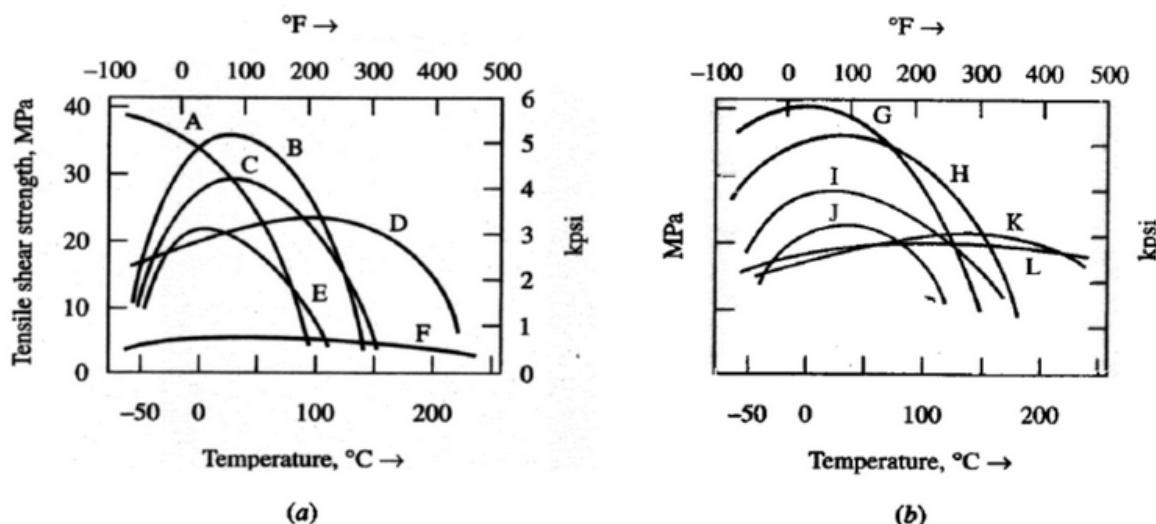


Figura 18.1: Diagrammi di resistenza meccanica di alcuni collanti, la descrizione dei collanti è riportato alla figura successiva 18.2

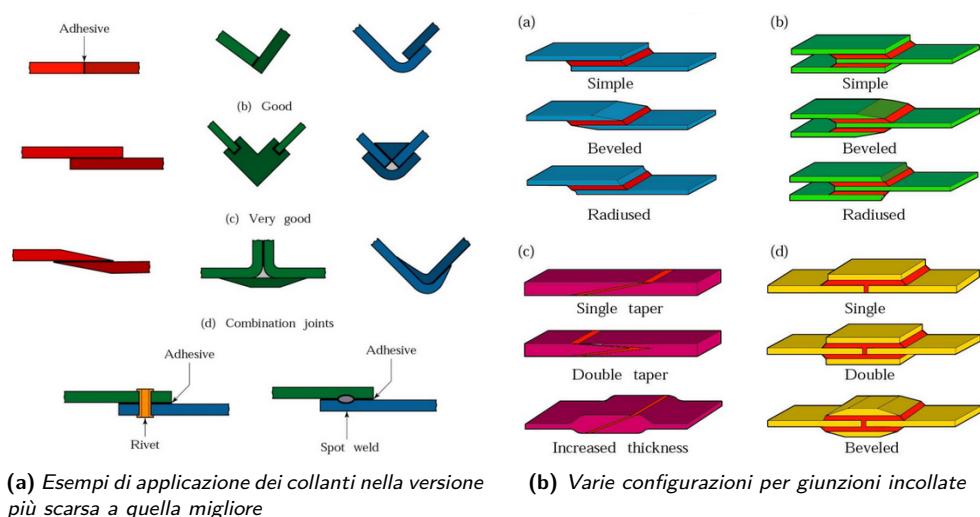
The shear strength of adhesives declines rapidly at some temperature which depends on composition, limiting their range of application. (a) Paste and liquid adhesives, (b) tape, film, and solvent-based adhesives. A: two-part urethane + amine; B: one-part rubber-modified epoxy; C: one-part epoxy, general-purpose type; D: one-part epoxy, heat-resistant type; E: two-component room-curing epoxy-polyamide; F: silicone sealant; G: nylon-epoxy; H: nitrile-epoxy; I: nitrile-phenolic; J: vinyl-phenolic; K: epoxy-phenolic; L: polyimide. (Reprinted from J.C. Bolger, in *Adhesives in Manufacturing*, Dekker, 1983, p. 142, by courtesy of Marcel Dekker Inc.)

Figura 18.2: Descrizione dei collanti dei grafici precedenti

adesivi anaerobici Gli adesivi anaerobici sono liquidi monomerici che reticolano solo in assenza di aria.

Alcuni adesivi reticolano solo in presenza di umidità. I liquidi di solito contengono un solvente che può creare problemi ambientali.

Le emulsioni acquee hanno bisogno di un substrato poroso che permetta la rimozione dell'acqua. Gli adesivi conduttori contengono riempitivi che conferiscono la proprietà ricercata. La verifica dei giunti mediante tecniche Non-Destructive Testing (NDT).



CAPITOLO 19

Potenzialità di processo e aspetti progettuali

Alla tabella 19.1 è riportata la classica tabella di confronto tra le varie tecniche di saldatura a fusione.

Come in tutti i progetti, i potenziali e i limiti dei processi di giunzione devono essere presi in considerazione insieme ai requisiti di servizio. Le limitazioni imposte dal processo scelto saranno rilevate dalla comprensione dei processi stessi e la guida generale è fornita nella Tabella. I giunti meccanici sono già stati commentati e le osservazioni qui sono limitate alle saldature a fusione e ai giunti brasati, saldati e adesivi che, come gruppo, sono soggetti a condizioni simili.

La tabella 19.1 confronta le prestazioni di alcune tecniche di saldatura a fusione. Lo zinco di norma non viene saldato perché si ossida e vaporizza facilmente, perciò si preferisce brasarlo. Passando alle distorsioni, sono massime con elettrodo rivestito e arco sommerso, minime con i fasci energetici, per i quali è massimo il costo della macchina perché è sempre a controllo numerico, mentre è minimo nel caso del cannetto ossiacetilenico. Fra le tecniche prese in considerazione, l'arco sommerso è sempre eseguita in modo automatico, perciò il costo della manodopera è basso. Forse ai fasci energetici viene attribuito un costo che può essere elevato per programmare la macchina. I fasci energetici eccellono anche per quanto riguarda il costo delle operazioni di finitura, mentre il cannetto è la tecnica peggiore. Elettrodo rivestito e cannetto sono sempre usati in modalità manuale, perciò è richiesta grande competenza all'operatore.

19.0.1 Considerazioni sulla tipologia di sollecitazione delle giunzioni

In servizio, gli assiemi sono solitamente esposti a schemi di carico complessi ma, dal punto di vista del progetto e del collaudo, si possono distinguere alcune modalità di carico di base: Carico normale. Il giunto è sottoposto a carico di trazione o compressione puro (19.1 (a)). Carico di taglio. Il giunto è sottoposto a taglio puro. Questo è possibile solo in un giunto a doppia sovrapposizione. La forza della sovrapposizione è la forza sostenuta da un giunto di larghezza unitaria (N/mm) (19.1 (b)). Un giunto singolo viene sottoposto a un momento che, se abbastanza grande, causa una deformazione che a sua volta porta a uno stato di tensione più complesso, in particolare, un aumento della tensione alle estremità del giunto (19.1 (c)). La resistenza della sovrapposizione non aumenta oltre una certa lunghezza di sovrapposizione L e la forza del giunto può essere aumentata solo aumentando la larghezza del giunto.

Clivaggio Nel clivaggio il giunto è sottoposto a forze di trazione bilanciate che aprono il giunto perpendicolarmente al suo piano. La forza di clivaggio è la forza richiesta per separare un campione di larghezza unitaria (N/mm) (19.1 (d)).

Pelatura Nella pelatura il giunto è separato da una forza di trazione che piega e separa progressivamente uno degli aderenti (l'aderente flessibile) (19.1 (e)). La forza di pelatura è la forza media richiesta per staccare un giunto di larghezza unitaria alla velocità di 2.5mm/s , con un angolo di pelatura di 180° . I giunti brasati, saldati e, in particolare, adesivi sono i più vulnerabili alla pelatura. Ad esempio, una resina epossidica rigida può avere una resistenza al taglio in sovrapposizione di 21MPa , ma una forza di pelatura di soli 3N per millimetro di larghezza.

