



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI DTG  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCATRONICA

---

# Trattamenti di pallinatura per il ripristino della resistenza a fatica di semilavorati in alluminio

**Relatore:** Prof. Franco Bonollo

**Candidato:** Davide Benedetti

---

Anno Accademico 2018/2019



*Si ringrazia la 2Effe Engineering S.r.l.  
nelle figure dell'ing. G. Marconi  
e dell'ing. D. Maestrini per il tempo ed  
il supporto dedicato a questo progetto*



# Indice

<b>Indice</b>	<b>iii</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>v</b>
<b>Introduzione</b>	<b>xi</b>
<b>1 L'alluminio e le sue leghe</b>	<b>1</b>
1.1 Proprietà dell'alluminio . . . . .	1
1.1.1 Principali caratteristiche . . . . .	1
1.1.2 Campi di impiego . . . . .	3
1.1.3 Rafforzamento per incrudimento . . . . .	4
1.2 Le leghe leggere . . . . .	5
1.2.1 Proprietà degli alliganti . . . . .	5
1.2.2 Trattamenti termici . . . . .	7
1.2.3 Designazione leghe commerciali . . . . .	10
1.3 Principali processi di produzione di semilavorati . . . . .	12
1.3.1 Estrusione . . . . .	13
1.3.2 Laminazione . . . . .	15
1.3.3 Forgiatura . . . . .	16
1.3.4 Processi di fonderia . . . . .	16
<b>2 La resistenza a fatica meccanica</b>	<b>19</b>
2.1 Resistenza a fatica ad alto numero di cicli . . . . .	19
2.1.1 Cenni storici . . . . .	19
2.1.2 Definizioni . . . . .	21
2.1.3 Analisi della rottura per fatica . . . . .	21
2.1.4 La curva di Wöhler . . . . .	23
2.2 Fattori d'influenza esterni . . . . .	25
2.2.1 Rapporto di ciclo e forma d'onda . . . . .	25
2.2.2 Tipo di sollecitazione . . . . .	26

---

2.2.3	Ambiente e temperatura . . . . .	27
2.2.4	Storia pregressa . . . . .	27
2.3	Fattori d'influenza interni . . . . .	28
2.3.1	Materiale . . . . .	29
2.3.2	Dimensioni assolute . . . . .	29
2.3.3	Finitura superficiale e trattamenti . . . . .	30
2.3.4	Geometria e variazioni di sezione . . . . .	31
2.4	Progettazione e verifiche a fatica . . . . .	34
2.4.1	Approcci alla progettazione . . . . .	34
2.4.2	Valutazione sperimentale della resistenza a fatica . . . . .	35
2.4.3	Consigli pratici per ridurre la probabilità di rotture per fatica . . . . .	38
2.4.4	Particolarità nel caso delle leghe leggere . . . . .	40
<b>3</b>	<b>Le tensioni residue</b>	<b>45</b>
3.1	Reticolo cristallino e suoi difetti . . . . .	45
3.1.1	Legame metallico e reticoli cristallini . . . . .	45
3.1.2	I difetti puntiformi . . . . .	47
3.1.3	I difetti lineari . . . . .	48
3.1.4	I difetti superficiali . . . . .	49
3.1.5	La mobilità dei difetti lineari . . . . .	50
3.1.6	La deformazione plastica . . . . .	52
3.1.7	Il fenomeno dell'incrudimento . . . . .	53
3.2	Il fenomeno delle tensioni residue . . . . .	55
3.2.1	Definizione . . . . .	55
3.2.2	La lunghezza caratteristica . . . . .	56
3.2.3	Natura delle tensioni residue . . . . .	58
3.2.4	Effetti delle tensioni residue . . . . .	60
3.2.5	Tecniche di misurazione delle tensioni residue . . . . .	61
<b>4</b>	<b>La pallinatura</b>	<b>63</b>
4.1	Il trattamento di pallinatura controllata . . . . .	63
4.1.1	Il processo fisico . . . . .	63
4.1.2	I benefici ottenibili . . . . .	65
4.2	I parametri di pallinatura . . . . .	66
4.2.1	L'intensità . . . . .	66
4.2.2	I pallini . . . . .	68
4.2.3	La copertura . . . . .	69
4.2.4	Rugosità superficiale e forma dei dimples . . . . .	69

---

4.2.5	L'overpeening . . . . .	70
<b>5</b>	<b>La prova sperimentale</b>	<b>73</b>
5.1	Obiettivo della prova . . . . .	73
5.2	Analisi e preparazione dei provini . . . . .	74
5.2.1	La caratterizzazione del provino . . . . .	74
5.2.2	La realizzazione degli intagli . . . . .	75
5.3	La pallinatura dei campioni . . . . .	78
5.3.1	Il flap-peening . . . . .	78
5.3.2	Scelta dell'intensità . . . . .	80
5.4	La prova di fatica . . . . .	84
5.4.1	Descrizione del macchinario . . . . .	84
5.4.2	Impostazione delle prove di fatica . . . . .	85
5.4.3	Analisi della frattura . . . . .	87
5.5	Svolgimento e risultati delle prove . . . . .	90
	<b>Conclusione</b>	<b>93</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>96</b>





# Elenco delle figure

1.1	<i>Esempi di geometrie complesse per profilati ottenibili per estrusione e confronto con le alternative in acciaio. [23]</i> . . . . .	3
1.2	<i>Effetto delle lavorazioni sulla direzione dei grani.[23]</i> . . . . .	5
1.3	<i>Risultati di raffreddamenti a velocità diverse in una lega AlCu.[19]</i> . .	9
1.4	<i>Andamento della durezza nel tempo con invecchiamento a 190°C e della resistenza meccanica in funzione di temperatura e durata del trattamento.[19]</i> . . . . .	9
1.5	<i>Schema di una pressa per estrusione e di matrici a oblò e a ragno.[23]</i>	14
1.6	<i>Esempi di diverso comportamento del materiale durante l'estrusione.[46]</i>	15
1.7	<i>Processo di laminazione di lamiera.</i> . . . . .	16
1.8	<i>Fasi di un processo di colata in conchiglia a pressione.[31]</i> . . . . .	17
2.1	<i>Principali grandezze di riferimento per lo studio dei fenomeni a fatica.</i>	21
2.2	<i>Esempio di superficie di rottura a fatica e rappresentazione schematica. Si notano: (1) innesco, (2) propagazione e linee di spiaggia, (3) cedimento finale.[31]</i> . . . . .	22
2.3	<i>Esempio di diagramma di Wöhler semplificato.</i> . . . . .	24
2.4	<i>Esempio di diagramma di Haigh.</i> . . . . .	24
2.5	<i>Esempio di diagramma di Goodman-Smith relativo al carico di snervamento (linea piena) e al carico di rottura (linea tratteggiata).</i> . . . .	26
2.6	<i>Sezione maggiormente sollecitata a fatica nel caso di sforzi di flessione piana (a), flessione rotante (b) e trazione (c).</i> . . . . .	27
2.7	<i>Sollecitazione costante a blocchi e sollecitazione equivalente secondo la regola di Miner.</i> . . . . .	28
2.8	<i>Rapporto di fatica per acciaio (a) e leghe di alluminio (b).[49]</i> . . . .	29
2.9	<i>Andamento del coefficiente di riduzione della vita a fatica in base alle dimensioni del pezzo.[2]</i> . . . . .	30

2.10	<i>Andamento del coefficiente di riduzione della vita a fatica in base al carico di rottura del materiale e alla rugosità superficiale: (1) superfinitura con 0,25 Ra, (2) rettifica fine con 0,5 Ra, (3) rettifica normale con 1,0 Ra, (4) finitura alla macchina utensile con 2,5 Ra, (5) sgrossatura con 12 Ra, (6) greggio di laminazione, (7) con corrosione in acqua pura, (8) con corrosione in acqua salata.[2]</i> . . . . .	31
2.11	<i>(a) Analogia idraulica che evidenzia la concentrazione delle tensioni in presenza di intagli.[49] (b) Concentrazione delle tensioni in presenza di raggi di raccordo più o meno ridotti.[44]</i> . . . . .	32
2.12	<i>Esempi di grafici da cui ricavare il fattore di intaglio in base alla forma e al rapporto tra le dimensioni.[2]</i> . . . . .	33
2.13	<i>Alcuni esempi di macchine per le prove di fatica: (a) a flessione rotante a sbalzo, (b) a flessione rotante con macchina di Moore, (c) a flessione piana, (d) a trazione-compressione, (e) a torsione.[49]</i> . . .	36
2.14	<i>Alcuni esempi di provini impiegati per le diverse prove di fatica: (a) flessione rotante, (b) assiale uniforme, (c) assiale a clessidra, (d) assiale o flessione rotante con intaglio, (e) flessione piana, (f) tubolare per prove di flessotorsione con o senza pressione interna, (g) lamiera intagliata, (h) provino con intaglio profondo, (i) provino per analisi avanzamento cricche, (j) flessione a tre punti.[49]</i> . . . . .	37
2.15	<i>Consigli per il miglioramento della vita a fatica nel caso di geometrie critiche.[49]</i> . . . . .	39
2.16	<i>Esempio di curva di Wöhler semplificata nel caso dell'alluminio.</i> . . .	40
2.17	<i>(a) Andamento semplificato delle curve di Wöhler per diverse classi di leghe. (b) Esempio di miglioramento della resistenza di un semilavorato di alluminio aumentandone il momento d'inerzia.[54]</i> . .	41
2.18	<i>Confronto tra resistenza statica e a fatica per diverse tipologie di leghe di alluminio.[20]</i> . . . . .	42
3.1	<i>Reticoli cristallini e loro impilamento: (a) cubico a corpo centrato, (b) cubico a facce centrate, (c) esagonale compatto.[41]</i> . . . . .	47
3.2	<i>(a) Difetti puntiformi: (1) lacuna, (2) atomo autointerstiziale, (3) atomo interstiziale, (4) e (5) atomi sostituzionali. (b) Formazione di una lacuna.[41]</i> . . . . .	48
3.3	<i>Esempi di dislocazioni: (a) a spigolo, (b) a elica, (c) mista.[41]</i> . . .	48
3.4	<i>Tipologie di bordo grano: (a) perfettamente coerente, (b) coerente con deformazione plastica, (c) semicoerente, (d) incoerente.[41]</i> . . . . .	50

3.5	<i>Andamento del vettore di Burgers: (a) per dislocazioni a spigolo, (b) per dislocazioni a elica.[41]</i> . . . . .	51
3.6	<i>Fasi dello spostamento di una dislocazione secondo il meccanismo di Orowan.[41]</i> . . . . .	52
3.7	<i>Deformazioni plastiche: (a) per scorrimento, (b) per geminazione.[41]</i>	52
3.8	<i>Fasi del moto di una dislocazione a spigolo.[41]</i> . . . . .	53
3.9	<i>(a) Stadi dell'incrudimento. (b) Incrudimento per monocristalli metallici CCC (Fe), CFC (Cu), EC (Mg).[41]</i> . . . . .	54
3.10	<i>(a) Andamento della resistenza meccanica in base alla densità di dislocazioni: (1) materiale teorico, (2) provini whiskers da laboratorio, (3) ricottura profonda, (4) incrudimento. (b) Andamento proporzionale della tensione di snervamento in funzione della densità delle dislocazioni nella zona 4.[41]</i> . . . . .	55
3.11	<i>Schema intuitivo del concetto di tensioni residue.</i> . . . . .	56
3.12	<i>Evoluzione delle tensioni residue per un provino in acciaio temprato in acqua da 600°C. Si nota come le tensioni residue si avvicinano ai 600 MPa.[38]</i> . . . . .	58
3.13	<i>Andamento delle tensioni residue lungo lo spessore tipiche di una lavorazione per asportazione di truciolo e diversi risultati ottenibili variando leggermente la lavorazione.[38]</i> . . . . .	59
3.14	<i>Diagramma di Haigh modificato per tener conto delle tensioni residue e quantificazione numerica della differenza in base a diversi valori tensionali.[38]</i> . . . . .	61
3.15	<i>Diffrazione di raggi X su diversi piani cristallini.[15]</i> . . . . .	62
4.1	<i>Causa della formazione di tensioni residue mediante shot-peening e loro andamento lungo lo spessore.</i> . . . . .	64
4.2	<i>Mesh dell'impatto di un pallino e dell'impronta lasciata.</i> . . . . .	65
4.3	<i>Fasi schematiche di una prova dell'intensità di pallinatura messa a punto da Almen.</i> . . . . .	67
4.4	<i>Esempi di valutazione della forma dei dimples.[12]</i> . . . . .	70
4.5	<i>Andamento della resistenza a fatica in funzione del tempo di trattamento.[6]</i>	71
5.1	<i>Esempio di inclusioni osservate e analisi della composizione.</i> . . . . .	76
5.2	<i>Altro esempio di inclusioni e mappa delle rilevazioni di alluminio, silicio e ferro rispettivamente.</i> . . . . .	76
5.3	<i>Intaglio visto al microscopio elettronico, in sezione e sulla superficie.</i> .	77

5.4	<i>Confronto tra un intaglio visto al microscopio elettronico e il suo profilo ricavato con rugosimetro. . . . .</i>	77
5.5	<i>Schema e funzionamento del flap-peening.[1] . . . . .</i>	79
5.6	<i>Confronto tra gli effetti di flap-peening e shot-peening.[22] . . . . .</i>	79
5.7	<i>Grafici ottenuti con il diffrattometro rispettivamente in superficie e a 120 <math>\mu\text{m}</math> di profondità: si nota come nel secondo grafico la posizione dei picchi sia affetta da notevole incertezza. . . . .</i>	80
5.8	<i>Immagini a diversi ingrandimenti di una cucitura eseguita con microdurometro Vickers. . . . .</i>	81
5.9	<i>Andamento dei profili di durezza per le tre intensità di pallinatura analizzate. . . . .</i>	83
5.10	<i>Immagini di alcuni intagli dopo pallinatura, visti in sezione e dalla superficie. . . . .</i>	83
5.11	<i>Schema della macchina a disposizione per le prove di fatica su semilavorati[39] e immagine del provino estensimetrato in posizione. . . . .</i>	84
5.12	<i>Schema delle misure e del momento flettente relativi al semilavorato in prova. . . . .</i>	86
5.13	<i>Esempio dell'andamento della sollecitazione durante le prove di fatica, a 2 Hz. . . . .</i>	87
5.14	<i>Foto del semilavorato fratturato e della sezione di rottura messa in evidenza una volta separate completamente le due metà. . . . .</i>	88
5.15	<i>Immagini rispettivamente di una zona di propagazione della cricca di fatica, in cui si vedono chiaramente le linee di spiaggia, e di una zona di rottura per sovraccarico. . . . .</i>	88
5.16	<i>Immagini ingrandite della superficie di propagazione della cricca nel campione intagliato. . . . .</i>	89
5.17	<i>Immagini ingrandite della superficie di rottura del campione intagliato e pallinato. . . . .</i>	89

# Introduzione

L'alluminio e le sue leghe stanno prendendo sempre più piede nel mondo industriale, nonostante il suo impiego sia iniziato da meno di due secoli. Le sue caratteristiche meccaniche e tecnologiche abbinata alla leggerezza e alla resistenza alla corrosione lo rendono spesso preferibile all'acciaio, soprattutto in ambito meccatronico e delle movimentazioni dove l'obiettivo prefissato è quello di massimizzare il rapporto resistenza-massa dei componenti per migliorare le prestazioni dei macchinari e consentire leggi di moto più spinte. L'ottima conducibilità elettrica e termica e la sua non-tossicità ne hanno inoltre diffuso l'uso per cavi elettrici, scambiatori di calore e nel settore alimentare, specialmente nel packaging.