Tabella 19.1: Confronto tra le varie tecniche di giunzione per fusione. (gas w = GTAW, shielded metal = elettrodo rivestito, flux-cored = fondente intubato)

Characteristics	Welding process							
	Arc welding							
	Gas W	Gas Metal	Shielded Metal	Flux-Cored	Submerged	Oxyacetylene	Electron Beam	Laser Beam
<i>Part (Assembly)</i>								
Material	All but Zn	All but Zn	All but Zn	All steels	All steels	All but refractory metals	All but Zn	All but Zn
Preferred	All but Zn	Steels; Cu; non-HT Al	Steels	Low-C steels	Low-C steels	Cast iron; steels	All but Zn	All but Zn
Thickness, min. mm	0.2	0.5	(1.5) 3	1.5	5	0.6	0.05	0.05
Single pass, max.	5	5	8-10	3-6	40	10	75	25 (steel) 12 (Al)
Multiple pass max.	> 6	> 25	> 25	> 15	> 200	> 20		
Distortion*	B-C	B-C	A-B	A-C	A-B	B-D	C-E	C-E
Jigging needed	Variable	Variable	Minimum	Minimum	Full	Minimum	Full	Full
Deslagging for multipass	No	No	Yes	Yes	Yes	No		
<i>Current</i>								
Type	DCEN, ac for Al	DCEP	ac or dc	DCEP	ac or dc			
Volts	60-150	20-40 or 70	40 or 70	40-70	25-55		30-175 kV	
Amperes	100-500	70-700	30-800	30-800	300-2500		0.05-1	
<i>Cost*</i>								
Equipment	B-C	B-C	C-D	B-D	B-C	D-E	A	A-B
Labor	A-C	A-C	A	A-D	B-D	A	A-D	A-D
Finishing	B-E	B-D	A-B	A-C	A-C	A	C-E	C-E
<i>Production</i>								
Operator skill*	A-D	A-D	A	A-D	C-D	A	A-D	A-D
Welding rate, m/min	0.2-1.5	0.2-15	(1-6 kg/h)	0.02-1.5	0.1-5	(0.3-0.6 kg/h)	0.2-2.5	0.2-10
Operation	All	All	Manual	All	Automatic	Manual	Automatic	Automatic

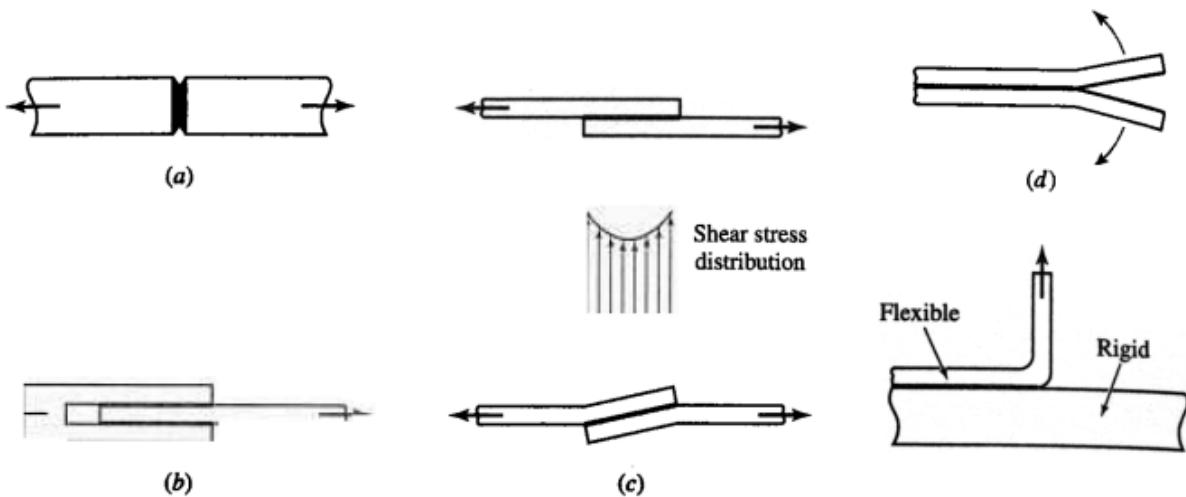


Figura 19.1: Modelli di sollecitazione basilari in cui: (a) pura tensione, (b) puro taglio, (c) taglio non bilanciato e conseguente deformazione, (d) clivaggio, (e) pelatura

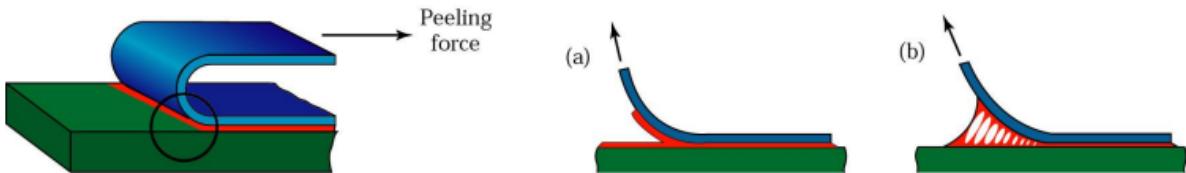


Figura 19.2: Sforzo di pelatura imposto ad una colla fragile (a), colla duttile(b)

19.0.2 Potenzialità del giunto

Ci sono poche limitazioni sulla dimensione degli assiemi, ma potrebbero esserci dei limiti su materiale e spessore. Ad esempio, le sezioni trasversali da unire devono essere uguali quando la generazione di calore è una funzione della sezione trasversale, come nella saldatura di testa, mentre possono essere piuttosto dissimili nella saldatura su sporgenza, saldatura ad arco elettrico, brasatura e giunzioni adesive. La configurazione del giunto è regolata da diverse considerazioni: Le giunzioni di testa sono caratterizzate dalla minima area di giunzione tra le due parti e sono quindi le giunzioni più deboli in trazione.

Tuttavia, sono assolutamente adeguate quando la giunzione stessa è forte, come nella saldatura allo stato solido e con fusione. Nella saldatura a fusione la resistenza della saldatura è assicurata da una preparazione appropriata che influenza in modo vitale sulla prestazione a fatica della giunzione.

Le scanalature a pareti parallele (19.3 (a)) sono adeguate per piccoli spessori ma le scanalature che favoriscono una maggiore penetrazione e la formazione controllata del cordone sono essenziali per la saldatura a gas e ad arco di spessori maggiori (19.3 (b), (c)). Non è necessaria alcuna scanalatura nella saldatura a fascio di elettroni. Giunti angolari con scanalature a pareti parallele (essenzialmente giunti di testa, 19.3 (d) superiore) sono adatti solo per piccoli spessori; nel caso di grandi spessori, la preparazione della scanalatura è essenziale (19.3 (d) inferiore). La frattura dovuta a clivaggio può verificarsi nei giunti saldobrasati, saldati e adesivi e quindi è necessario un rinforzo. La saldatura di testa potrebbe non dare una resistenza sufficiente con lamiere sottili. Sono disponibili diverse soluzioni: Le giunzioni con piega (19.3 (e)) danno una maggiore area superficiale. Nella saldatura a fusione il cordone di saldatura fornisce la resistenza; in altri processi, inclusa la brasatura e l'unione adesiva, l'area del giunto viene aumentata piegando le lamiere. Tuttavia, tali giunture sono suscettibili di rottura nel caso di separazione per pelatura.

Un giunto migliore si ottiene in genere in processi senza fusione creando un'ampia area di contatto caricata a taglio (giunto per sovrapposizione). Una migliore distribuzione delle sollecitazioni nell'area del giunto si ottiene sfalsando la sovrapposizione (19.4 (b)) o rastremando le lamiere (19.4 (c)). I giunti a sovrapposizione sono rinforzati con elementi aggiuntivi (19.4 (d)). Se è richiesta una superficie liscia, i bordi

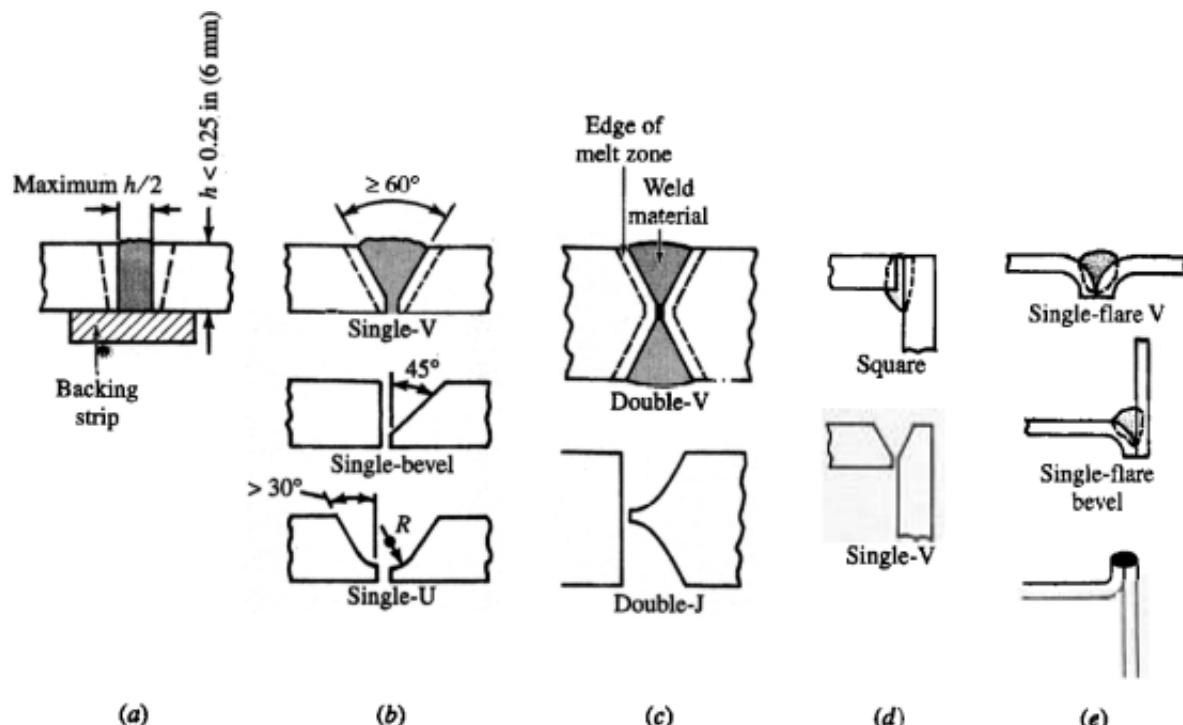


Figura 19.3: Preparazione dei giunti per saldature ad arco e a gas: (a) quadrata, (b) singola V, (c) doppia V, (d) ad angolo, (e) saldatura con piega

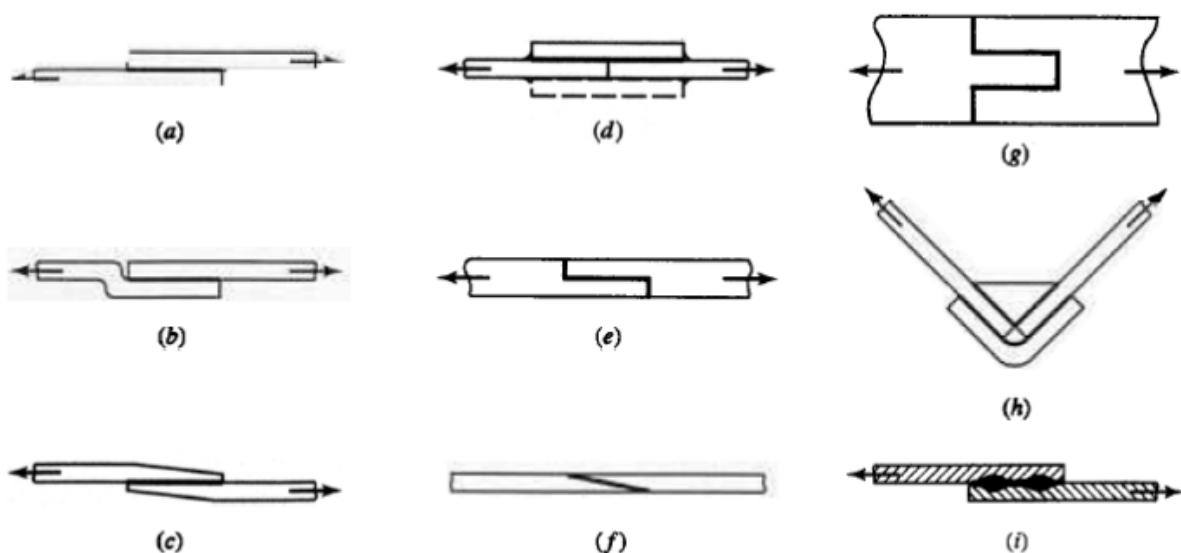


Figura 19.4: Giunzioni saldate, brasate, adesive disegnate per le migliori performance: (a) sovrapposizione semplice, (b) sovrapposizione ad offset, (c) sovrapposizione conica, (d) Soprapposizione rinforzata, (e) sovrapposizione per incastro, (f) sovrapposizione inclinata, (g) incastro, (h) angolo ad inserti, (i) saldatura

devono essere preparati o si fa un giunto inclinato ([19.4 \(e\)](#) ed [\(f\)](#)). Una configurazione scanalata converte le giunzioni di testa in giunzioni per sovrapposizione di maggiore resistenza ([19.4 \(g\)](#)). Nei giunti angolari o a T, la superficie di contatto può essere aumentata da riempitivi e coperture ([19.4 \(h\)](#)).

Nel processo di saldatura, lamiere rivestite con un adesivo vengono saldate per punti attraverso l'adesivo, e quindi l'adesivo viene polimerizzato. In alternativa, un giunto saldato per punti viene infiltrato con l'adesivo liquido che viene quindi indurito. La saldatura per punti aumenta la resistenza a taglio e l'adesivo aumenta la resistenza a fatica.

Un aspetto critico dei processi di giunzione è la garanzia della qualità. Le condizioni di processo devono essere rigorosamente monitorate e documentate. I test distruttivi periodici garantiscono che il processo sia sotto controllo. La resistenza delle giunzioni viene testata in trazione e quella dei giunti a sovrapposizione anche con prove di pelatura. Inoltre, vengono utilizzate tecniche [NDT](#) per verificare l'assenza di difetti. Le tecniche a ultrasuoni, correnti parassite e raggi X trovano applicazione generale. Nei processi in cui si possono formare cricche, le superfici vengono ispezionate mediante liquidi penetranti e particelle magnetiche. Nel caso di prodotti per applicazioni critiche (ad es. recipienti per centrali nucleari, navi, caldaie, ecc.) si applicano procedure e tecniche di ispezione speciali.

Parte VI

Tecniche di produzione additive

CAPITOLO 20

Tecniche di produzione additive

Con l'espressione *Tecnologie additive* ci si riferisce all'insieme dei processi di trasformazione volti all'ottenimento del volume e della geometria del componente tramite l'aggiunta progressiva di materiale in assenza di stampi.

20.1 Fasi comuni dei processi additivi

Tutti i processi additivi partono da una rappresentazione virtuale del modello realizzata tramite Computer-Aided Design (**CAD**). La presenza di un modello digitale del prodotto è un prerequisito vincolante. I processi additivi utilizzano una presentazione del solido detta Stereolitografia (**STL**). Le superfici esterne sono rappresentate tramite una discretizzazione (mesh) di elementi triangolari.

Ciascun elemento triangolare (o facet) è caratterizzato dalle nove coordinate cartesiane (X , Y , Z) dei suoi tre vertici (v_1 , v_2 , v_3) e dalle tre componenti (i , j , k) del versore uscente dalla superficie .

Il passaggio da una rappresentazione B-Rep ad una discretizzazione tramite triangoli comporta un'approssimazione delle superfici matematiche del componente.

La maggior parte degli ambienti **CAD** consente di fissare un parametro detto corda massima, ovvero la massima distanza tra la discretizzazione triangolare e le superfici matematiche.