Il costo iniziale maggiore della produzione in alluminio viene spesso volte bilanciato dalla riduzione dei costi relativi alla manutenzione e ai trattamenti anticorrosivi. L'ottima estrudibilità, colabilità e deformabilità rendono inoltre possibile ottenere, a costi ridotti, prodotti di forma complessa, difficilmente ottenibile altrimenti. Si adatta quindi in modo eccellente alla realizzazione di strutture per esterni o di svariate tipologie di articoli casalinghi, come infissi, box doccia, lavabi e pentolame.

Il settore di maggior rilievo risulta essere tuttavia quello dei trasporti. Le sue caratteristiche di leggerezza e di resistenza meccanica e alla corrosione lo rendono essenziale in ambito aeronautico e navale e spesso preferibile anche nei trasporti terrestri, sia su gomma che su rotaia.

La progettazione di elementi in lega leggera presenta delle particolarità importanti che la differenziano da quella in acciaio, più comunemente nota. La mancata considerazione di alcuni aspetti fondamentali possono portare a grossolani errori progettuali, con conseguenze che vanno dalla riduzione delle prestazioni rispetto alle attese al prematuro cedimento dell'elemento.

La rottura di un componente meccanico è un evento improvviso che porta notevoli inconvenienti all'utente interessato, costretto ad operazioni di riparazione fuori programma e impossibilitato ad utilizzare il macchinario guasto. Ne risultano spesso lunghi fermi macchina impreveduti, eventuali ritardi nella produzione e perdite economiche complessive che possono superare di gran lunga il costo del singolo componente

da sostituire.

Va da sé che tale eventualità è da evitare con ogni mezzo possibile e il principale sistema per ridurre le possibilità che avvenga una rottura è, come detto, una progettazione attenta e impegnata, che tenga in considerazione le condizioni in cui il pezzo in esame andrà a lavorare e preveda opportuni margini di sicurezza, legati anche all'entità del danno che un'eventuale cedimento può provocare.

Tra le varie cause che possono portare a rottura, il problema della resistenza a fatica di un pezzo o di un componente meccanico è una tematica quanto mai attuale negli studi meccanici e, più in generale, nella progettazione. Si stima infatti che oltre l'80% dei cedimenti di componenti strutturali sia dovuto a questo fenomeno, che porta a rottura le parti in esame per cause apparentemente inspiegabili poiché esse possono avvenire anche con forze applicate ampiamente rientranti nel campo della deformazione elastica prevista per il materiale.

In fase di progettazione, gli aspetti da tenere in considerazione per ottenere un'adeguata vita utile del pezzo sono molteplici, poiché molteplici sono i fattori che ne influenzano il comportamento a fatica. Non è infatti sufficiente agire incrementando la sezione resistente, ma va tenuto conto, ad esempio, della geometria del pezzo, della qualità del materiale, delle condizioni ambientali in cui andrà impiegato, delle lavorazioni subite e della finitura superficiale.

Tutti questi fattori possono influire notevolmente sulla resistenza finale e nessuno di essi va trascurato; è quindi intuibile quanto possa essere delicata la fase di prototipazione e di scelta del successivo ciclo di lavorazione a cui il pezzo o il componente sarà sottoposto.

Un notevole contributo negativo, spesso erroneamente trascurato, è dato dalle tensioni residue di trazione che possono accumularsi in superficie durante le lavorazioni per asportazione di truciolo, le saldature o i trattamenti termici. Tali tensioni sono spesso tanto elevate da portare localmente a snervamento il materiale, modificandone le caratteristiche di comportamento alle diverse sollecitazioni possibili e rendendo di fatto vana tutta la progettazione fatta basandosi sui dati di resistenza da catalogo del materiale.

Mentre in passato la valutazione dello stato tensionale del materiale era possibile solo attraverso metodi di tipo distruttivo, è oggi possibile misurare le tensioni residue presenti sul pezzo attraverso sofisticati strumenti da laboratorio che sfruttano, ad esempio, la diffrazione dei raggi X e non provocano nessun danno al pezzo, permettendo quindi controlli più facili sui pezzi in produzione.

Altro aspetto molto influente è la presenza di spigoli vivi superficiali, dovuti a brusche variazioni di sezione, intagli o rugosità eccessiva, che a causa dell'effetto di

concentrazione delle tensioni diventano inneschi preferenziali di cricche.

Per limitare l'entità di queste problematiche si ricorre spesso a trattamenti specifici per la riduzione delle tensioni residue superficiali, che possono essere di tipo termico o meccanico. Uno dei più efficaci è il trattamento di pallinatura, che attraverso un getto di sfere sulla superficie del pezzo trattato porta ad una condizione di compressione le fibre superficiali, annullando di fatto le tensioni residue in trazione e opponendosi alla formazione e propagazione di cricche. In tal modo si migliora il comportamento a fatica del pezzo trattato aumentandone anche di molto la vita utile.

Lo scopo delle prove alla base di questa tesi, svolte in collaborazione con la *2Effe Engineering S.r.l.* di Soiano del Lago (BS), è quello di valutare la possibilità di sfruttare un trattamento di pallinatura per ridurre, o al meglio eliminare, gli effetti negativi che un intaglio accidentale realizzato su un componente meccanico avrebbe sulla vita a fatica dello stesso e quindi sulla sua affidabilità in esercizio, rendendo quindi possibile evitare la sostituzione preventiva del pezzo danneggiato e risparmiando sui costi e sulle tempistiche della riparazione. Le prove non verranno eseguite su provini standardizzati ma direttamente su un profilato semilavorato, in lega di alluminio. Tale soluzione viene impiegata sempre più spesso per ottenere dati direttamente sul pezzo da mettere in opera e non solamente sul materiale utilizzato.

Nel primo capitolo verranno trattate le caratteristiche e l'impiego industriale delle leghe di alluminio, spiegandone pregi e difetti e indicando i principali processi produttivi utilizzati per ottenere semilavorati. Nel secondo capitolo si entrerà nel tema della resistenza a fatica, analizzando tutti i fattori che possono influenzarla e gli strumenti a disposizione per una progettazione adeguata dei componenti; si descriveranno anche le diverse tipologie prove di fatica eseguibili in laboratorio e ci si soffermerà sui particolari del comportamento a fatica delle leghe di alluminio.

Nel terzo capitolo si analizzeranno le tensioni residue, partendo dalle cause a livello di reticolo cristallino per arrivare agli effetti macroscopici che provocano e alle tecniche di misurazione disponibili a livello industriale. Nel quarto capitolo si arriverà al cuore della prova descrivendo le basi teoriche che giustificano l'impiego della pallinatura controllata come trattamento rafforzativo e indicando i parametri a cui prestare attenzione per ottenere il risultato desiderato.

Nel quinto capitolo, infine, si passerà infine alla descrizione dei passaggi necessari allo svolgimento della prova, ripercorrendo i ragionamenti che hanno portato alla scelta dei parametri impiegati e analizzando i risultati ottenuti.





# Capitolo 1

## L'alluminio e le sue leghe

### 1.1 Proprietà dell'alluminio

L'alluminio è uno degli elementi più abbondanti sulla crosta terrestre. Circa l'8% in peso di essa è infatti costituito da questo materiale, secondo solo a ossigeno e silicio ma più abbondante di ferro o calcio. Nonostante ciò, prima del XIX secolo era considerato una rarità costosissima, poiché in natura forma facilmente sali o ossidi molto stabili da cui sembrava impossibile da isolare. Solo nel 1827, grazie a Friedrich Wöhler e Hans C. Ørsted, venne isolato per la prima volta e, qualche decennio più tardi, Karl J. Bayer mise a punto un processo elettrolitico industriale per estrarlo dalla *bauxite*, ossido d'alluminio tutt'oggi maggiormente usato per l'estrazione.

Le sue caratteristiche peculiari ne hanno da allora favorito la diffusione in moltissimi ambiti diversi e hanno portato allo sviluppo di trattamenti termici che ne migliorano notevolmente le proprietà meccaniche. La produzione mondiale di alluminio si aggira intorno alle 60 milioni di tonnellate, cifra in crescita esponenziale seppur ancora molto lontana da quella della produzione del ferro inteso come ghisa madre.

#### 1.1.1 Principali caratteristiche

L'alluminio presenta caratteristiche fisiche e tecnologiche che, nel loro insieme, lo differenziano da tutti gli altri metalli usati per scopo industriale. Le più importanti, in positivo e in negativo, sono analizzate in seguito.[57][29]

- **Leggerezza.** La sua densità, pari a  $2700 \text{ kg/m}^3$ , è circa un terzo di quella del ferro o del rame. Ciò rende possibile la produzione di componenti più leggere e lo rende ottimale per applicazioni di movimentazione dove si persegue una sempre più spinta minimizzazione delle masse in movimento.

- **Resistenza.** Allo stato puro, la tensione di rottura è di circa 85 MPa, decisamente insufficiente anche se confrontata con gli acciai più dolci. Esistono tuttavia trattamenti e particolari alliganti, descritti in dettaglio nei paragrafi seguenti, che accrescono di molto la resistenza arrivando fino a 600 MPa. L'alluminio presenta un'elevata plasticità, con un allungamento percentuale del 40% e un modulo elastico di circa 67 GPa che rimane pressoché costante anche per le leghe più resistenti.
- **Resistenza alla corrosione.** La naturale attitudine dell'alluminio a formare ossidi stabili dà vita al fenomeno della *passivazione*: il metallo esposto all'aria crea istantaneamente un film di ossido molto compatto e ben adeso, proteggendo il metallo sottostante da un'ulteriore ossidazione e dalla corrosione generalizzata senza dover ricorrere a trattamenti specifici. L'ossidazione può comunque essere forzata e controllata nello spessore attraverso un processo di *anodizzazione*.
- **Lavorabilità.** L'eccellente deformabilità e malleabilità è dovuta alla struttura cristallina cubica a facce centrate, meglio esposta nel paragrafo 3.1.1, che conferisce inoltre all'alluminio resilienza anche a basse temperature. È quindi un materiale che ben si adatta allo stampaggio, all'estrusione e alla laminazione. La buona colabilità e la bassa temperatura di fusione lo rendono anche un buon materiale da fonderia, limitandone però l'impiego ad alte temperature.
- **Resistenza all'usura.** A causa della scarsa durezza, pari a circa 20 HB, l'alluminio non presenta particolari caratteristiche di resistenza all'usura.
- **Resistenza alla fatica.** L'alluminio puro e quasi tutte le sue leghe non presentano un limite di fatica e risulta quindi impossibile una progettazione a vita infinita. La sua duttilità lo rende tuttavia meno sensibile agli intagli rispetto all'acciaio.
- **Saldabilità.** Alcune leghe sono saldabili con normali tecniche TIG e MIG, altre invece non sono saldabili. In ogni caso, la tendenza all'ossidazione impone l'utilizzo di gas inerti o particolari paste che producono gas ionizzanti a protezione del bagno di saldatura.

Altre caratteristiche degne di nota sono l'ottima conducibilità elettrica e termica, la non magneticità e non tossicità, la quasi totale riciclabilità e le qualità estetiche che le superfici possono ottenere.

### 1.1.2 Campi di impiego

La principale qualità che porta all'impiego dell'alluminio è l'elevato rapporto tra resistenza meccanica e densità, secondo solo a berillio e magnesio e paragonabile a quello del titanio che presentano però costi molto maggiori.

Risulta quindi un ottimo materiale per tutte quelle componenti in ambito mecatronico a cui sono richieste leggi di moto piuttosto spinte o in quei settori dove si ricerca una sempre maggiore efficienza energetica come nei trasporti. L'alluminio, che per applicazioni meccaniche o strutturali è impiegato sempre in lega con altri metalli, dà la possibilità di produrre strutture e telai, fissi o mobili, più leggeri a parità di resistenza e a costi non eccessivi. L'elevata malleabilità consente di ottenere profilati di forme anche complesse attraverso un'unica estrusione, come visibile in *Figura 1.1*, riducendo le lavorazioni che sarebbero necessarie nel caso dell'impiego di acciaio. Viene inoltre usato per pannelli delle carrozzerie, parti dei motori e del sistema sospensivo di auto, moto e treni. In campo aeronautico e navale tali caratteristiche sono, per ovvi motivi, addirittura irrinunciabili. L'elevata conducibilità lo rende ottimo per la realizzazione di scambiatori di calore.

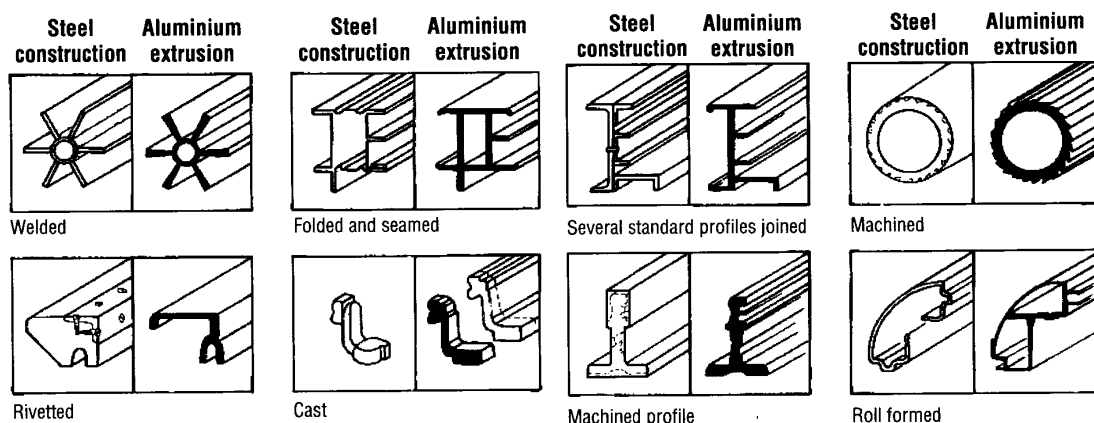


Figura 1.1: *Esempi di geometrie complesse per profilati ottenibili per estrusione e confronto con le alternative in acciaio. [23]*

La lega leggera trova largo impiego anche in ambito architettonico. Il vantaggio della leggerezza permette di creare strutture snelle e meno gravanti su supporti o fondamenta e va a sommarsi all'elevata resistenza alla corrosione ambientale, che riduce la manutenzione necessaria, e alle qualità estetiche di lucentezza. Inoltre un eventuale trattamento di anodizzazione permette non solo di incrementare lo strato di ossido protettivo ma anche di donare alla superficie una colorazione permanente senza bisogno di verniciatura. Viene perciò spesso utilizzato anche per motivi di design come rivestimento di pareti esterne o per telai di serramenti, anche se in termini di isolamento termico non ne sarebbe adatto.

La resilienza mantenuta anche a basse temperature e la resistenza a corrosione lo rendono applicabile anche per serbatoi o tubi criogenici e in pressione.

Altri impieghi che esulano dallo scopo di questa tesi sono comunque interessanti e degni di nota. A parità di peso, l'alluminio risulta avere conducibilità elettrica doppia rispetto al rame e questo, unito al costo inferiore, lo rende preferibile nella realizzazione di grandi elettrodotti o costruzioni elettriche di basso peso.

La possibilità di laminazione in fogli sottilissimi e la sua non tossicità lo rendono ampiamente usato in ambito alimentare per barattolame, pentole e confezionamento. La sua lucentezza ne permette l'impiego anche per specchi e riflettori.

Interessante è poi l'impiego dell'ossido di alluminio. Mentre nelle forme più pure da vita a rubini e zaffiri da gioielleria, la forma più comune, il *corindone*, è largamente impiegata come materiale abrasivo grazie all'eccezionale durezza e resistenza all'usura. Il processo di ossidazione dell'alluminio puro, infine, è una reazione fortemente esotermica e permette una tecnica di saldatura dell'acciaio, detta *alluminotermica*, ampiamente usata ad esempio per la giunzione di tronconi di rotaie in campo aperto, dove non sono disponibili altre fonti di energia sufficienti.

### 1.1.3 Rafforzamento per incrudimento

Le caratteristiche meccaniche dell'alluminio puro, come detto nel paragrafo 1.1.1, non sono certamente sufficienti per larga parte delle applicazioni; è tuttavia possibile migliorarle notevolmente attraverso un processo di incrudimento del materiale.

Tale trattamento prevede una serie di deformazioni plastiche a freddo dei semilavorati che possono essere applicate appositamente per aumentarne le proprietà o possono avvenire in fase di produzione, nel caso di laminazione, estrusione o trafilatura, o di messa in opera attraverso piegatura, imbutitura, martellatura.

L'effetto dell'incrudimento è dovuto al moltiplicarsi dei difetti all'interno del reticolo cristallino che, al sopraggiungere di una forza esterna, vanno a interferire tra loro bloccandosi a vicenda e aumentando la resistenza meccanica e la durezza. Tale meccanismo è esposto più nel dettaglio nel paragrafo 3.1.7.

Le lavorazioni per deformazione plastica provocano un allungamento dei grani nella direzione di lavorazione come riportato in *Figura 1.2* e danno luogo a comportamenti meccanici anisotropi, ovvero diversi in funzione della direzione per cui agiscono le forze esterne. Si creano inoltre stati di tensione dei reticoli che ne riducono notevolmente la deformabilità residua e possono localmente portare all'innescio di cricche.

Spesso l'incrudimento ottenuto con tali lavorazioni è eccessivo rispetto a quello desiderato; si ricorre quindi a opportuni trattamenti termici, esposti nel paragrafo 1.2.2, per distendere il reticolo e recuperare parte della deformabilità.

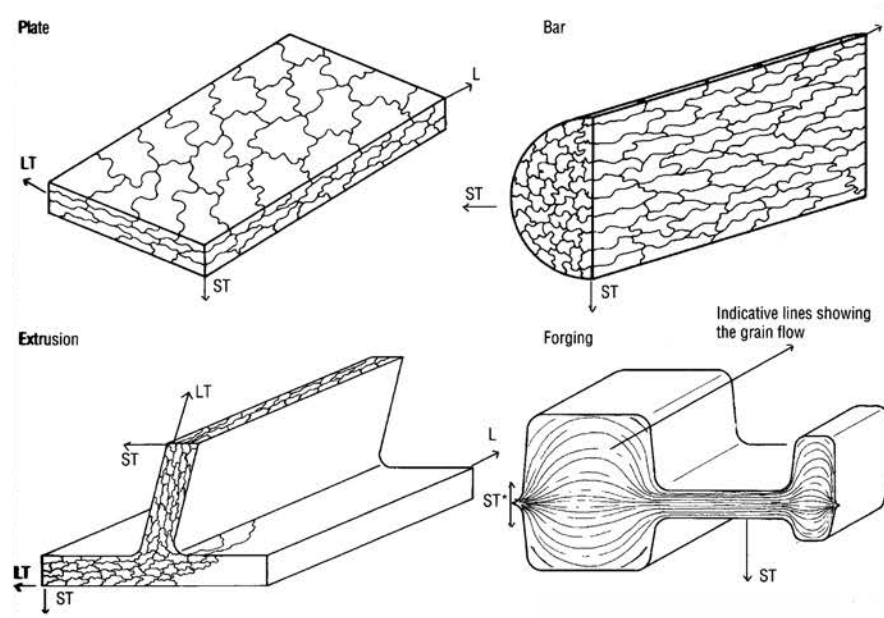


Figura 1.2: *Effetto delle lavorazioni sulla direzione dei grani.*[23]

## 1.2 Le leghe leggere

Quando utilizzato per motivi strutturali, l'alluminio è sempre impiegato in lega con altri metalli allo scopo di conferirgli particolari caratteristiche. In effetti, il comportamento meccanico dell'alluminio risulta essere più sensibile dell'acciaio alla presenza di alliganti ed essi, in base alla loro natura, possono modificarne in modo anche notevole svariati parametri fisici o tecnologici.

Un motivo dell'affermazione dell'alluminio come materiale per costruzioni meccaniche è proprio l'ampia gamma di qualità differenti che si possono raggiungere semplicemente aggiungendo dei materiali in lega, o variandone le quantità. Un ruolo importante è ricoperto poi dai trattamenti termici, che molto spesso vengono sfruttati per affinarne ulteriormente le proprietà.

### 1.2.1 Proprietà degli alliganti

Gli elementi che industrialmente vengono utilizzati in lega con l'alluminio sono molteplici, ciascuno allo scopo di migliorare determinate caratteristiche. In base all'affinità chimica, con alcuni elementi, soprattutto altri metalli, l'alluminio forma

composti intermetallici con qualità che possono essere differenti rispetto a quelle base di ciascuno dei due elementi; con altri, come ad esempio il silicio, non si formano particolari combinazioni e le fasi restano separate.

I principali elementi impiegati e le caratteristiche che portano alle leghe di alluminio sono descritti in seguito.[29][8]

**Rame.** Nelle leghe di alluminio, può arrivare fino al 12%. All'aumentare della percentuale di rame, si innalza la resistenza meccanica a freddo e a caldo a scapito però della deformabilità. Si ottiene inoltre buona lavorabilità all'utensile e si migliora la risposta ai trattamenti termici. Il composto intermetallico che si forma,  $CuAl_2$ , va a ridurre la resistenza a corrosione in proporzione alla sua presenza nella lega.

**Silicio.** Viene impiegato per aumentare la colabilità dell'alluminio. Con una percentuale del 13% colabilità, ritiro, compattezza e resilienza a caldo sono migliori di qualsiasi altra lega. Porta inoltre buona resistenza alla corrosione, riduce la densità della lega e ne aumenta la saldabilità. Al contrario, peggiora la lavorabilità all'utensile a causa di piccoli cristalli di silicio durissimi che rovinano rapidamente il tagliente dell'utensile. Migliora tuttavia la durezza e la resistenza all'usura. La forma dei cristalli di silicio va ad influenzare notevolmente tenacità e duttilità.

**Magnesio.** Aumenta notevolmente la resistenza a corrosione, soprattutto in ambiente marino o alcalino. Oltre l'8% conferisce alla lega buone caratteristiche meccaniche dopo trattamento termico di bonifica. Migliora inoltre la lavorabilità all'utensile. In bagno di fusione è facilmente ossidabile per cui vanno prese opportune precauzioni.

**Zinco.** Migliora la colabilità e la lavorabilità alle macchine utensili. Conferisce inoltre alla lega un ritiro piuttosto lineare. Causa tuttavia fragilità a caldo. Associato al magnesio, dà vita a leghe ad altissima resistenza e con caratteristiche autotemperanti.

**Nichel.** Viene impiegato per migliorare la durezza e la resistenza alle alte temperature della lega, riducendo inoltre il coefficiente di dilatazione termica.

**Litio.** Usato soprattutto in ambito aeronautico per ottenere leghe più leggere a parità di resistenza, presenta un costo piuttosto elevato.

**Manganese.** Viene spesso utilizzato come correttivo migliorando le qualità meccaniche e la malleabilità delle leghe. Le leghe contenenti solo manganese sono invece particolarmente sensibili all'ingrossamento del grano durante i trattamenti termici.

**Stagno.** Migliora la risposta ai trattamenti termici e, fino al 6%, viene usato in particolari leghe antifrizione caratterizzate da un ridottissimo coefficiente d'attrito.

**Cromo.** Aggiunto in tracce, inibisce la crescita del grano affinando la struttura cristallina, migliora la tenacità e la resistenza a corrosione.

**Berillio.** Viene aggiunto in piccole quantità per ridurre l'ossidazione alle alte temperature, ottenendo anche un miglioramento delle proprietà meccaniche.

**Cadmio.** Piccole aggiunte di cadmio nelle leghe trattabili termicamente velocizzano il processo di invecchiamento, esposto nel paragrafo 1.2.2, e ne migliorano la lavorabilità. Percentuali maggiori vengono considerate indesiderate.

**Ferro.** Solitamente considerato un metallo indesiderato per la ridotta resistenza alla corrosione, può tuttavia essere usato in leghe per deformazione plastica per affinare i cristalli e aumentare la resistenza ad alta temperatura.

Altri elementi come boro, stronzio, zirconio, titanio, calcio, sodio, fosforo e antimonio possono essere aggiunti in tracce per controllare la struttura cristallina dell'alluminio o per regolare la forma dei cristalli di silicio. Bismuto e piombo vengono impiegati per migliorare la lavorabilità per asportazione di truciolo. Leghe contenenti argento o scandio presentano ottime proprietà meccaniche, ma gli elevati costi di tali elementi ne limitano l'utilizzo ad impieghi molto particolari.

### 1.2.2 Trattamenti termici

Aspetto molto importante di alcune leghe di alluminio è la capacità di migliorare anche di molto la resistenza meccanica dopo opportuni trattamenti termici. I diagrammi di stato di queste leghe hanno in comune infatti la riduzione della solubilità dell'alligante principale nella matrice di alluminio al calare della temperatura. Ciò provoca la formazione di precipitati coerenti nella soluzione sovrassatura di partenza, osservabili solo attraverso il microscopio elettronico.

Se il raffreddamento avviene troppo lentamente, la struttura che si ottiene ha scarsa resistenza meccanica poiché l'alluminio conterrà poco alligante in soluzione

solida e si formeranno particelle grossolane del composto intermetallico. Viceversa, se la lega è raffreddata velocemente, l'alligante non ha tempo di diffondere e rimane disciolto nell'alluminio. La soluzione così ottenuta rimane sovrassatura anche a temperatura ambiente e risulta essere più dura e resistente, ma anche più duttile, per l'assenza di particelle grossolane di precipitato. Il trattamento che porta la lega di alluminio in questa condizione è detta tempra di solubilizzazione ed è applicabile a tutte le leghe leggere che tendono a formare precipitati.

La struttura sovrassatura, tuttavia, non è stabile a temperatura ambiente e tende a modificarsi lentamente, con la soluzione solida che espelle gli atomi in eccesso dell'elemento alligante attraversando degli stadi intermedi, schematizzati in *Figura 1.3*. All'aumentare della temperatura, migliora la mobilità degli atomi e il processo viene accelerato.

Il primo stadio consiste nella formazione di addensamenti degli atomi di alligante nel reticolo cubico a facce centrate dell'alluminio. Tali addensamenti non possiedono un reticolo cristallino proprio e sono coerenti con la matrice; inducono tuttavia una certa distorsione elastica a causa della differenza di dimensioni tra atomi della matrice e del soluto. Per ridurre gli sforzi interni causati, tali raggruppamenti tendono ad assumere forme appiattite e allungate.

Con il passare del tempo, gli addensamenti crescono e si passa al secondo stadio quando essi assumono un proprio reticolo cristallino diventando un vero e proprio precipitato. Essi sono ancora coerenti con la matrice ma ne causano un'importante distorsione elastica (vedi paragrafo 3.1.4).

Infine, al terzo stadio, le particelle di precipitato assumono dimensioni tali che la matrice non riesce più ad assorbire le distorsioni elasticamente e dà luogo a dislocazioni e a un'interfaccia semicoerente. Si sono quindi ottenuti i nuclei di cristallizzazione del precipitato che, prolungando il trattamento, s'ingrossano ulteriormente tornando alla situazione che precedeva la tempra di solubilizzazione.[19]

Per ottenere le migliori caratteristiche meccaniche è quindi opportuno controllare temperatura e durata in modo da arrestare il processo di diffusione al secondo o al massimo al terzo stadio, prima di ottenere del precipitato incoerente; i valori ottimali di tali parametri variano tuttavia in base alla composizione della lega. La presenza dei precipitati coerenti o semicoerenti va ad ostacolare il movimento delle dislocazioni e quindi a rafforzare il materiale, secondo il meccanismo che verrà esposto nel paragrafo 3.1.3. A titolo di esempio, si riporta in *Figura 1.4* un grafico che mostra l'andamento della resistenza meccanica in funzione di temperatura e durata del trattamento. Il trattamento termico in questione è detto invecchiamento artificiale ed è applicabile solo per alcune tipologie di leghe.



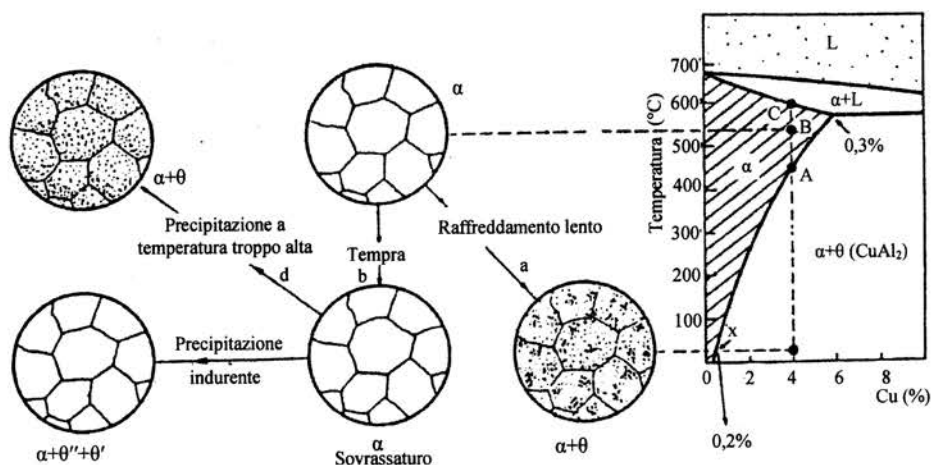


Figura 1.3: Risultati di raffreddamenti a velocità diverse in una lega AlCu.[19]

Il processo di indurimento per precipitazione è quindi composto da un trattamento di tempra di solubilizzazione e successivo invecchiamento. Esiste inoltre una forma di invecchiamento associata ad un incrudimento meccanico eseguito immediatamente dopo la tempra; si parla in questo caso di trattamento termomeccanico. Le leghe che possono essere sottoposte efficacemente a invecchiamento sono quelle nella forma  $AlCuMg$ ,  $AlMgSi$ ,  $AlZnMg$  e  $AlZnMgCu$ . [23]

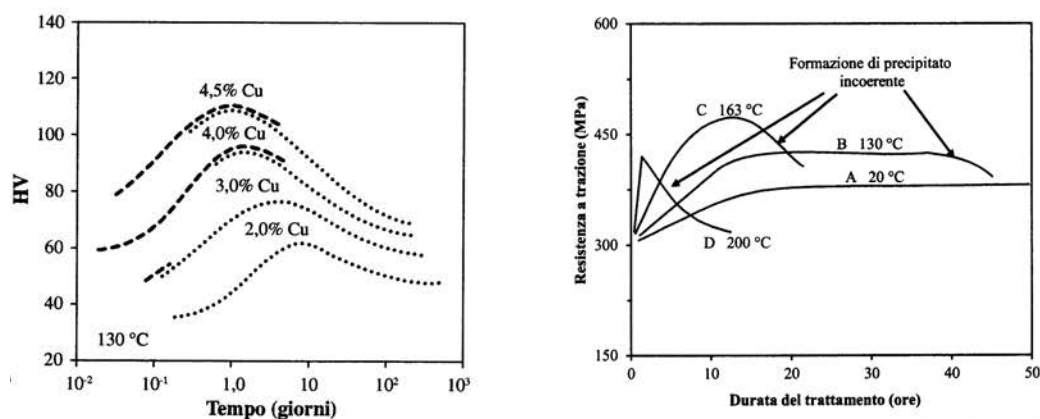


Figura 1.4: Andamento della durezza nel tempo con invecchiamento a  $190^{\circ}C$  e della resistenza meccanica in funzione di temperatura e durata del trattamento.[19]

Altro trattamento termico spesso impiegato è la ricottura, che può avere diversi scopi tra cui l'omogeneizzazione o l'eterogeneizzazione della struttura della lega, la ricristallizzazione e la distensione delle tensioni dopo incrudimento a freddo o la stabilizzazione dimensionale di pezzi che lavoreranno a caldo e subirebbero deformazioni permanenti a causa del detensionamento. Le differenze di processo tra le

varie ricotture riguardano principalmente le temperature raggiunte e la velocità di riscaldamento e raffreddamento, oltre allo stato della lega prima del trattamento.