Negli ultimi anni sono stati proposti nuovi formati con lo scopo di includere ulteriori informazioni riguardo il modello e ridurre la quantità di memoria allocata tramite compressione.

È necessario assicurarsi che l'insieme dei triangoli rappresentati le superfici di un solido reale. È necessario correggere eventuali zone di criticità nella discretizzazione. Esistono numerosi software dedicati alla verifica e riparazione di file **STL**.

Dopo le considerazioni circa quale ambiente di sviluppo sia più opportuno. Si ha la creazione di una rappresentazione virtuale del lavoro di stampa. Comprende gli aspetti geometrici, come ad esempio quanti e quali oggetti debbano essere realizzati, la loro posizione e il loro orientamento all'interno dell'area di lavoro.

Il primo passo per la modellazione del processo additivo è la definizione dell'area di lavoro. La rappresentazione in ambiente virtuale dell'area di lavoro include, oltre alla geometria dell'area di lavoro, il sistema di riferimento cartesiano della macchina.

Per consentire la lavorazione, il prodotto dovrà essere situato all'interno dell'area di lavoro della macchina. A livello di rappresentazione digitale, ciò si traduce in una serie di rotazioni e traslazioni del sistema di riferimento locale del modello rispetto al sistema di riferimento della macchina. L'orientamento e la posizione del componente rispetto al sistema di riferimento macchina hanno un'importanza fondamentale nel determinare le proprietà fisiche e geometriche del prodotto, nonché i tempi e la quantità di materiale necessari e la sua realizzazione.

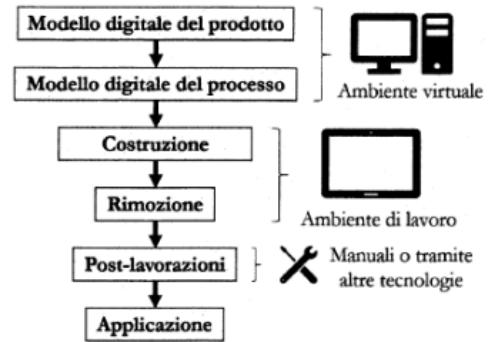


Figura 20.1: Operazioni comuni ai processi additivi

La scelta della posizione e dell'orientamento di ciascun modello avrà quindi un'incidenza fondamentale nel determinare il numero di componenti realizzabili tramite il medesimo processo produttivo. L'operazione di orientamento e collocamento dei modelli all'interno dell'area di lavoro prende il nome di *nesting*.

Nella quasi totalità delle tecnologie additive la geometria tridimensionale del prodotto è ottenuta tramite la sovrapposizione di strati piani di materiale detti layers generati in sequenza. L'area di lavoro è suddivisa tramite una serie di piani normali a Z pari all'altezza del layer. Con lo slicing il modello è rappresentato come sovrapposizione di layer. L'approssimazione introdotta con lo slicing migliora al ridursi dello spessore degli strati h_L . L'altezza h_C della generica cuspide dipende non solo dalla altezza h_L del layer, anche dall'orientamento della mesh **STL** ovvero dal vettore normale \hat{n}

$$h_C = h_L |\cos(\alpha)| \quad \forall \alpha \in]0 : \pi[\quad (20.1)$$

I parametri fanno riferimento alla figura 20.2.

Le features piane che richiedono un grado di dettaglio elevato sono, se possibile, realizzare nel piano XY. Quando si devono realizzare due componenti destinati all'accoppiamento è sempre opportuno che le superficie a contatto vengano costruite con il medesimo orientamento rispetto al piano di stampa. Una volta completato il modello digitale del processo, esso viene convertito da un opportuno software nelle istruzioni macchina necessarie alla sua attuazione. Tutte le operazioni preparatorie finora descritte siano svolte in ambiente virtuale e non necessitano la prossimità tra operatore e macchina. Le modalità con cui il materiale viene trasformato per andare a costruire il componente finale dipendono fortemente dalla tecnologia utilizzata. L'operatore può controllare l'area di lavoro in maniera diretta o indiretta. La rimozione del prodotto dall'area di lavoro risulta spesso critica. Può essere necessario un tempo di attesa tra la fine della costruzione del pezzo e la rimozione del componente. Molti processi additivi necessitano di introdurre nella zona di lavoro una quantità di materiale di partenza superiore a quella trasformata per formare il pezzo finale. I pezzi ottenuti da tecnologia additiva, una volta rimossi dalla zona di costruzione, sono spesso inadatti alla messa in opera diretta nella maggior parte delle applicazioni di interesse industriale.

Una volta terminata la fase di costruzione, il prodotto deve essere rimosso dall'area di lavoro della macchina. Nei processi additivi questa operazione risulta spesso critica e può richiedere particolari accorgimenti per preservare la qualità del prodotto, dell'ambiente di lavoro e della sicurezza degli operatori. Questa fase richiede solitamente l'impiego di specifiche attrezzature manuali o robotizzate. A seconda della tecnologia impiegata, può essere necessario un tempo di attesa tra la fine della costruzione del pezzo e la rimozione del componente. Nei processi che agiscono per via termica tale tempo di attesa consente un rilassamento delle tensioni di raffreddamento necessario ad evitare deformazioni incontrollate del prodotto. Se la costruzione avviene in presenza di gas pericolosi per l'essere umano o per l'ambiente, essi devono essere aspirati (tramite opportuni sistemi di filtraggio) prima che la zona di costruzione sia messa in contatto con l'ambiente esterno.

In molti processi il distacco del pezzo dalla macchina richiede l'ausilio di opportune attrezzature (manuali o robotizzate) che consentano di evitare il danneggiamento del prodotto e dei componenti della macchina stessa. Un aspetto particolarmente importante legato alla rimozione del componente dalla zona di lavoro è il recupero

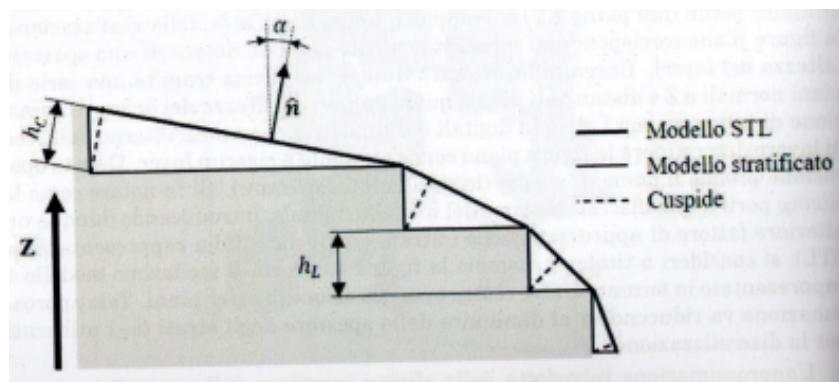


Figura 20.2: Rappresentazione dei parametri dell'equazione (20.1)

del materiale non trasformato eventualmente presente in essa Infatti, molti processi additivi necessitano di introdurre nella zona di lavoro una quantità di materiale di partenza superiore a quella trasformata per formare il pezzo finale; il materiale in eccesso deve dunque essere opportunamente raccolto per poter essere riutilizzato (totalmente o in percentuali controllate) nelle produzioni successive

I pezzi ottenuti da tecnologia additiva, una volta rimossi dalla zona di costruzione, sono spesso inadatti alla messa in opera diretta nella maggior parte delle applicazioni di interesse industriale Si possono dunque rendere necessarie varie operazioni sulle parti ottenute al fine di raggiungere le caratteristiche geometriche e fisiche imposte dal progetto Tali operazioni si configurano quindi come fasi successive all'interno del ciclo produttivo del componente e possono raggiungere gradi di complessità molto differenti a seconda della tecnologia impiegata e delle richieste progettuali

Tra le operazioni più comunemente adottate a valle dei processi additivi vi sono:

Rimozione delle strutture ausiliarie, ovvero di tutte le eventuali porzioni di materiale trasformato necessarie alla costruzione del pezzo, ma non alla sua messa in opera.

Pulizia del pezzo con rimozione dell'eventuale materiale non trasformato che residua dopo l'estrazione del pezzo dall'area di costruzione.

Trattamenti termici fisici o chimici, necessari a conferire alla parte specifiche proprietà meccaniche o fisiche.

Finitura superficiale in particolare al fine ridurre l'effetto "a gradini" indotto dalla stratificazione sulle superfici esterne.