In generale, la ricottura viene impiegata per migliorare la duttilità e la lavorabilità per deformazione plastica e viene quindi effettuata prima di processi di estrusione, stampaggio o laminazione, oppure in seguito ad essi per ridurre lo stato di incrudimento del materiale. Eliminando i composti fragili costituiti dai precipitati, che potrebbero favorire l'insacco di cricche, si migliora anche la resistenza a fatica e a tensocorrosione. Si ottiene tuttavia un materiale di consistenza pastosa più difficile da lavorare alle macchine utensili.[29]

### 1.2.3 Designazione leghe commerciali

Il sistema di designazione comunemente utilizzato e promosso dal CEN, *Comitato Europeo di Normazione*, suddivide le tipologie di leghe in base ai principali elementi alliganti contenuti e presenta lievi differenze tra leghe per deformazione plastica e leghe da fonderia. Nel primo caso a ciascuna lega viene assegnato un codice a quattro cifre delle quali la prima indica la classe di appartenenza, la seconda esprime uno scostamento dalla lega originaria e le ultime due cifre identificano una particolare lega all'interno della classe. La numerazione è seguita da caratteri alfanumerici che ne indicano i trattamenti termo-meccanici a cui è stata sottoposta ed è preceduta dalla lettera *W* che ne indica l'utilizzo per deformazione plastica. Per le leghe da fonderia sono previste invece cinque cifre precedute dalla lettera *B* o *C* per indicare rispettivamente l'uso per lingotti o getti. Va tuttavia ricordato che raramente le leghe di alluminio sono binarie, ma solitamente contengono diversi altri elementi in percentuali minori. Le classi di suddivisione delle diverse leghe sono le seguenti.

- *Gruppo 1000*: individua l'alluminio puro almeno al 99%. Permette trattamenti di incrudimento a freddo per migliorarne le proprietà meccaniche a scapito della duttilità. È impiegato in ambiti dove non è richiesta particolare resistenza meccanica ma viene sfruttato per la resistenza a corrosione o la conducibilità termica o elettrica.
- *Gruppo 2000*: sono note industrialmente come *Duralluminio* o leghe *Avional*, nome che ne rivela lo scopo prevalentemente aeronautico. Hanno il rame come principale alligante e possono essere indurite attraverso precipitazione arrivando a proprietà simili a quelle degli acciai dolci e mantenendole fino a circa 150 °C. Presentano scarsa resistenza alla corrosione e per questo si ricorre spesso a rivestimenti con alluminio puro o con altre leghe. Alcune leghe di tale famiglia possono essere facilmente lavorate con le macchine utensili.

- *Gruppo 3000*: prevedono il manganese come principale elemento in lega, anche se in percentuale massima dell'1,5% a causa della bassa solubilità nell'alluminio. Vengono usate dove non è richiesta elevata resistenza, come per scambiatori di calore, utensileria da cucina, scatolame. Con l'aggiunta di magnesio, le caratteristiche di resistenza meccanica e alla corrosione migliorano e trova impiego anche per recipienti e tubi in pressione.
- *Gruppo 4000*: sono leghe contenenti silicio fino al 20%, utilizzate soprattutto in fonderia grazie all'elevata colabilità. Permette di ottenere getti di forma complessa e buona resistenza a corrosione e usura.
- *Gruppo 5000*: comprende le leghe contenenti principalmente magnesio, note con il nome commerciale di *Peraluman*. Tali leghe presentano elevata resistenza meccanica e alla corrosione e buona lavorabilità. Quasi sempre oltre al magnesio sono presenti altri elementi in lega come cromo, manganese e titanio. Spesso vengono eseguiti trattamenti termici particolari per ridurre i precipitati a bordo grano che possono provocare una riduzione della resistenza a fatica. Le proprietà meccaniche possono essere migliorate con trattamenti di incrudimento a freddo, ma non attraverso invecchiamento. Vengono utilizzate per componenti sottoposte ad ambienti corrosivi, soprattutto in ambito navale, o per serbatoi per carburante. Inoltre, la lucentezza e il livello di finitura ottenibile con alcune leghe della famiglia le rende ottime per la produzione di pannelli per carrozzerie automobilistiche.
- *Gruppo 6000*: hanno come principali alliganti il silicio e il magnesio e sono più comunemente note come leghe *Anticorodal*. Solitamente subiscono un trattamento di solubilizzazione e possono essere indurite per precipitazione dell'intermetallo  $Mg_2Si$ , ottenendo buone caratteristiche meccaniche ma inferiori rispetto alle leghe dei gruppi 2000 e 7000. L'elevata lavorabilità, estrudibilità, saldabilità e resistenza a corrosione le rende comunque ampiamente utilizzate per usi navali, ferroviari e negli infissi. Aggiungendo piccole quantità di rame, si ottiene un ulteriore incremento delle caratteristiche meccaniche.
- *Gruppo 7000*: sono leghe contenenti zinco e magnesio e sono chiamate industrialmente leghe *Ergal*. Raggiungono le migliori caratteristiche meccaniche tra le leghe di alluminio, fino a 650 MPa, avvicinandosi alla resistenza degli acciai da costruzione di qualità. Sono quindi ampiamente impiegate nel settore aerospaziale e per applicazioni strutturali di forza. Nel gruppo si distinguono le leghe che contengono o non contengono rame. Le prime hanno

le migliori caratteristiche meccaniche ma non sono saldabili, le seconde hanno invece notevole potere autotemperante che le rende adatte per telai saldati e per l'estrusione. Nelle leghe contenenti rame si è risolto l'iniziale problema di ridotta resistenza alla tensocorrosione aggiungendo del cromo in tracce e sfruttando particolari trattamenti termici. Le caratteristiche meccaniche migliori si ottengono in seguito ad un trattamento di invecchiamento, che può essere monostadio o bistadio a seconda degli utilizzi previsti.

- *Gruppo 8000*: comprende leghe di tipo misto, con composizioni che dipendono dagli ambiti di utilizzo di ciascuna lega. Tra gli alliganti più noti si possono citare le leghe al litio che presentano elevata resistenza e tenacia e vengono impiegate in ambito aeronautico per la loro leggerezza, le leghe allo stagno, usate nella produzione di cuscinetti, e le leghe nichel-ferro usate in applicazioni che sfruttano l'energia atomica.
- *Gruppo 9000*: raggruppa leghe di tipo sperimentale e non utilizzate a livello industriale.

Le leghe vengono anche distinte in base ai trattamenti termici a cui sono state sottoposte, indicati da opportuni caratteri alfanumerici. Le simbologie utilizzate variano da nazione a nazione, ma è sempre più di comune utilizzo la designazione unificata ANSI che distingue con delle lettere le leghe grezze (*F*), ricotte (*O*), incrudite a freddo (*H*), solubilizzate e invecchiate a temperatura ambiente (*W*) o trattate termicamente (*T*). Queste ultime sono poi seguite da una o più cifre che indicano i diversi trattamenti applicati e le modalità di esecuzione. Anche le leghe incrudite vengono distinte con dei numeri in base al grado di incrudimento e di ricottura parziale eventuale.

### 1.3 Principali processi di produzione di semilavorati

Nonostante la vasta gamma di applicazioni elencate nel paragrafo 1.1.2, la maggior parte dell'alluminio lavorato industrialmente va a costituire semilavorati grezzi, necessari per produrre in seguito i pezzi finiti. Le modalità per ottenere tali componenti sono del tutto simili a quelle utilizzate per la lavorazione dell'acciaio, anche se alcune differenze nei processi o nelle attrezzature sono necessarie per far fronte alle diverse caratteristiche tecnologiche delle leghe leggere.

Sebbene le tecniche applicabili siano numerose, alcune vengono maggiormente utilizzate per la loro semplicità ed economicità o per i particolari risultati che si riescono ad ottenere. In seguito, verranno esposte le tecniche principalmente impiegate

per la produzione di semilavorati, tralasciando quindi i processi di produzione dei pezzi finiti riguardanti la lavorazione su macchine utensili e la formatura di lamiera.

### 1.3.1 Estrusione

L'estrusione è un processo di produzione industriale di semilavorati attraverso deformazione plastica, a freddo o a temperatura conveniente, di un massello metallico che viene fatto passare per compressione attraverso un foro opportunamente sagomato, assumendone la forma. La forma della matrice di estrusione è spesso circolare, con diametro che può raggiungere gli 800 mm, mentre i pezzi estrusi possono avere diverse sezioni, tra cui molte non realizzabili con altri procedimenti, e arrivare a lunghezze di 4000 mm. La velocità di estrusione è di  $10 \div 200$  mm/s a seconda del tipo di materiale e della temperatura scelta, che per le leghe leggere è compresa tra  $370 \div 530$  °C mentre per l'alluminio puro è possibile anche l'estrusione a temperatura ambiente.[31]

Il sistema di estrusione, schematizzato in *Figura 1.5*, è composto da una pressa, tipicamente meccanica fino a 5 MN o idraulica fino a 150 MN, dotata di un pistone che andrà a pressare il massello di alluminio contro la matrice, che verrà tenuta in posizione da un portamatrice montato su una slitta per permetterne lo spostamento. Il contenitore del massello metallico, invece, presenta una camicia montata a caldo e delle resistenze per mantenere il massello alla temperatura desiderata durante tutta la lavorazione. L'avanzamento del pistone deve essere fermato con sufficiente anticipo in modo che non entri in collisione con la matrice e solitamente presenta all'estremità un blocco rimovibile, detto *dummy block*, che può essere facilmente sostituito e protegge il pistone vero e proprio dall'usura. La parte finale del massello metallico rimarrà necessariamente bloccata all'interno dello spessore della matrice. Si sfrutta quindi una lama che trancia l'estruso in prossimità della matrice e si scarnerà l'ultimo tronchetto del massello rimasto nel contenitore.

Si possono distinguere tre tipi di estrusione: l'estrusione diretta, dove il pistone spinge il massello contro la matrice, l'estrusione diretta con foro mandrino, nel quale il pistone è composto da due parti concentriche e quella interna ha possibilità di avanzare anticipatamente e oltre alla matrice creando quindi semilavorati cavi, e l'estrusione inversa, dove è la matrice ad avanzare all'interno del massello evitando il problema dell'attrito tra massello e camicia. Esiste inoltre la possibilità di un'estrusione idrostatica, dove il pistone non viene a contatto direttamente con il massello ma vi è un liquido in pressione interposto che forzerà il massello su tutte le pareti. Con questa tecnica si hanno i vantaggi di evitare nuovamente l'attrito con la camicia ma anche l'usura del pistone e di poter utilizzare per intero il massello.

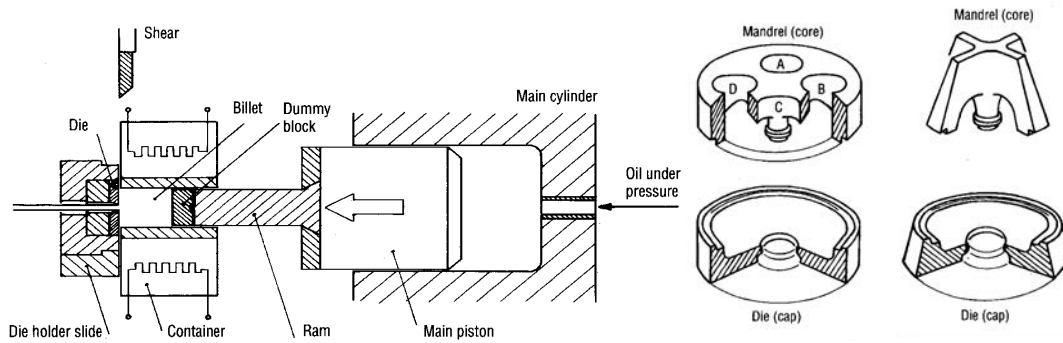


Figura 1.5: *Schema di una pressa per estrusione e di matrici a oblò e a ragno.*[23]

Anche le matrici si distinguono in tre categorie in base alla forma che dovrà avere il semilavorato: piana per sezioni piene o aperte, a oblò (*porthole*) o a ragno (*spider*) per produrre sezioni cave. In queste ultime si producono diversi filoni, corrispondenti ai fori del mandrino interno, che si risaldano successivamente per le elevatissime pressioni nella camera composta dall'ago centrale del mandrino e la matrice esterna.

In base all'estrudibilità del materiale, lo scorrimento del metallo attraverso la matrice può avvenire in modo diverso, con zone morte di varie dimensioni. Nel caso di buona estrudibilità il flusso delle fibre metalliche fa sì che il materiale che costituiva le pareti del massello si trovi nuovamente sulle pareti dell'estruso e debba essere sottoposto a pelatura perché solitamente ricco di difetti; in questo caso l'attrito di lavorazione è basso e la zona morta residua di ridotte dimensioni. Quando l'estrudibilità non è buona, si forma una zona di deformazione a forma di imbuto, come riportato in *Figura 1.6* e la parete del massello si accumula ai lati del contenitore andando quindi a formare la parte finale dell'estruso. È quindi necessario evitare ciò prevedendo una zona morta di dimensioni superiori. La differenza tra i due comportamenti si ritrova anche nella forma dei grani che risulteranno più allungati lungo la direzione di estrusione nel caso di minor estrudibilità.

Il processo di estrusione provoca incrudimento del materiale migliorandone la resistenza meccanica a scapito però di una minore deformabilità residua. Si introducono inoltre tensioni residue causate dalla maggior facilità di efflusso delle fibre centrali, che tenderebbero ad essere più lunghe di quelle esterne. Ciò porta in compressione il materiale centrale e in tensione quello superficiale, con lo sforzo in direzione concorde al verso di estrusione; nel caso di sezioni non simmetriche rispetto al centro, questa differenza può portare anche ad un incurvamento indesiderato della barra estrusa, per cui è necessario adottare particolari precauzioni.

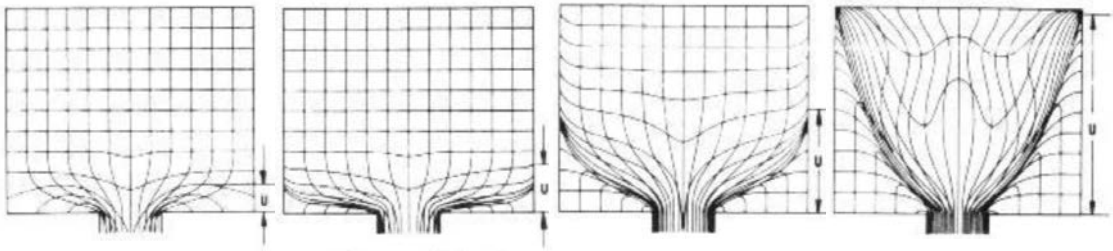


Figura 1.6: Esempi di diverso comportamento del materiale durante l'estrusione.[46]

### 1.3.2 Laminazione

La laminazione prevede il passaggio del semilavorato di partenza attraverso dei rulli allo scopo di ottenere una diminuzione di sezione ed eventualmente una sagomatura. Attraverso tale processo si possono ottenere travi di profilo vario, tubi senza saldatura (metodo di *Mannesmann*) e lamiere o fogli di diverso spessore; nel caso delle leghe leggere è diffuso solamente per quest'ultimo scopo, poiché travi e tubi possono essere prodotti facilmente per estrusione.

La lavorazione per laminazione, in generale, si distingue in base alla temperatura del laminato, a caldo o a freddo, e alla direzione dell'asse dei rulli. La laminazione a caldo consente di ottenere deformazione maggiore con ridotto incrudimento ma è soggetta a ritiro con conseguenti deformazioni; quella a freddo va maggiormente ad incrudire il materiale e richiede maggior dispendio energetico, ma permette di ottenere pezzi più precisi e rifiniti. Per quanto riguarda l'asse dei rulli rispetto a quello del pezzo, esso è longitudinale nella produzione di lamiere e di travi e trasversale per la formatura anelli, tubi, alberi con diverse variazioni di sezioni, barre filettate e sfere. Talvolta il processo di laminazione può venir confuso con quello di profilatura, dove ad essere lavorate sono invece lamiere che vengono piegate con dei rulli sagomati per creare barre profilate.

Solitamente il processo si compone di più passaggi successivi attraverso dei rulli che man mano si avvicinano alla forma o allo spessore finale che dovrà avere il semilavorato. Per unire i vantaggi dei due, è possibile sfruttare la laminazione a caldo per i primi passaggi e a freddo per quelli finali. Per ridurre la possibilità che il pezzo laminato contenga difetti, la superficie della lastra iniziale viene solitamente asportata prima della lavorazione. Nel caso della produzione di fogli sottili, il semilavorato viene spesso avvolto in bobine subito dopo la laminazione.

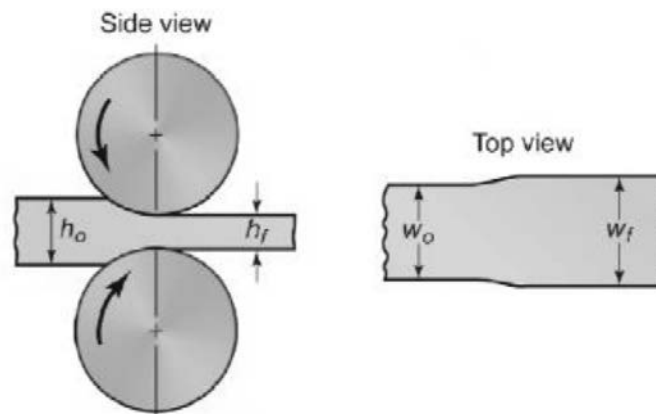


Figura 1.7: *Processo di laminazione di lamiera.*

### 1.3.3 Forgiatura

È probabilmente la tecnica di lavorazione più conosciuta e consiste nella deformazione plastica del semilavorato a caldo, in modo da conferirgli la forma desiderata. Si distinguono le operazioni di fucinatura, eseguite sagomando il pezzo a mano con mazza e incudine o attraverso un maglio senza l'ausilio di stampi, e lo stampaggio che prevede appunto l'utilizzo di una matrice montata su una pressa che riporta in negativo la forma desiderata e entro la quale verrà forzato il pezzo.

La forgiatura dona al pezzo un'elevata combinazione di resistenza meccanica e durezza poiché il materiale viene incrudito e, evitando l'asportazione di truciolo, le fibre metalliche non vengono interrotte ma si deformano ricalcando la sagoma del pezzo forgiato. Per deformazioni minori, è possibile anche lo stampaggio a freddo che riduce le problematiche di deformazione durante il raffreddamento e permette una miglior finitura superficiale.

Spesso si indica erroneamente come stampaggio anche il complesso di deformazione plastica e taglio eseguito su lamiera che in realtà si distingue nelle lavorazioni di imbutitura, trancitura, punzonatura, piegatura.[31]

### 1.3.4 Processi di fonderia

Nei processi di fonderia il metallo fuso viene colato in apposite forme contenenti una cavità dove il metallo solidifica secondo il profilo desiderato. Gli stampi possono essere permanenti o transitori in base alla possibilità di poterli riutilizzare. Si distinguono quindi gli stampi in terra ottenuti per sagomatura o a cera persa che vengono distrutti dopo la solidificazione del metallo per recuperare il pezzo e le conchiglie che possono essere aperte e riutilizzate dopo la colata.



Con il processo di colata si possono ottenere pezzi di forme particolari e non ottenibili altrimenti. Si ha tuttavia il problema della scarsa finitura superficiale e della necessità di controllare il ritiro del metallo durante il raffreddamento. Per evitare deformazioni, esistono delle regole di progettazione che sconsigliano alcuni particolari come giunzioni a croce, angoli acuti e variazioni di spessore. Anche la progettazione dello stampo e il posizionamento del canale di colata è da studiare attentamente per assicurarsi che il metallo fuso riempia completamente lo stampo.

Dopo il recupero del pezzo solidificato, il canale di colata va eliminato con apposite lavorazioni e il pezzo viene solitamente sabbiato e sbavato per togliere eventuali incrostazioni provenienti dallo stampo e migliorare la finitura superficiale.

Alcune tecniche di fonderia più innovative sono la colata in conchiglia rotante, o colata centrifuga, che permette di ottenere pezzi cavi senza l'ausilio di anime, e la pressofusione, riportata in *Figura 1.8*, che mettendo in pressione il metallo fuso all'interno dello stampo permette di ottenere con precisione forme più complesse e con miglior finitura superficiale.

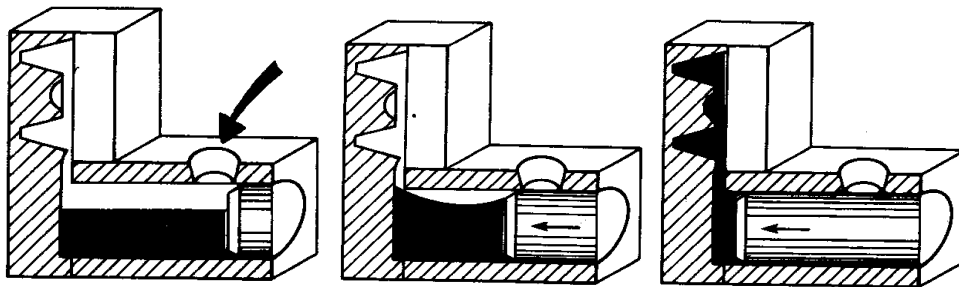


Figura 1.8: *Fasi di un processo di colata in conchiglia a pressione.*[31]

È da citare infine il processo di colata continua che permette di ottenere semilavorati grazie alla colata per gravità di un flusso continuo di metallo all'interno di una lingottiera continua. Durante la solidificazione il semilavorato percorre un'ampia curva che lo riporta in orizzontale e viene tagliato in spezzoni della misura desiderata attraverso fiamma ossidrica oppure, nel caso ideale, immesso direttamente in un impianto di laminazione per la sagomatura.



# Capitolo 2

## La resistenza a fatica meccanica

### 2.1 Resistenza a fatica ad alto numero di cicli

Un oggetto metallico può rompersi per diverse cause, tra cui l'eccessiva sollecitazione statica, sforzi dinamici impulsivi (urti), corrosione, usura, scorrimento viscoso, fatica o combinazioni di essi.[32]

Tra questi, la fatica è forse quella di più difficile comprensione, poiché può avvenire per sollecitazioni che se applicate una sola volta risulterebbero del tutto innocue, essendo ben al di sotto del limite di deformazione elastica. I problemi si presentano infatti dopo un numero sufficientemente elevato di cicli, quando il pezzo ha superato indenne l'eventuale fase di rodaggio e viene considerato nel pieno della sua operatività. Inoltre, due pezzi apparentemente identici possono presentare una durata della vita utile notevolmente diversa e non conoscibile a priori, portando a ulteriore incertezza in fase di progettazione o di test. La rottura, infine, non porta nessun tipo di preavviso evidente e può risultare quindi del tutto inaspettata.

Il motivo dell'elevatissimo numero di studi svolti sull'argomento è quindi facilmente intuibile e ne sottolinea nuovamente la massima importanza nell'ambito meccanico.

#### 2.1.1 Cenni storici

Fino ai primi anni dell'Ottocento, la fatica era una modalità di rottura pressoché sconosciuta. Fino a quel momento, il problema della caratterizzazione del comportamento dei materiali era certamente stato posto, con il tentativo di identificare quali condizioni potessero comportare rotture; tuttavia, i cedimenti venivano spesso associati ad eccessive sollecitazioni o a carenze intrinseche dei materiali, della progettazione o della realizzazione.

Il primo approccio scientifico allo studio della resistenza dei materiali si ritrova nel XVI secolo con studi paralleli di Galileo Galilei e Leonardo da Vinci che, seppur con i metodi primitivi e le importanti carenze tecniche dell'epoca, effettuano prove di trazione sui materiali da costruzione allora più comuni e catalogano le loro resistenze anche in base alla loro natura, individuando come responsabile della resistenza le diverse strutture interne di ciascuno, ovvero:

*"quel glutine, che si tenacemente ritien congiunte le parti de i solidi, che pur finalmente sono dissolubili: cognizione che pur anco è necessaria per intender la coerenza delle parti de gli stessi filamenti, de i quali alcuni de i solidi son composti."*[13]

Viene intuito inoltre come nei metalli la resistenza di tale struttura sia influenzata dal processo di solidificazione degli stessi e come sia necessario andare a studiare la resistenza locale del materiale piuttosto che quella del manufatto nel suo insieme.

Nei secoli successivi, grazie agli studi di Robert Hooke e Augustin Cauchy, si arriva ad una trattazione moderna basata su tensioni e deformazioni applicate ad un mezzo continuo. È tuttavia solo con l'avvento della rivoluzione industriale che emerge l'insufficienza di una caratterizzazione statica del materiale, a causa del loro impiego in condizioni sempre più gravose e il verificarsi di catastrofici incidenti, soprattutto in ambito ferroviario.[24]

Nel 1829 Wilhelm A.J. Albert notò una correlazione tra la rottura di catene per il sollevamento minerario e il numero di volte in cui esse venivano impiegate, escludendo la presenza di sovraccarichi improvvisi e utilizzando il termine *fatica* associato ad una rottura dovuta ad uno "stancamento" del materiale in seguito a carichi non elevati ma ripetuti in continuazione. Qualche decennio dopo, William J.M. Rankine riconosce l'inesco e la propagazione di cricche come causa della rottura per fatica degli assili ferroviari.

Fu solo grazie ad August Wöhler che si arrivò ad un vero e proprio modello, seppur ancora incompleto, per lo studio dei fenomeni di fatica. Tra il 1854 e il 1869 affrontò in modo sistematico e sperimentale lo studio della fatica sugli assili ferroviari, arrivando a costruire il fondamentale diagramma sollecitazione-cicli che a lui deve il nome.

L'approccio venne negli anni completato con l'aggiunta degli studi sull'accumulo del danneggiamento di Miner e il concetto del fattore di intensificazione degli sforzi di Irwin negli anni '50 del Novecento. Tuttavia, il recente verificarsi di gravi incidenti causati da rotture a fatica (*Aloha Airlines 1988, Eschede 1998, Viareggio 2009*) mostra come il fenomeno non sia ancora del tutto chiarito e richieda continui studi per aumentare continuamente la sicurezza e l'affidabilità negli ambiti meccanici.

### 2.1.2 Definizioni

La normativa ISO 1143:2010 definisce la fatica come:

*"process of changes in properties which can occur in a metallic material due to the repeated application of stresses or strains and which can lead to cracking or failure."*[33]

Tale definizione mette in evidenza come il fenomeno sia dovuto all'applicazione ripetuta di tensioni e che si manifesta come una variazione localizzata delle proprietà intrinseche dell'oggetto metallico arrivando a lungo andare alla formazione di cricche, definite come danneggiamenti sottili e profondi, o alla completa rottura del pezzo. Si ha quindi un danneggiamento progressivo e irreversibile dovuto alla propagazione dei danni nel materiale.

I parametri fondamentali che verranno tenuti in considerazione nell'analisi del fenomeno sono il numero di cicli  $n$  a cui il componente è sottoposto e la modalità di variazione del carico, descrivibile attraverso i parametri riportati in *Figura 2.1*, ovvero la tensione media  $\sigma_m$ , il range o l'ampiezza di variazione  $\Delta\sigma = 2\sigma_a$  e il rapporto di ciclo  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ . Per semplicità, si può considerare una variazione sinusoidale del carico andando poi ad attuare delle successive correzioni nel caso di cicli di carico non costanti.

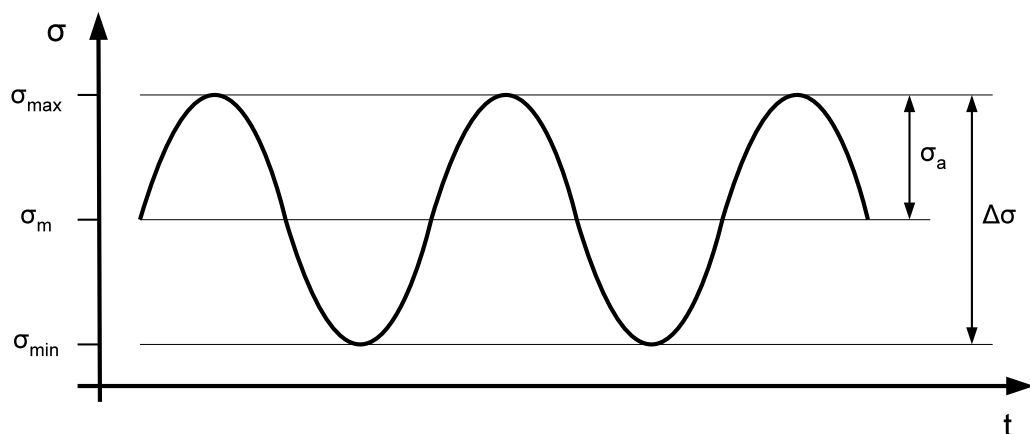


Figura 2.1: *Principali grandezze di riferimento per lo studio dei fenomeni a fatica.*

### 2.1.3 Analisi della rottura per fatica

La rottura di un componente a fatica si svolge in quattro fasi fondamentali. Supponendo un provino privo di difetti, la prima fase consiste nell'innescare della cricca, ovvero nella creazione di un minuscolo difetto superficiale causato dalle continue

sollecitazioni e da conseguenti slittamenti dei piani cristallini. Si ha infatti un assestamento microstrutturale e una stabilizzazione del ciclo di isteresi del materiale, che crea delle microestrusioni o microintrusioni in bande disposte a  $45^\circ$  rispetto alla direzione dello sforzo. Questa fase può coprire anche molti cicli, ma va notato come anche un piccolo difetto superficiale possa fungere da innesco di cricca già compiuto e annullarla del tutto.

Successivamente, si ha la nucleazione della cricca in corrispondenza degli slittamenti dei piani cristallini. Infatti, sul fondo di tali difetti gli sforzi risultano amplificati per effetto dell'intaglio, approfondito nel paragrafo 2.3.4, e si avranno più facilmente dei cedimenti localizzati del materiale, formando microcricche. La cricca si considera nucleata quando raggiunge la dimensione di 0,1 mm.

La cricca si propaga poi per un piccolo tratto lungo i  $45^\circ$  dei piani di estrusione per proseguire poi in direzione ortogonale rispetto alla direzione dello sforzo, in maniera transgranulare come per una frattura fragile. Ad ogni ciclo di sforzo, grazie all'effetto di intaglio, la cricca compie un passo lasciando sulla superficie fratturata tipiche striature dette *linee di spiaggia*.

L'avanzare della cricca porta a una continua diminuzione della sezione resistente, fino al raggiungimento della sezione critica del materiale; a tal punto il pezzo cede di schianto per sovraccarico statico. Nella *Figura 2.2* si riporta un esempio di superficie rotta per fatica, in cui si distinguono chiaramente le linee di spiaggia centrali e, in basso, la superficie che ha infine ceduto per sforzo statico. Si può intravedere anche, in alto in corrispondenza della sede di linguetta, l'innesco della cricca che ha portato al danneggiamento progressivo del pezzo.