Ulteriori operazioni post-processo possono includere verniciatura, rivestimento, infiltrazione ed altri.

Le prime applicazioni dei processi additivi si sono avute nel campo dello sviluppo prodotto per l'ottenimento di prototipi La flessibilità delle tecnologie additive, infatti, consente di ottenere geometrie tridimensionali di forma complessa in tempi ristretti rispetto alle tradizionali tecniche di prototipazione In seguito, le accuratezze dimensionali ottenibili e la ripetibilità del processo hanno consentito a molte tecnologie di produrre componenti che vadano ad inserirsi all'interno di assiemi complessi (accoppiandosi agli altri elementi funzionali).

Le proprietà fisiche e meccaniche che possono essere raggiunte tramite alcune tecnologie additive sono ad oggi comparabili con quelle dei prodotti da "processi tradizionali" L'applicabilità di una tecnologia additiva in luogo di altri metodi per la produzione di un dato componente dipende dalle specifiche della tecnologia medesima e del progetto Tali tecnologie risultano spesso convenienti economicamente rispetto ai metodi "tradizionali" nel caso di geometrie complesse e piccoli lotti di produzione Infatti, la costruzione per strati consente il superamento di molti vincoli legati ad altri processi, consentendo di sostituire un ciclo produttivo in più fasi. Inoltre, l'assenza di attrezzature fisse legate alla geometria del componente consente di svincolare il costo unitario del prodotto dalle dimensioni del lotto produttivo.

I vantaggi derivanti dall'impiego di tecnologie additive possono essere colti appieno solo tramite un'opportuna progettazione che tenga conto di potenzialità e vincoli degli specifici processi A tal fine, è fondamentale che i progettisti siano informati riguardo i nuovi strumenti tecnologici, introdotti sul mercato ad un ritmo sempre più serrato

20.2 Classificazione

Il panorama delle tecnologie additive risulta estremamente variegato ed in continua evoluzione Fornire una classificazione soddisfacente di tali processi in grado di porre ordine in questo scenario risulta complicato Vedremo una classificazione basata su:

- Materiale di partenza
- Strategia di stratificazione
- Strategia di costruzione del layer

Nel seguito ciascuna di queste tre voci sarà brevemente definita, con la presentazione delle categorie che la compongono e delle relative peculiarità

I materiali di partenza per le tecnologie additive possono essere:

- Liquidi
- Viscosi
- Pulviscolari
- Solidi

20.2.1 Materiali liquidi

I principali materiali allo stato liquido utilizzati nel campo delle tecnologie additive sono le resine **fotopolimeriche**, ovvero resine termoindurenti in grado di polimerizzare tramite **fotopolimerizzazione**. La fotopolimerizzazione è il meccanismo chimico-fisico tramite il quale alcuni materiali polimerici modificano le proprie caratteristiche quando colpiti da una radiazione luminosa Il risultato della fotopolimerizzazione è un polimero termoindurente solido A seconda del tipo di resina utilizzata, la polimerizzazione può avvenire seguendo due diversi meccanismi:

Fotopolimerizzazione radicalica nella quale la catena polimerica si forma tramite la successiva addizione di radicali liberi. E' un meccanismo tipico delle resine acriliche.

Fotopolimerizzazione cationica nella quale i monomeri assorbono una carica che li rende reattivi, consentendone l'aggregamento ad altri monomeri per la formazione del polimero. È un meccanismo tipico delle resine epossidiche

In entrambi i casi, è necessaria la presenza all'interno della resina liquida di un particolare elemento chimico -detto fotoiniziatore- che una volta sottoposto a radiazione luminosa rilascia le sostanze necessarie ad innescare la polimerizzazione del materiale La fotopolimerizzazione radicalica risulta più veloce di quella cationica, e questo la rende particolarmente favorevole per contenere i tempi necessari al processo additivo tramite fotopolimerizzazione selettiva. Di contro, le resine epossidiche mostrano una minor contrazione volumetrica durante la polimerizzazione, con conseguente riduzione delle distorsioni nel pezzo finale Perciò, queste famiglie di monomeri sono attualmente spesso incluse nella composizione delle resine commerciali. La necessità di innescare la fotopolimerizzazione pone un importante limite ai materiali trasformabili tramite questo meccanismo. Le resine liquide adottate nel processo di stereolitografia possono contenere altri elementi in grado di conferire al componente finale particolari caratteristiche fisiche.

20.2.2 Materiali viscosi

Ricordando che la deformazione dei materiali viscosi è funzione non solo del carico applicato, ma anche della sua durata. I materiali reali hanno una, seppur piccola, componente di deformazione elastica, la quale deve essere tenuta in considerazione durante il processo di trasformazione. I materiali di interesse per i processi di trasformazione additiva includono polimeri termoplastici, impasti ceramici, cemento, paste alimentari ed altri. Tali materiali vengono mantenuti allo stato viscoso durante il processo di costruzione della geometria tridimensionale. Una volta modellati, vengono quindi sottoposti a trattamenti finalizzati a conferire al manufatto le proprietà meccaniche desiderate, in particolare in termini di rigidezza Tali trattamenti possono consistere in raffreddamenti, cicli di cottura, essiccazione, o altro.

20.2.3 Polveri

I materiali in forma pulviscolare sono costituiti da particelle solide di granulometria solitamente inferiore ai 100 μm . Tali materiali trovano grande impiego nel campo delle tecnologie additive, grazie alla loro estrema

versatilità ed alla possibilità di mescolare polveri di diversa natura, ottenendo così particolari proprietà fisico-chimiche del prodotto finito. Le classi di materiali processate nel campo delle tecnologie additive includono polimeri termoplastici, metalli e minerali come le ceramiche ed il silice. Il consolidamento delle polveri per ottenere un solido continuo tramite tecnologie additive avviene attraverso sinterizzazione e/o fusione.

Si possono distinguere quattro principali meccanismi di unione:

Sinterizzazione allo stato solido

Legame chimico

Sinterizzazione per fusione localizzata

Rifusione completa

I processi additivi possono utilizzare uno o più di questi meccanismi per ottenere un solido a partire dal materiale pulviscolare

La sinterizzazione allo stato solido avviene ponendo dei grani di polvere adiacenti in un ambiente che ne aumenti l'energia superficiale specifica rispetto alle condizioni ambientali (questo può essere fatto, ad esempio, aumentando la temperatura o la pressione). All'aumentare dell'energia superficiale specifica, per minimizzare l'energia superficiale totale del sistema, le particelle di polvere tenderanno ad unirsi come in 20.3 B), riducendo così la superficie totale. Tale fenomeno avviene a temperature anche inferiori a quella di fusione del materiale, senza quindi nessun passaggio attraverso lo stato liquido.

Il consolidamento per via chimica si basa su reazioni chimiche attivate termicamente (tra polveri differenti o tra la polvere e altri elementi presenti nell'ambiente di lavoro) che portano alla generazione di sottoprodotto che fungono da leganti. Si ha quindi un incollaggio delle polveri solide tramite un secondo prodotto. Il risultato di questo meccanismo di consolidamento è dunque un materiale composito costituito dal materiale di base e dal legante. La resistenza del componente finale dipende dunque dalle forze adesive tra polvere e legante, e non dalle caratteristiche proprie del materiale di base. Inoltre, questo meccanismo di consolidamento porta a parti con porosità generalmente elevate, poiché il legante non riesce a riempire efficacemente i mezzi tra i grani di polvere.

Nella fusione localizzata si verifica il passaggio allo stato liquido di alcune zone della polvere. Tali zone possono essere dovute ad una composizione eterogenea che favorisce la fusione del componente bassofondente o ad un apporto di calore sufficiente a rifondere solo la parte esterna del granello; questa seconda tecnica è più facilmente applicabile nei materiali che presentano bassa condutività termica (come ad esempio i polimeri). La figura mostra un esempio di rifusione localizzata in cui la superficie dei grani solidi (20.4 A) passa allo stato liquido (20.4 B) per poi risolidificarsi in un solido continuo (20.4C).