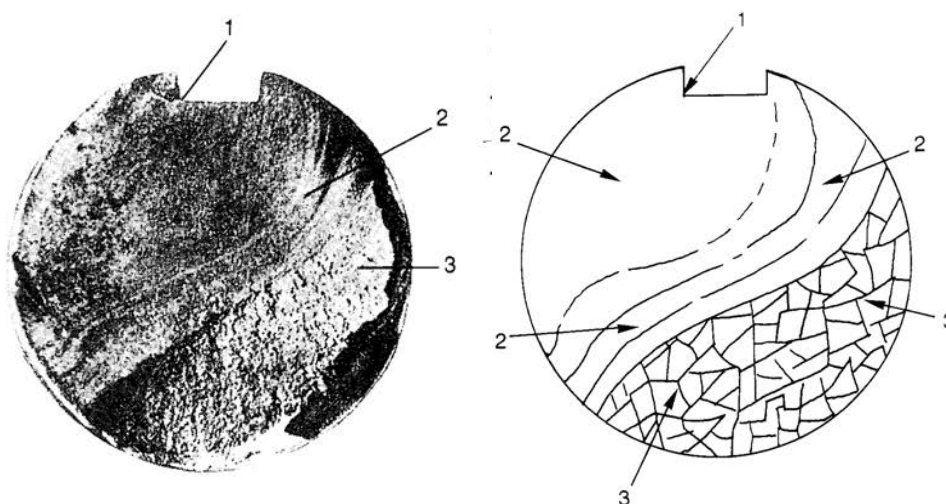


Figura 2.2: Esempio di superficie di rottura a fatica e rappresentazione schematica. Si notano: (1) innesco, (2) propagazione e linee di spiaggia, (3) cedimento finale.[31]

### 2.1.4 La curva di Wöhler

Il *diagramma di Wöhler* può essere considerato una base fondamentale per lo studio del comportamento a fatica di un organo meccanico; esso riporta sull'asse delle ascisse il numero di cicli a rottura del pezzo e in ordinata il valore di ampiezza di tensione applicata, entrambi in scala logaritmica. Ciascun grafico è valido solo per ampiezze costanti di tensione e per un ben determinato rapporto di ciclo.

La curva viene ottenuta sperimentalmente, analizzando diversi valori di ampiezza di tensione e per ciascuno di essi utilizzando più provini per poter mediare la dispersione statistica che affligge i risultati. Andando ad inserire nel diagramma i dati ottenuti si ottiene un grafico molto simile a quello di *Figura 2.3*, dove si possono individuare tre zone ben distinte:

1. Nella parte sinistra, si individuano le proprietà di resistenza a *fatica oligociclica*, caratterizzata da tensioni imposte elevate e vita utile inferiore ai  $10^4$  cicli, fino ad avere all'estrema sinistra il valore di resistenza statica a rottura del materiale. In questo caso un approccio basato sulle tensioni non è adeguato e si ricorre all'analisi delle deformazioni;
2. Nella parte centrale, si trova un tratto inclinato a pendenza costante che individua la zona di vita a termine dei provini. In questa zona, ad una diminuzione della sollecitazione corrisponde un aumento della vita utile secondo la relazione  $\sigma_a^k \cdot N = cost$ , dove  $N$  è il numero di cicli che porta a rottura il pezzo e  $k$  è la pendenza inversa della retta nel diagramma doppio logaritmico e vale solitamente  $8 \div 10$  per provini lisci e  $3 \div 4$  per provini intagliati;[44]
3. Nella parte a destra, si trova il *limite di fatica* del materiale, indicato con  $\sigma_{A,\infty}$ , al di sotto del quale non si arriverà mai a rottura del provino. Tale caratteristica è tipica degli acciai, mentre per altri materiali, come ad esempio le leghe leggere o alcuni acciai inossidabili, si ha solo una pendenza inversa maggiore, sintomo comunque di una minor sensibilità alla fatica.

L'equazione della curva di Wöhler viene generalmente ricavata attraverso il metodo dei minimi quadrati applicato ai dati sperimentali relativi alla resistenza, andando a trovarne quindi la media geometrica che corrisponde ad una probabilità di sopravvivenza del provino del 50%. Solitamente, per motivi cautelativi, si individua poi anche una banda di dispersione e si considerano curve relative a probabilità di sopravvivenza del 90%, 97,5% o addirittura 99,9% in base alla criticità del componente considerato.

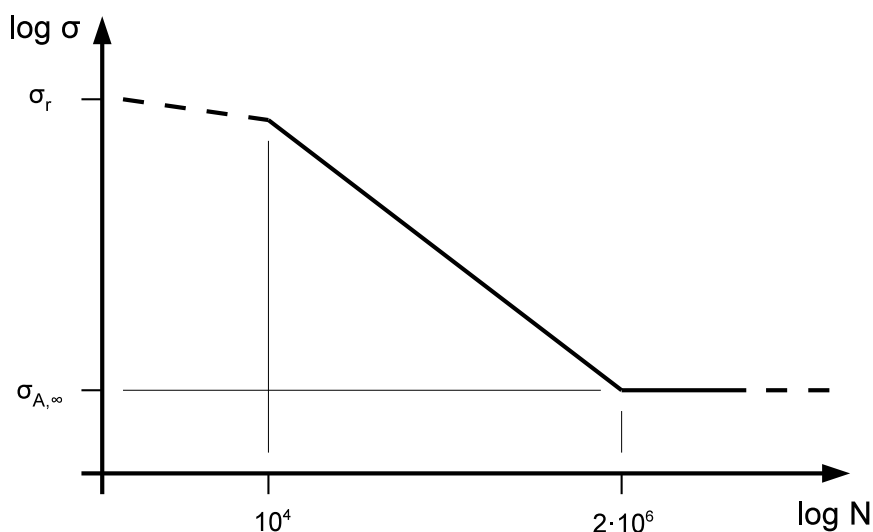


Figura 2.3: Esempio di diagramma di Wöhler semplificato.

Spesse volte, per standardizzare i risultati, non viene fornito il limite di fatica  $\sigma_{A,\infty}$  ma un valore di riferimento  $\sigma_A$  relativo ad una vita del provino pari a  $2 \cdot 10^6$  cicli. Un'altra modifica comune al diagramma classico, in favore di sicurezza, consiste nel considerare anche un tratto con pendenza inversa  $2k - 1$  tra  $2 \cdot 10^6$  e  $10^8$  cicli, per proseguire solo in seguito con il limite di fatica.

Un altro strumento molto utile per la progettazione a fatica è il *diagramma di Haigh*, che delimita la zona di vita sicura del materiale e le sollecitazioni ammissibili per un dato numero di cicli desiderato. Esso riporta sulle ascisse il valore della tensione media e sulle ordinate i valori delle ampiezze di tensione ammissibili. Dall'esempio di *Figura 2.4* si può notare come il diagramma non sia simmetrico, sintomo che cicli di carico con tensioni medie negative sono meno gravosi rispetto a quelli con tensioni medie positive, perché in presenza di compressione i lembi delle cricche tendono a richiudersi e propagano con maggiore difficoltà.[21]

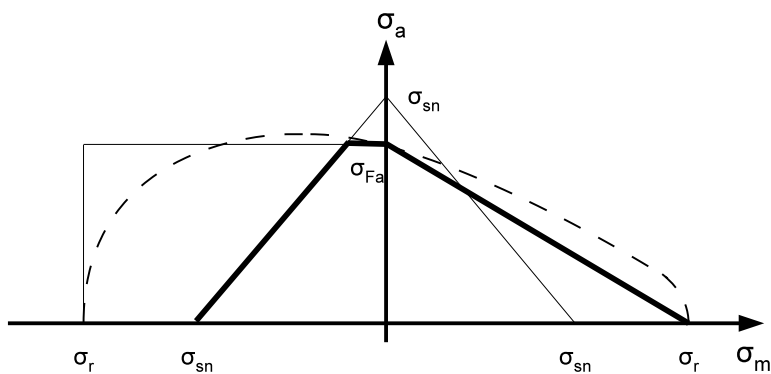


Figura 2.4: Esempio di diagramma di Haigh.



## 2.2 Fattori d'influenza esterni

I fattori che influiscono sulla resistenza a fatica di un materiale sono molteplici e, come accennato nel paragrafo 2.1.4, un diagramma di Wöhler è valido solamente sotto le specifiche condizioni in cui le sperimentazioni sono state svolte. Di notevole importanza sono le condizioni al contorno che si verificheranno in sede di utilizzo del componente e che esulano completamente dallo stato e dalle caratteristiche intrinseche del pezzo stesso.

Verranno in seguito analizzate le variabili esterne che nello specifico alterano la resistenza a fatica del pezzo e i motivi della loro azione.

### 2.2.1 Rapporto di ciclo e forma d'onda

La resistenza a fatica risente significativamente non solo dell'ampiezza, ma anche delle modalità con cui le sollecitazioni vengono applicate al sistema. In particolare, notevole influenza hanno il valore del rapporto di ciclo e della tensione media.

Quando la tensione media è diversa da zero, ovvero  $R \neq -1$ , le curve di Wöhler si discostano da quelle solitamente fornite dai cataloghi e devono essere ricavate appositamente. Uno strumento utile ed efficace a tale scopo è il *diagramma di Goodman-Smith*, che mette in relazione l'ampiezza di tensione e la tensione massima sopportabili dal pezzo con il valore della tensione media, riferito ad un certo numero di cicli di vita utile desiderato. Un esempio è riportato in *Figura 2.5*, anche se ne esistono diverse varianti in base al grado di approssimazione che si vuole applicare.

È da notare come solitamente il diagramma non sia simmetrico rispetto all'origine, ma risulti più ampio nella parte dove la compressione prevale sulla trazione. Ciò avviene sia perché alcuni materiali hanno resistenza a trazione e compressione diverse, sia perché in linea generale una sollecitazione a compressione tende a rallentare l'avanzamento delle cricche.[2] Dal grafico, è possibile ricavare una funzione che restituisce il valore del limite di fatica per un certo rapporto di ciclo  $R$  in funzione di quello per  $R = -1$ :

$$\sigma_A(R) = \frac{\sigma_{A,R=-1} \cdot \sigma_r}{\left(\frac{1+R}{1-R}\right) \cdot \sigma_{A,R=-1} + \sigma_r}$$

Vanno inoltre citati gli effetti che diverse forme d'onda possono provocare. In particolare, nonostante ciò venga comunemente trascurato poiché difficile da quantificare, una sollecitazione ad onda quadra risulta essere più gravosa rispetto a quella sinusoidale di riferimento, poiché la massima sollecitazione viene mantenuta per una durata maggiore. Anche le frequenze, se molto elevate, possono comportare varia-

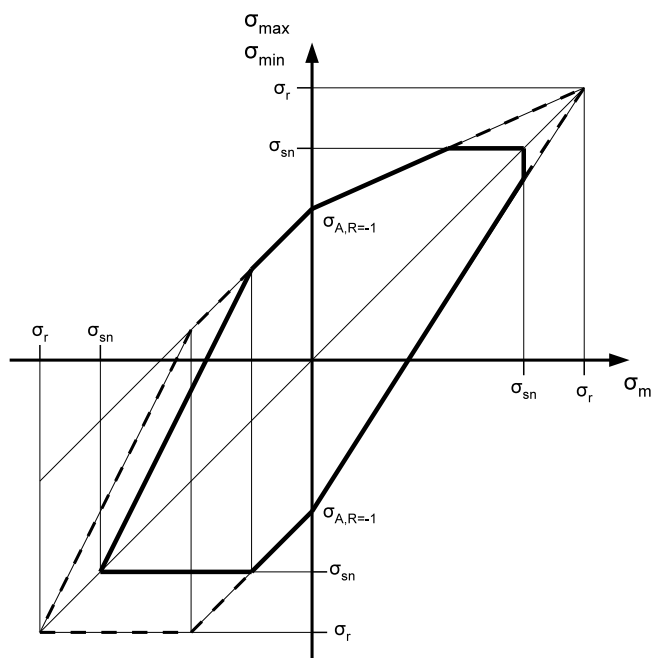


Figura 2.5: Esempio di diagramma di Goodman-Smith relativo al carico di snervamento (linea piena) e al carico di rottura (linea tratteggiata).

zioni di resistenza. Per valori superiori al centinaio di hertz, infatti, possono venire indotti nel metallo fenomeni di isteresi e quindi riscaldamento locale del componente, con effetti che verranno trattati nel paragrafo 2.2.3.

## 2.2.2 Tipo di sollecitazione

La resistenza a fatica viene solitamente valutata attraverso prove di flessione rotante, descritte più nel dettaglio nel paragrafo 2.4.2, su provini di sezione circolare. Tuttavia, nel caso di provini soggetti a trazione o a flessione piana, la sezione del provino soggetta al massimo sforzo è differente e varia quindi anche il comportamento nel caso di sforzi ciclici.

Infatti, mentre nel caso della flessione rotante la zona maggiormente sollecitata è una corona circolare in corrispondenza della superficie del pezzo, nella flessione piana la tensione maggiore si ha nei punti più distanti dall'asse neutro e nella trazione la sollecitazione massima si distribuisce equamente sull'intera sezione. Tale fatto è ben evidenziato in *Figura 2.6*. È quindi chiaro come, a parità di  $\sigma_{max}$ , il caso della flessione piana risulti meno critico rispetto alle tipiche condizioni di test, andando a sollecitare una frazione minore della sezione totale, mentre il caso a trazione sia più impegnativo. Si sfrutta quindi un coefficiente correttivo empirico  $K_v$  che va a dividere il valore di  $\sigma_A$  e che vale 0,8 nel primo caso e 1,12 nel secondo.

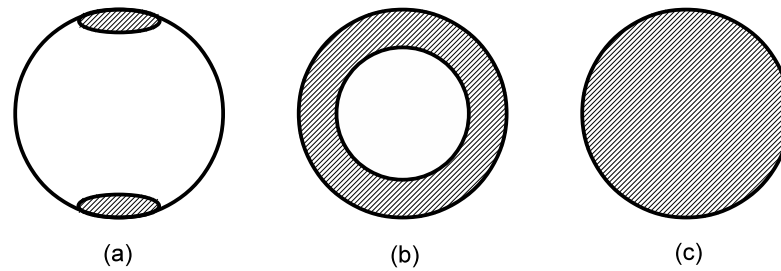


Figura 2.6: Sezione maggiormente sollecitata a fatica nel caso di sforzi di flessione piana (a), flessione rotante (b) e trazione (c).

### 2.2.3 Ambiente e temperatura

Nei materiali più comuni per applicazioni strutturali la resistenza a fatica è influenzata negativamente da temperature di esercizio elevate; variazioni apprezzabili si hanno però solo per temperature tali da poter alterare la struttura del materiale o i trattamenti termici subiti o in grado di avviare processi di *creep* localizzati. Ciò porta alla particolarità del comportamento di ciascun pezzo in base alle sue caratteristiche intrinseche e impedisce una trattazione generica degli effetti, che dovranno essere valutati di volta in volta sperimentalmente.

Gli effetti della presenza di agenti corrosivi nell'ambiente sono invece noti ed estremamente negativi, in quanto si attiva un processo detto *corrosione coatta*.<sup>[11]</sup> L'azione sinergica delle tensioni e della corrosione sulle cricche ne causa un avanzamento notevolmente accelerato, con una penalizzazione che supera di gran lunga la somma dei due effetti considerati singolarmente e una riduzione della resistenza a fatica che può arrivare all'80÷90%, fino alla completa scomparsa del limite di fatica e la conseguente necessità di continue sostituzioni dei componenti più sollecitati. Per limitare l'effetto degli agenti corrosivi si può agire proteggendo i pezzi con opportuni rivestimenti elastici o introducendo nell'ambiente degli inibitori, sostanze che aggiunte in tracce nell'ambiente corrosivo ne riducono l'aggressività.<sup>[55][31]</sup>

L'ossidazione ha un effetto accostabile a quello della corrosione, in quanto la parte ossidata ha solitamente volume maggiore e va a creare all'interno della cricca tensioni non previste che ne velocizzano il progredire.