Nell'ultimo metodo di consolidamento, la rifusione completa, si assiste al passaggio di tutti i granelli di materiale allo stato liquido con successiva solidificazione in un solido unico. La quasi totalità dei processi additivi a letto di polvere utilizza ad oggi la fusione localizzata o la rifusione completa per la sinterizzazione delle polveri. Esistono inoltre processi additivi in cui le polveri vengono bagnate da un legante chimico che funge da collante tra i granelli di solido. Valgono in tal caso le stesse considerazioni esposte nel caso della sinterizzazione per legame chimico. Tipicamente questi processi sono seguiti da un trattamento termico durante il quale il legante viene dissolto e si instaura uno degli altri meccanismi di sinterizzazione per via termica descritti in precedenza.

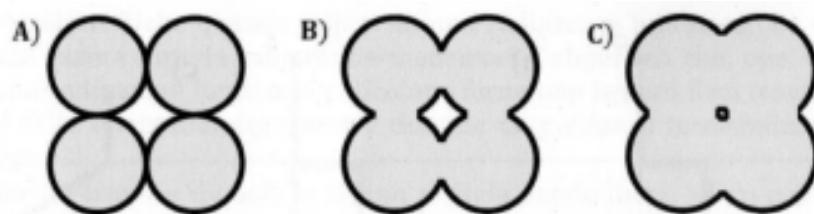


Figura 20.3: Particolare sulla sinterizzazione allo stato solido

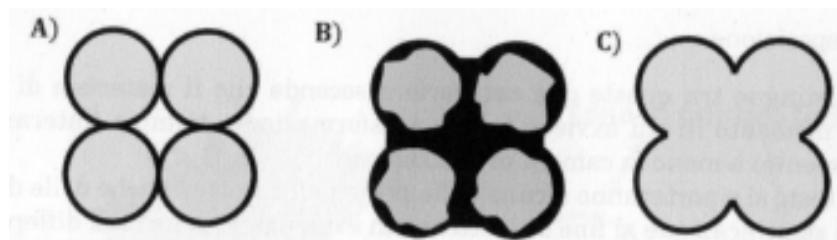


Figura 20.4: Particolare sul funzionamento della fusione localizzata

20.2.4 Materiali Solidi

I processi additivi che utilizzano materiali di partenza allo stato solido (con forma diversa da quella pulviscolare) sono attualmente pochi e con limitati campi di applicazione. Ciò è da imputarsi principalmente alle difficoltà che si incontrano nel modellare il materiale solido per ottenere la forma dell'oggetto finale. Per questo motivo, all'interno dei processi additivi, si utilizzano per lo più solidi con geometrie che ne favoriscono la deformabilità, come filamenti e fogli di piccolo spessore. Si possono poi adoperare sottoprocessi di taglio per conferire al materiale la forma desiderata. I materiali solidi usati sono principalmente polimeri termoplastici e metalli. Il meccanismo di consolidamento può essere l'incollaggio, tramite adesivo o solvente, oppure la saldatura del materiale.

20.3 Strategie di solidificazione

Il componente realizzato con tecnologia additiva è ottenuto per strati successivi di materiale. Questi strati possono essere ottenuti per:

- Trasformazione selettiva (Processi a letto di materiale)
- Deposizione

Si distingue tra queste due categorie a seconda che il materiale di partenza, nel momento in cui avviene la sua trasformazione, riempia (interamente o parzialmente) o meno la camera di costruzione.

Nella trasformazione selettiva di materiale la camera di costruzione (o almeno la porzione in cui avviene la trasformazione del materiale) è inizialmente piena del materiale di partenza. Per questo motivo i processi che utilizzano tale strategia sono anche detti a letto di materiale. Il processo procede quindi trasformando solo la porzione del materiale che corrisponde alla geometria del pezzo. Una volta completata questa trasformazione, l'intera area di lavoro viene ricoperta di materia prima ed il ciclo si ripete. Al termine del processo, il pezzo si troverà quindi immerso nel materiale di partenza, dal quale dovrà essere estratto. Ciò comporta in primo luogo la necessità di una operazione di pulizia del pezzo in seguito alla rimozione dalla camera di costruzione. Non sarà quindi possibile costruire parti cave prive di aperture in quanto il materiale non trasformato rimarrebbe intrappolato all'interno. La dimensione minima delle aperture necessarie a pulire il pezzo dipenderà dalla sua geometria, dalle caratteristiche del materiale e dal metodo usato per la pulizia.

Nella deposizione, il materiale viene depositato solo in zone scelte della camera di costruzione, la quale è inizialmente occupata da aria o altri gas. Il primo layer di materiale sarà depositato sulla piattaforma di costruzione (ovvero il pavimento della camera di costruzione), mentre ciascuno dei layers successivi sarà depositato sul precedente. Questa strategia di stratificazione offre la possibilità di depositare materiali diversi in maniera controllata. Si ha quindi l'opportunità di progettare e realizzare componenti costituiti da più materiali, cosa che non è in genere possibile fare nei processi a letto di materiale.

20.4 Strutture di supporto

A questo punto è opportuno introdurre un tema fondamentale della progettazione per tecnologie additive, ovvero le strutture di supporto. Nei processi di deposizione, al fine di avere ad ogni layer una continuità del materiale con la piattaforma di costruzione, il modello non deve presentare zone a sbalzo nella direzione Z.

In altri termini, ad ogni strato $i > 0$ ciascuna zona trasformata deve trovare sotto di sé del materiale: infatti, se così non fosse, il materiale non potrebbe aderire al resto del componente, ma cadrebbe sulla piattaforma per effetto della gravità. Questa considerazione è valida anche per i processi a letto di materiale in cui la materia prima è costituita da un liquido o comunque presenta una densità minore a quella del materiale trasformato.

La figura 20.5 mostra un esempio di modello che presenta minimi locali rispetto all'asse Z, mettendo in evidenza come tali zone siano sconnesse dal resto del modello al layer i -esimo. La presenza di minimi locali può essere in alcuni casi evitata agendo sull'orientamento rispetto all'asse Z del componente in fase di progettazione del processo.

Molto spesso è necessario trasformare zone ausiliarie di materiale, dette supporti, che hanno la funzione di sostenere il materiale trasformato nelle zone a sbalzo del modello. La figura 20.6 mostra in colore blu i supporti aggiunti per sostenere le zone critiche evidenziate nella figura 20.5 precedente.

Al termine del processo, il pezzo presenterà dunque delle zone trasformate (le strutture di supporto) che non fanno parte del modello iniziale, ma sono necessarie alla sua realizzazione. Tali strutture dovranno dunque essere rimosse nella fase di post-processo, prima della messa in opera del componente. I supporti devono essere aggiunti al modello in ambiente virtuale durante la progettazione del processo: esistono a tale scopo numerosi software dedicati. A seconda delle caratteristiche specifiche della tecnologia e del processo, è possibile utilizzare strutture di supporto di geometrie e dimensioni diverse.

Gli obiettivi che ci si pone durante la progettazione di tali strutture sono:

- Sostenere efficacemente il materiale in costruzione.
- Ridurre il volume delle strutture di supporto.
- Facilitare la rimozione dei supporti in post-processo.

Al fine di facilitarne la rimozione, i supporti vengono solitamente progettati con sezioni assottigliate in prossimità della parte che fungono da zone di rottura preferenziale (si veda l'esempio di figura 20.6, in cui i supporti hanno forma conica con sezione minima nel punto di contatto con il pezzo). Per consentire la rimozione, è inoltre necessario che i supporti siano posizionati in zone raggiungibili dall'operatore e dagli eventuali utensili utilizzati per la loro rimozione.

Oltre che ad evitare la presenza di minimi locali, le strutture di supporto possono essere necessarie anche ad evitare che il materiale appena trasformato si deformi per effetto del proprio peso.