### 2.2.4 Storia pregressa

La storia di carico precedente subita dal pezzo va ovviamente a influire sulla vita utile residua del pezzo. Considerando un componente sollecitato con ampiezze di tensione costanti a blocchi come in *Figura 2.7*, si può applicare la regola di Miner,

detta del *danneggiamento unitario*, che consente di trovare una tensione equivalente  $\sigma_{eq}$  applicata per un numero di cicli  $n_{eq}$ . Si ha che:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_{eq}}{N_{eq}} \quad \sigma_{eq} = \sqrt[k]{\sum_i \sigma_i^k \frac{n_i}{n_{eq}}}$$

Il pezzo arriverà quindi a rottura quando il numero dei cicli equivalenti raggiungerà il numero di cicli massimo previsto per la tensione equivalente calcolata. Tale metodo è valido tuttavia solo per  $N < 2 \cdot 10^6$ ; non si considera infatti il fenomeno dell'acciaccamento, per il quale un provino soggetto ad una storia di carico con  $\sigma_a \gg \sigma_{a,\infty}$  perde il limite di fatica e non presenta più la zona a vita infinita. Per  $\sigma_a < \sigma_{a,\infty}$  esiste invece il fenomeno contrario, detto di allenamento: la resistenza a fatica migliora grazie ad una parziale redistribuzione delle dislocazioni nel reticolo cristallino.[44]

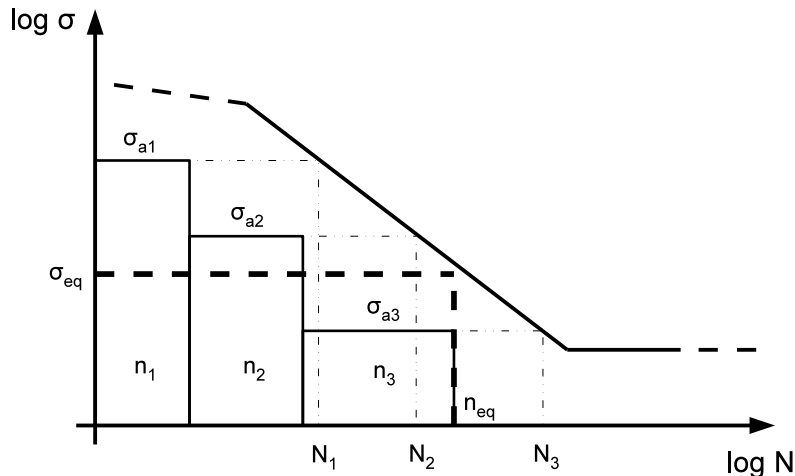


Figura 2.7: Sollecitazione costante a blocchi e sollecitazione equivalente secondo la regola di Miner.

Importanza spesso trascurata hanno anche le lavorazioni subite dal pezzo, sia in fase di produzione sia successivamente. Esse possono aver prodotto all'interno del reticolo cristallino delle significative tensioni residue, che se di trazione possono penalizzare notevolmente la resistenza a fatica. Tale argomento verrà esposto più dettagliatamente nella sezione 3.2.

## 2.3 Fattori d'influenza interni

Finora sono stati descritti gli effetti sulla resistenza a fatica delle condizioni esterne a cui il pezzo dovrà sottostare durante l'esercizio, ma ci sono anche caratteristiche proprie del componente che hanno influenza sulla sopportazione di sforzi

ciclici. Mentre nel primo caso i parametri sono spesso dettati da fattori non direttamente controllabili, i parametri interni sono totalmente decidibili in fase di sviluppo e progettazione ed è quindi fondamentale averne padronanza e gestirli al meglio in modo da massimizzare, a parità di risorse, la vita utile del pezzo.

L'influsso dei parametri interni sulla resistenza a fatica verranno di seguito analizzati, soffermandosi anche sulle cause scatenanti e i motivi della loro azione.

### 2.3.1 Materiale

Si è empiricamente dimostrato che la resistenza a fatica del materiale base può essere legata alla sua tensione di rottura da una relazione approssimativamente lineare, del tipo  $\sigma_{A,\infty} = \varphi \cdot \sigma_r$ . Il coefficiente  $\varphi$  è chiamato *rapporto di fatica* e per gli acciai da costruzione più comuni va da 0,35 per i più fragili fino a 0,6 per i più duttili, come visibile in *Figura 2.8*. [44] Tali valori sono indicativi di come i materiali fragili siano più sensibili alla fatica rispetto a quelli duttili; nelle leghe leggere, invece, il limite di fatica non è presente e quindi tale coefficiente è relativo ad un valore convenzionale di resistenza a  $5 \cdot 10^8$  cicli.

Sfruttando il rapporto di fatica è quindi possibile ottenere una stima di massima del limite di fatica del materiale conoscendone solo la tensione massima di rottura.

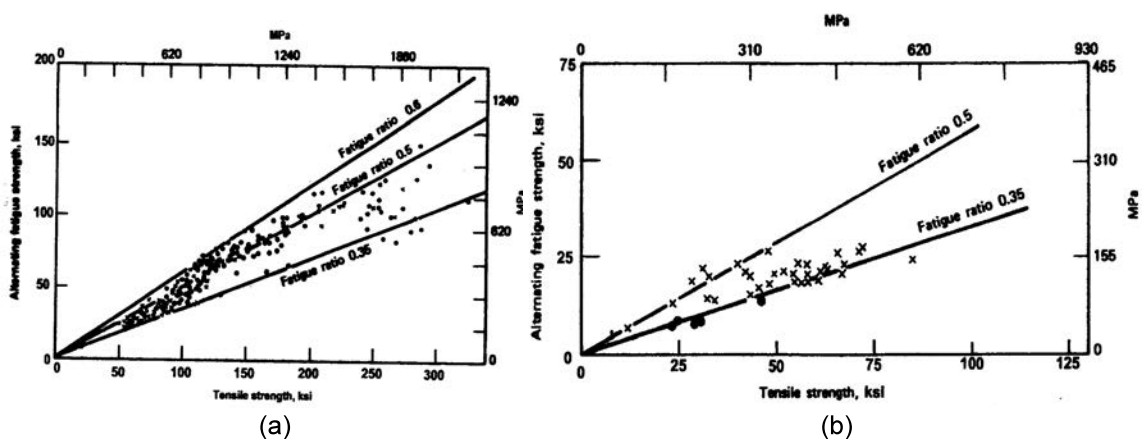


Figura 2.8: *Rapporto di fatica per acciaio (a) e leghe di alluminio (b).* [49]

### 2.3.2 Dimensioni assolute

Quando aumentano le dimensioni del pezzo, anche con le più moderne tecnologie, è statisticamente inevitabile che aumenti il numero di difetti contenuti all'interno del materiale, come porosità, soffiature e soprattutto inclusioni. Questi problemi vanno a penalizzare la resistenza meccanica del pezzo e, in particolare, la resistenza

a fatica; le microinclusioni, se presentano spigoli vivi, possono agire da innesco di cricca e accelerare il processo di degradazione delle proprietà del materiale. Si può quindi affermare che le dimensioni del pezzo vanno ad influire negativamente sulla resistenza ad alto numero di cicli.

Poiché solitamente i dati sperimentali sono ottenuti con provini di diametro ridotto, si applica un coefficiente correttivo, ricavabile da appositi grafici come quello di *Figura 2.9*, che va a penalizzare opportunamente il limite di fatica per i diametri maggiori.

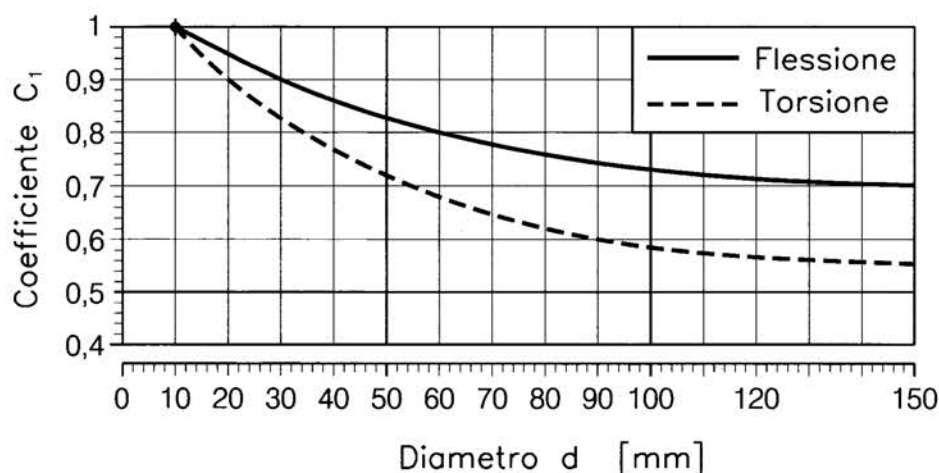


Figura 2.9: Andamento del coefficiente di riduzione della vita a fatica in base alle dimensioni del pezzo.[2]

### 2.3.3 Finitura superficiale e trattamenti

Poiché, come accennato nel paragrafo 2.1.2, la fatica è un fenomeno localizzato, il valore della rugosità superficiale o la presenza di piccoli danneggiamenti possono influire significativamente sulla durata della vita utile del componente.

La rugosità si presenta microscopicamente come una serie di picchi e gole di forma casuale prodotti in fase di lavorazione da una non perfetta finitura o per limiti tecnologici dei macchinari utilizzati. Queste irregolarità agiscono da inneschi preferenziali di cricca già predisposti, riducendo di fatto la vita utile a fatica spesso per la nucleazione di una cricca macroscopica. L'effetto della rugosità è tanto maggiore quanto più alta è la tensione di rottura del materiale; ne conviene che può essere controproducente scegliere acciai ad alta resistenza se non è possibile avere un elevato controllo della finitura superficiale.

I provini utilizzati in laboratorio presentano solitamente un'ottima finitura superficiale, che di rado viene richiesta nei prodotti ad uso industriale. Per questo

motivo, viene considerato un coefficiente peggiorativo del limite di fatica legato al valore della rugosità assoluta  $R_a$ , ricavabile da appositi grafici come quello di *Figura 2.10*.

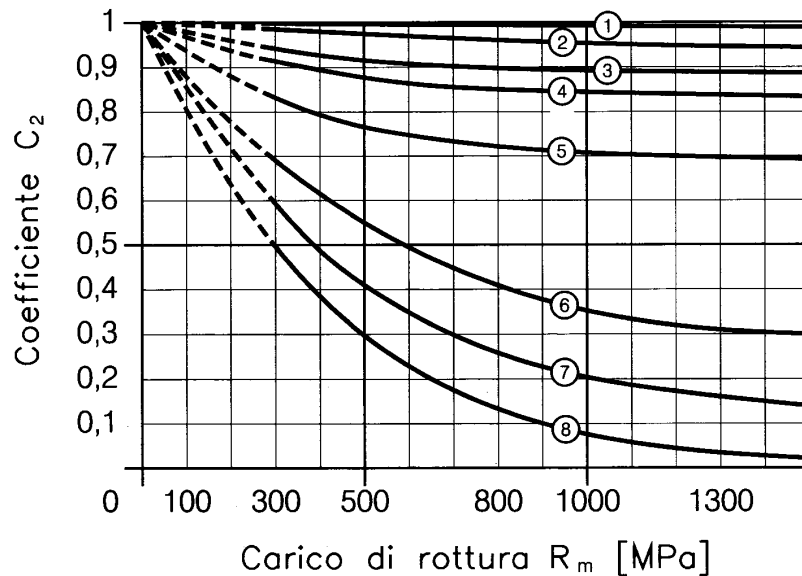


Figura 2.10: *Andamento del coefficiente di riduzione della vita a fatica in base al carico di rottura del materiale e alla rugosità superficiale: (1) superfinitura con 0,25  $R_a$ , (2) rettifica fine con 0,5  $R_a$ , (3) rettifica normale con 1,0  $R_a$ , (4) finitura alla macchina utensile con 2,5  $R_a$ , (5) sgrossatura con 12  $R_a$ , (6) greggio di laminazione, (7) con corrosione in acqua pura, (8) con corrosione in acqua salata.[2]*

Per migliorare quest'aspetto si ricorre spesso a trattamenti superficiali che hanno lo scopo di migliorarne la finitura, come la rettifica o la lappatura, o di creare uno strato superficiale di materiale in compressione, come la pallinatura e la rullatura. Quest'ultima tipologia di trattamenti, come si vedrà nel dettaglio per la pallinatura nel capitolo 4, ha la doppia funzione di eliminare le tensioni residue di trazione sulla superficie e di opporsi alla nucleazione e all'avanzamento delle cricche, con notevoli vantaggi in termini di vita utile.

### 2.3.4 Geometria e variazioni di sezione

La grandissima maggioranza dei pezzi meccanici prodotti, per esigenze tecnologiche o funzionali, presenta discontinuità geometriche come fori, intagli, sedi o spallamenti. Esse interrompono la distribuzione continua delle tensioni tipica di un oggetto regolare andando a creare accumuli di tensione in prossimità dei punti dove la sezione si riduce.

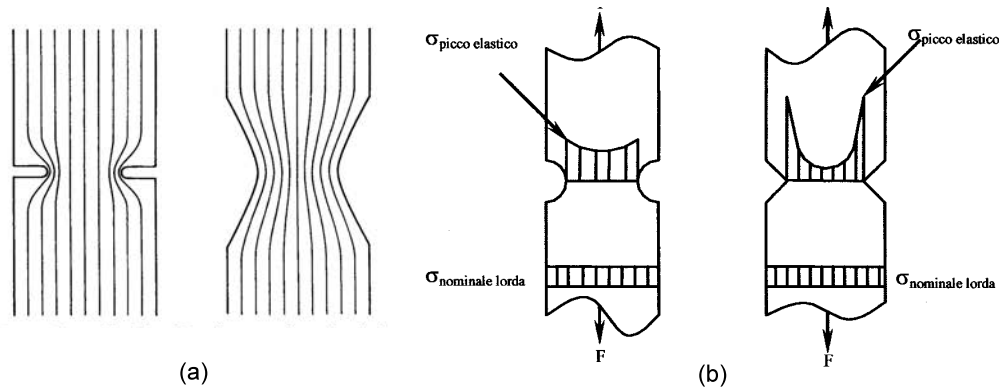


Figura 2.11: (a) Analogia idraulica che evidenzia la concentrazione delle tensioni in presenza di intagli.[49] (b) Concentrazione delle tensioni in presenza di raggi di raccordo più o meno ridotti.[44]

Per comprendere al meglio l'andamento delle tensioni è utile ricorrere alla cosiddetta *analogia idraulica* e assimilare la tensione alle linee di flusso di un fluido che scorre in un tubo della stessa geometria del pezzo.[36] Osservando la *Figura 2.11(a)* si può notare come la presenza di un intaglio causi una concentrazione delle linee di flusso in corrispondenza della riduzione di sezione. Tale accumulo non è tuttavia distribuito ma si condensa maggiormente in prossimità dell'intaglio stesso, soprattutto nel caso in cui esso sia meno raccordato.

Andando a definire la tensione nominale netta  $\sigma_{n,net} = \frac{F}{A_{net}}$  e lorda  $\sigma_{n,gross} = \frac{F}{A_{gross}}$ , è possibile trovare una relazione tra esse e la tensione di picco  $\sigma_{peak}$  registrata in prossimità del foro. Il coefficiente  $K_t$  che le lega è detto *fattore teorico di concentrazione delle tensioni* o più semplicemente *fattore d'intaglio teorico* e può essere riferito alla tensione nominale netta o lorda secondo la relazione:

$$K_{t,net} = \frac{\sigma_{peak}}{\sigma_{n,net}} \qquad K_{t,gross} = \frac{\sigma_{peak}}{\sigma_{n,gross}}$$

Per definizione, tale fattore è sempre valutato in campo lineare elastico, è indipendente dal materiale e dalle dimensioni assolute ma varia in relazione alle proporzioni geometriche del componente. Esso può essere ricavato sperimentalmente, attraverso codici di calcolo o per via teorica, ma per le geometrie più comuni esistono tabelle e diagrammi come quelli di *Figura 2.12* che permettono di ottenere facilmente una stima adeguata del coefficiente.[11]

Riducendo il raggio di raccordo, aumenta la gravosità dell'intaglio e di conseguenza anche il gradiente di tensione nelle sue immediate vicinanze, fino ad avere tensioni che tendono all'infinito nel caso di spigoli vivi dove il raggio di raccordo tende a zero, com'è osservabile in *Figura 2.11(b)*.