La tendenza del layer a deformarsi sotto l'effetto del peso proprio dipende dalle caratteristiche del materiale, dall'inclinazione rispetto a Z delle superfici e da numerosi parametri di processo come, ad esempio, l'altezza del layer. Per una certa combinazione di materiale e parametri, è dunque possibile definire un angolo

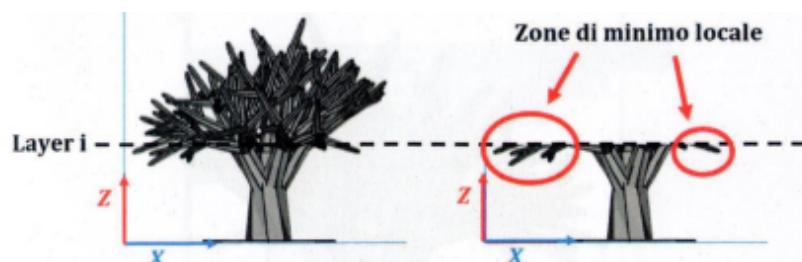


Figura 20.5: Minimi locali in un modello 3D sull'asse Z

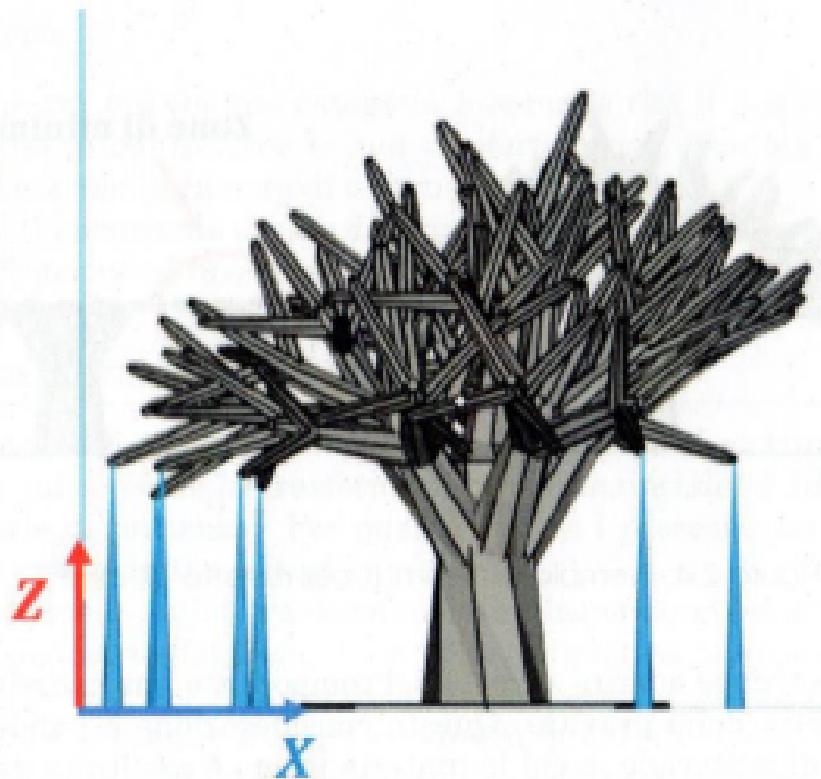


Figura 20.6: Realizzazione di supporti per i minimi

α_{lim} detto angolo limite rispetto all'asse Z, oltre il quale il materiale non è in grado di sostenere il proprio peso.

La figura 20.7 mostra una rappresentazione dell'angolo θ da confrontarsi con l'angolo limite α_{lim} : si noti come ciascun layer in figura presenti una sezione a sbalzo rispetto allo strato precedente, la cui lunghezza aumenta al crescere di θ .

Una volta noto l'angolo limite, è possibile individuare le superfici che necessitano di supporti, andando a verificare il loro orientamento rispetto alla direzione di costruzione. La deformazione del materiale sotto l'effetto del peso proprio interessa anche le strutture cosiddette "a ponte", ovvero tutte quelle geometrie sostenute solo agli estremi dal materiale sottostante. La figura 20.7 mostra un esempio di struttura "a ponte" deformata sotto l'effetto del peso proprio.

La deformazione di una struttura a ponte dipende dalla lunghezza della zona sospesa, nonché dalle dimensioni della sezione trasversale. Si definisce un rapporto massimo tra queste grandezze, oltre il quale sarà necessario ricorrere a strutture di supporto. Ragionamenti analoghi possono essere condotti nel caso di geometrie a sbalzo. Anche in questo caso si avrà quindi un rapporto massimo tra la sezione della struttura a sbalzo e la sua lunghezza, oltre il quale è necessario fare ricorso a strutture di supporto. Si sottolinea come la lunghezza limite degli sbalzi sia in genere inferiore, a parità di sezione, a quella delle strutture a ponte. In alcune tecnologie la progettazione di alcuni di questi elementi, se non supportati, non è ammessa indipendentemente dalle loro dimensioni.

20.5 Strategie per la costruzione dei layer

A prescindere dalla strategia di trasformazione e dalla tecnica utilizzata per il consolidamento del materiale, è possibile distinguere tre approcci differenti attraverso i quali le tecnologie additive trasformano il

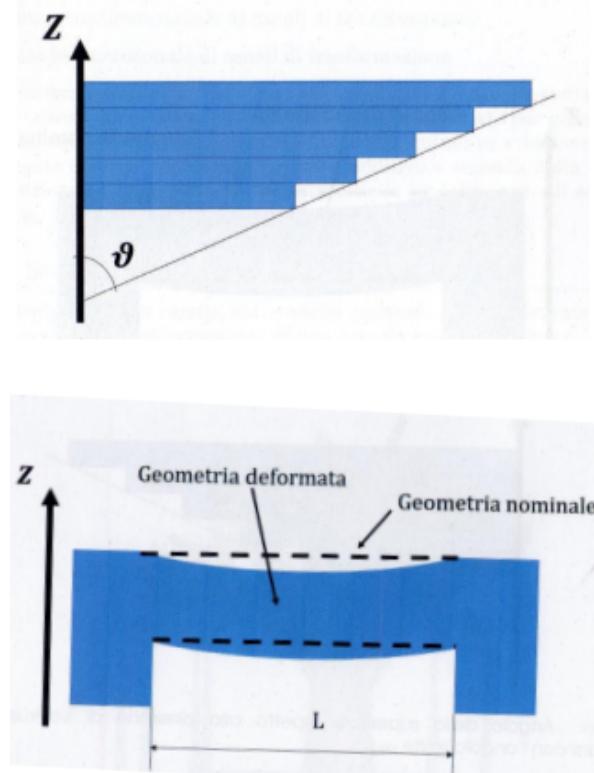


Figura 20.7: Confronto con l'angolo θ e l'effetto del peso del materiale su se stesso

materiale di ciascun layer, ovvero:

Singolo canale di trasformazione

Vettore monodimensionale di canali di trasformazione

Matrice bidimensionale di canali di trasformazione

20.5.1 Singolo canale

Nella strategia a singolo canale, detta anche puntuale, ad ogni istante della lavorazione avviene la trasformazione di una piccola regione del layer. L'utensile usato per tale trasformazione (sia esso materiale o energetico) viene dunque idealmente considerato come un singolo punto in movimento durante la definizione dei percorsi. L'utensile può essere attivo o inattivo a seconda che operi o meno la trasformazione del materiale di base. L'area della porzione di materiale trasformata ad ogni istante dal canale di trasformazione determinerà lo spessore della traccia di materiale trasformata e dunque la definizione ottenibile sul piano del layer.

Ad ogni layer, il canale di trasformazione dovrà ricoprire tutte le aree delle figure piane definite durante la fase di slicing. Per fare ciò, normalmente si distinguono due fasi distinte per ciascun layer: dapprima il canale compie un percorso esterno volto a trasformare il perimetro delle figure piane (contouring), mentre nella seconda fase procede a trasformare il materiale all'interno di tali figure (hatching). I percorsi compiuti dal canale di trasformazione durante il contouring e l'hatching sono detti, rispettivamente, di contorno e di riempimento.

Il tempo di costruzione di ciascun layer dipenderà dunque dall'area delle figure piane in esso contenute. In particolare, la necessità di effettuare i percorsi di riempimento aumenta il tempo necessario alla costruzione di ciascuno strato in maniera inversamente proporzionale alla velocità del canale di trasformazione e alla

porzione di materiale da esso trasformato. Laddove tali tempi risultino particolarmente onerosi ed i requisiti imposti al componente lo consentano, si preferisce talvolta effettuare un riempimento non completo delle figure piane (e dunque del componente) al fine di ridurre i tempi complessivi del processo. Per ridurre il tempo di costruzione di ciascuno strato, alcune tecnologie offrono anche la possibilità di adottare più canali di trasformazione (solitamente 2 o 4) che lavorano in parallelo su zone diverse del layer.

20.5.2 A Vettore

Nelle tecnologie che adottano una strategia di costruzione tramite vettore monodimensionale di canali, detta anche lineare, si ha un numero finito di canali allineati lungo una direzione fissa (normalmente Y). Questo vettore di canali si muove con velocità ortogonale alla direzione di allineamento durante la costruzione del layer. In base alla posizione del vettore, ogni canale si troverà nella condizione attiva o inattiva (cioè trasformerà o meno il materiale di base) a seconda della forma calcolata durante lo slicing. Questa strategia prevede dunque un coordinamento tra l'avanzamento del vettore e l'attuazione acceso/spento di ciascun canale per ottenere la figura comandata; per meglio comprendere, si può pensare all'analogia con la stampa bidimensionale a getto di inchiostro.

La definizione ottenibile nella direzione Y dipenderà dalla porzione di materiale trasformata da ciascun canale e dalla distanza tra canali adiacenti. La definizione ottenibile nella direzione X, invece, dipenderà dalla velocità di avanzamento del vettore di canali. Si noti come, in questa strategia, il tempo necessario alla costruzione del singolo strato non dipenda dalla geometria delle figure piane contenute nel layer, ma solo dalla velocità di avanzamento imposta. Di conseguenza, le tecnologie che utilizzano questa strategia consentono di realizzare solidi pieni senza aggravi sui tempi. Inoltre, il tempo totale del processo dipenderà solo dal numero di layer da costruire (ovvero dall'altezza in z dell'area di lavoro utilizzata) e risulta facilmente calcolabile dal modello di processo.

20.5.3 Matrice bidimensionale

Nella strategia di trasformazione tramite matrice bidimensionale di canali, detta anche planare, l'intera superficie del piano xy dell'area di lavoro è suddivisa in piccole regioni, a ciascuna delle quali compete un canale di trasformazione. L'intera geometria del layer viene dunque trasformata simultaneamente attivando i soli canali corrispondenti alle regioni piene della figura. Questa strategia prevede dunque una duplice discretizzazione delle geometrie nelle direzioni X ed Y, legata alle dimensioni dei canali di trasformazione. La risoluzione della figura piana è del tutto analoga a quella delle immagini digitali (in questo caso il canale di trasformazione si sostituisce al pixel), tanto che spesso viene espressa in punti per pollice (Dots Per Inch, DPI).

Anche in questo caso, il tempo necessario alla costruzione del singolo strato non è influenzato dalla sua geometria. Inoltre, qui non si ha nemmeno una dipendenza dalle dimensioni dell'area di lavoro. Questa strate-

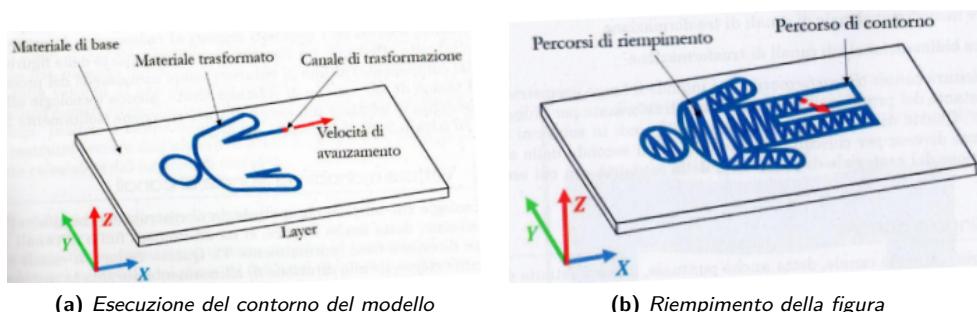


Figura 20.8: Esecuzione di un modello tramite singolo canale

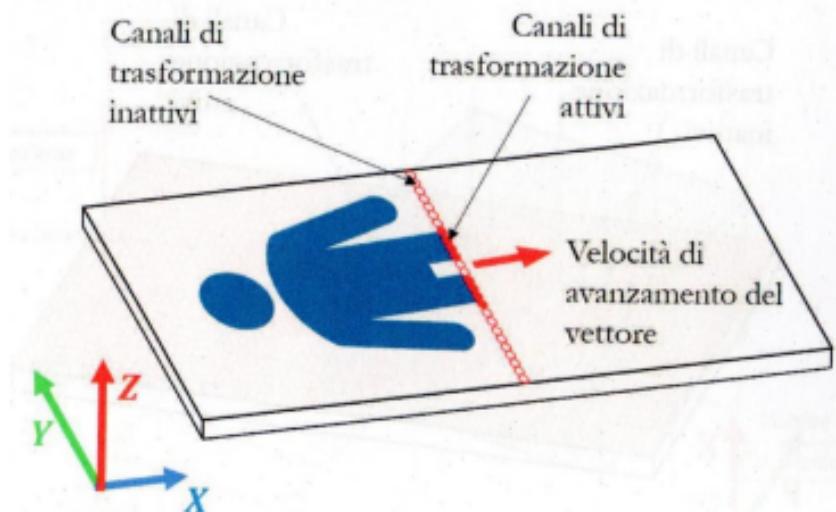


Figura 20.9: Modalità di realizzazione a vettore in Y

gia, trasformando simultaneamente l'intero layer, consente pertanto solitamente un risparmio considerevole di tempo sull'intero tempo di processo.

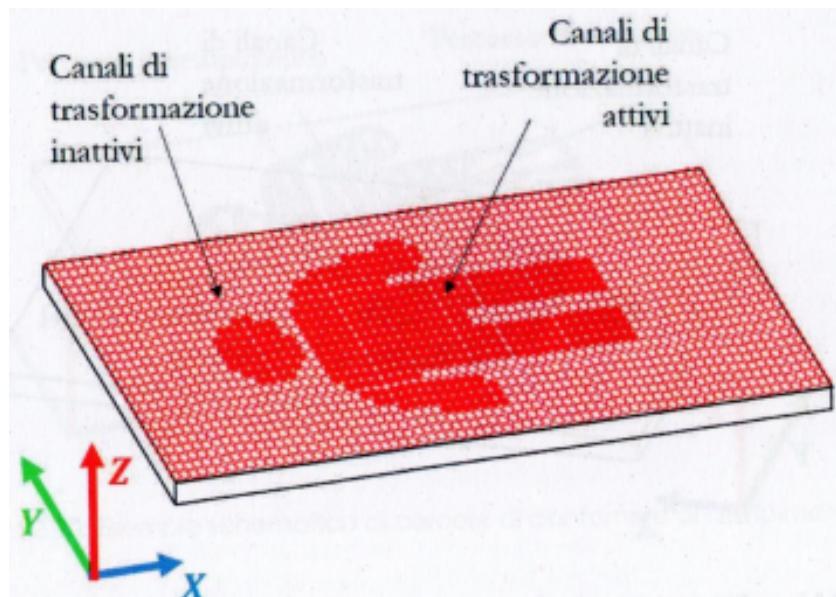


Figura 20.10: Realizzazione di un modello tramite stampaggio a matrice

APPENDICE A

Esempio applicativo sulle macchine utensili

Esempio. A.0.1: 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 (9.1) a pagina 98, (9.3) a pagina 100 e (9.4) a pagina 101 si ottengono:

- UTS del materiale: in questo caso $UTS = 485\text{MPa}$.
- 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: $E_1 = 2.1\text{Ws/mm}^2$
- Energia spesa: $E = E_1 * h^{-a} = 2.59\text{Ws/mm}^2$
- Da cui la potenza: $P = \frac{2.59 * 4320}{0.7} = 16\text{kW}$
- la forza di taglio: $P_c = \frac{15956}{2.16} = 7.4\text{kN}$

APPENDICE B

Acronimi

CAD	Computer-Aided Design
CCC	Cubico a Corpo Centrato
CFC	Cubico a Facce Centrate
CNC	Controllo Numerico Computerizzato
CS	Cubico Semplice
ESW	ElectroSlag Welding
EWB	Electron Welding Beam
FCAW	Flux-Cored Arc Welding
FMS	Flexible Manufacturing Systems
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
LDR	Limit Drawing Ratio
LBW	Laser Beam Welding
NDT	Non-Destructive Testing
PAW	Plasma Arc Welding
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shield Metal Arc Welding
STL	Stereolitografia
SW	Socket Welding
TR	Technical Report
TT	Trattamento Termico
ZTA	Zona Termicamente Alterata