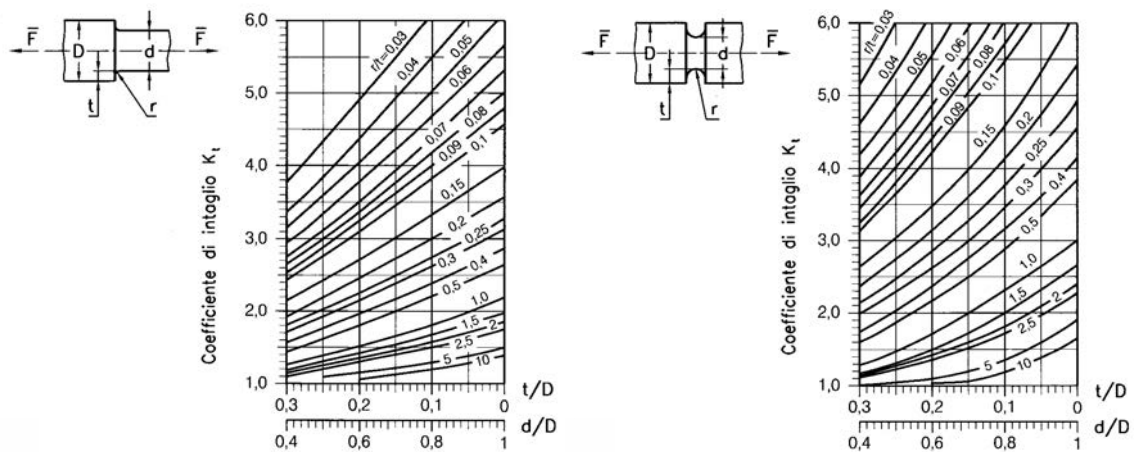


Figura 2.12: Esempi di grafici da cui ricavare il fattore di intaglio in base alla forma e al rapporto tra le dimensioni.[2]

Nelle verifiche statiche, vanno distinti i comportamenti dei materiali duttili e fragili. Nel primo caso, quando il materiale raggiunge localmente la tensione di snervamento, la restante sollecitazione viene distribuita sulla porzione di sezione non ancora snervata fino a che tutta non subisce deformazione plastica uniforme; solo allora il pezzo proseguirà la deformazione fino alla rottura. Si può quindi trascurare l'effetto dell'intaglio e considerare semplicemente la tensione netta.

Nel caso fragile, invece, tale semplificazione non può essere applicata poiché essi non presentano quasi nessuna deformazione plastica e la cricca, una volta nata, propaga velocemente fino ad arrivare alla rottura del pezzo. Condizioni analoghe vanno considerate nelle verifiche a fatica, per le quali tutti i materiali presentano comportamento fragile. Si sfrutta in tal caso un secondo coefficiente  $K_f$ , detto *fattore di riduzione della resistenza a fatica* o *fattore d'intaglio sperimentale*, che mette in relazione il limite di fatica di un provino liscio con quello di un provino intagliato come segue:

$$K_f = \frac{\sigma_{A,\infty,neat}}{\sigma_{A,\infty,notched}}$$

Determinare  $K_f$  richiede un'enorme e onerosa attività sperimentale, perciò si ricorre spesso a dei valori stimati utilizzando la formula di *Peterson*:

$$K_f = \frac{K_t \cdot r + \eta}{r + \eta}$$

dove  $r$  è il raggio di raccordo dell'intaglio e  $\eta$  è un parametro dipendente dal materiale detto *fattore di sensibilità all'intaglio*, ritrovabile in apposite tabelle e manuali, che

vale indicativamente 0,25 per gli acciai duttili, 0,1 per gli acciai ad alta resistenza e 0,6 per le leghe leggere.[2] Ciò evidenzia come gli acciai ad alta resistenza siano più sensibili agli intagli rispetto agli acciai duttili, così come si è riscontrato nel paragrafo 2.3.3 per la finitura superficiale.

## 2.4 Progettazione e verifiche a fatica

Nonostante la mole di strumenti, tabelle e manuali a disposizione del progettista, la complessità intrinseca ad un'adeguata progettazione a fatica rimane molto elevata. L'affermarsi di strumenti di calcolo numerico ad elementi finiti (FEM) può inoltre rivelarsi un'arma a doppio taglio; se da un lato semplifica notevolmente il dimensionamento dei componenti, permettendo calcoli più precisi e verifiche in simulazione finemente dettagliate, dall'altro può portare a sottovalutarne la difficoltà e la quantità di parametri da considerare con il rischio che operatori inesperti o poco attenti trascurino aspetti che vanno in realtà a influenzare significativamente il risultato finale. Altro errore comune è quello di utilizzare le nozioni valide nel caso dell'impiego di acciai anche con materiali differenti, come le leghe leggere, che presentano lievi ma significative differenze nel comportamento.

In seguito verranno descritte alcune linee guida per la progettazione a fatica e le prove eseguite nei laboratori per valutare la resistenza dei materiali.

### 2.4.1 Approcci alla progettazione

Nel corso degli anni, l'approccio alla progettazione a fatica ha subito importanti modifiche. La maggiore conoscenza del fenomeno e la necessità di impieghi in condizioni dove la massa dei componenti va ridotta il più possibile ha portato a diversi criteri di progettazione, con gradi di sicurezza sempre più ridotti. I principali tra gli approcci sviluppati sono descritti in seguito.

**Criterio *Infinite Life*.** È il criterio più semplice e più datato, nonché quello che garantisce il grado di sicurezza maggiore. Richiede che le tensioni e le deformazioni siano sempre ben al di sotto del limite di fatica. Ciò porta ad un notevole sovradimensionamento del componente e un relativo aumento della massa complessiva, ma risulta il miglior approccio disponibile per componenti con vita utile richiesta di decine di milioni di cicli o per parti la cui locazione ne renderebbe la sostituzione molto problematica.

**Criterion *Safe Life*.** In molti settori, come quello automobilistico, la progettazione a vita infinita risulterebbe inutilmente dispendiosa poiché si conosce già la probabile vita utile del prodotto. In tal caso i componenti vengono progettati con un numero di cicli vita finito e scelto in fase di progettazione, in modo da garantire comunque margini di sicurezza elevati. A fine vita il componente viene rimosso anche se non presenta danni evidenti.

**Criterion *Fail Safe*.** È un criterio più evoluto, applicabile nei casi in cui un eventuale cedimento non sia pericoloso. I componenti sono progettati per avere una resistenza residua anche dopo un cedimento parziale oppure si prevedono elementi sacrificali che arrivando a cedimento per primi indicano il raggiungimento di condizioni critiche senza compromettere l'integrità della struttura (*fusibili meccanici*). In tal modo è possibile considerare coefficienti di sicurezza più ridotti e alleggerire la struttura, ma è necessario prevedere un piano di ispezione programmato. Nel caso il pezzo raggiunga il termine della vita prevista senza rotture, può essere comunque sostituito come nel caso precedente o si può continuarne l'impiego fino a rottura affidandosi ai sistemi di sicurezza presenti.

**Criterion *Damage Tolerant*.** È un'ulteriore evoluzione del criterio precedente e si basa sull'assunzione che il componente possa essere performante anche in presenza di uno stato di danno. In questo caso le verifiche previste dovranno essere più accurate e frequenti, in modo da monitorare continuamente l'evoluzione del danno e indicarne la sostituzione quando esso diventa critico.

### 2.4.2 Valutazione sperimentale della resistenza a fatica

Le prove a fatica necessitano di una pianificazione ben più articolata in confronto alle prove meccaniche di tipo statico. Innanzitutto, per avere un numero sufficiente di dati in modo tale da poter costruire una curva di Wöhler affidabile, sono necessari almeno una decina di provini, secondo il più affermato metodo *Staircase*. Vanno poi opportunamente studiate e specificate le condizioni in cui le prove verranno svolte per i motivi discussi nelle sezioni 2.2 e 2.3. Spesso lo scopo delle prove è quello di testare la resistenza di un certo materiale al variare di alcuni di questi fattori: in tal caso le prove sono di tipo comparativo e si hanno più serie di provini da analizzare. Altre volte, le prove non prevedono l'uso di provini ma direttamente dei manufatti da testare, come sci, forcelle di biciclette o semilavorati, allo scopo di avere risultati facilmente riportabili alle condizioni di impiego reali.

Dopo ciascuna prova è necessaria un'analisi della frattura, allo scopo di studiare le fasi di nucleazione e propagazione delle cricche e verificare se la rottura è imputabile a difetti del materiale o della superficie o, eventualmente, a errori di progettazione.

Le prove a fatica classiche possono essere svolte sottoponendo il provino a sollecitazioni di flessione rotante, flessione piana, trazione-compressione o torsione. Nel primo caso si ha un motore elettrico che movimentata il provino, posizionato a sbalzo o su appoggi, e un meccanismo a leva che applica staticamente un momento flettente. Negli altri casi invece, un motore elettrico aziona un meccanismo a leve che trasmette in modo opportuno un carico alternato su un'estremità del provino, mentre l'altra è incastrata. Alcune possibili configurazioni dei macchinari sono riportate in *Figura 2.13*.

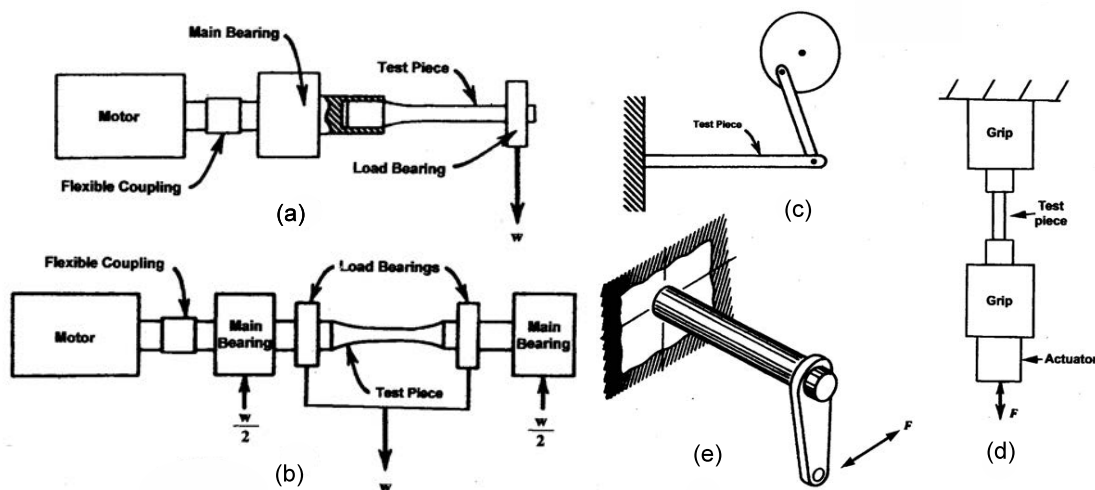


Figura 2.13: Alcuni esempi di macchine per le prove di fatica: (a) a flessione rotante a sbalzo, (b) a flessione rotante con macchina di Moore, (c) a flessione piana, (d) a trazione-compressione, (e) a torsione.[49]

È da notare che solo nel primo caso si va a regolare direttamente la sollecitazione, mentre negli altri si varia la deformazione imposta dal meccanismo al provino. In queste ultime, la variazione con il progredire dei cicli dello sforzo necessario a produrre una deformazione costante può indicare la tendenza ad un incrudimento o ad un addolcimento progressivo del materiale.

Esistono svariati tipi di provini standard per prove a fatica, in base al tipo di macchinario usato e alla sollecitazione applicata. Si possono tuttavia suddividere in quattro macrocategorie, in base alla loro sezione e alla forma del profilo di test:

- provini a sezione circolare, usati per i test a flessione rotante, a torsione e a trazione;

- provini a sezione rettangolare, usati per i test a flessione piana e a trazione;
- provini con profilo di test a clessidra, caratterizzati da un profilo curvilineo a raggio costante che collega le due estremità e diametro minimo in corrispondenza del centro;
- provini con profilo di test a sezione costante, caratterizzati dalla parte centrale a sezione costante per una certa lunghezza e opportuni raccordi ad ampio raggio alle estremità.

In tutti i casi il profilo di test centrale presenta sezione inferiore rispetto alle teste, in modo da evitare che la rottura avvenga in prossimità delle estremità o delle zone di transizione.

Negli ultimi anni vanno sempre più affermandosi macchinari di tipo servoidraulico o con attuatori elettromeccanici lineari, che consentono di avere una lettura in feedback di tensioni e deformazioni e di variarne l'entità a piacimento e in modo controllato. Ovviamente, queste possibilità si hanno a fronte di un costo iniziale, operativo e manutentivo decisamente maggiore.[42]

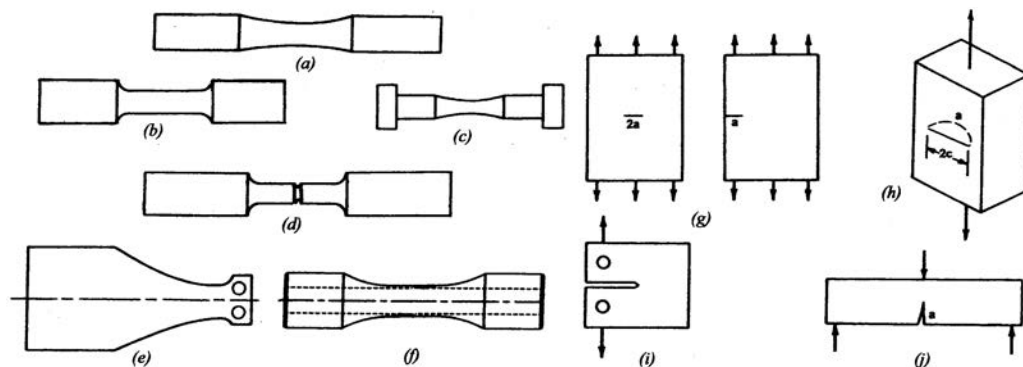


Figura 2.14: Alcuni esempi di provini impiegati per le diverse prove di fatica: (a) flessione rotante, (b) assiale uniforme, (c) assiale a clessidra, (d) assiale o flessione rotante con intaglio, (e) flessione piana, (f) tubolare per prove di flessotorsione con o senza pressione interna, (g) lamiera intagliata, (h) provino con intaglio profondo, (i) provino per analisi avanzamento cricche, (j) flessione a tre punti.[49]

Quando è necessario eseguire test da decine di milioni di cicli o più, come nel caso delle leghe leggere, le tempistiche della prova con macchinari classici, che lavorano al massimo a 300 Hz, diventerebbero eccessive. Si ricorre quindi a macchinari di tipo ultrasonico, che sfruttano dei *vibrofori* elettromagnetici per produrre oscillazioni a frequenza corrispondente alla prima frequenza naturale del provino, generalmente nell'intorno dei 20 kHz. La condizione di risonanza è necessaria per ottenere un'ampiezza di deformazione sufficiente per produrre fatica nel materiale, poiché altrimenti

il sistema provino-attuatore si troverebbe in condizioni sismografiche e la loro inerzia annullerebbe di fatto l'ampiezza della deformazione.[25]

Esistono infine prove particolari, sempre legate allo studio resistenza a fatica. Una di questa analizza il comportamento di un provino che subisce urti ripetuti, applicati da una mazza battente al ritmo di  $5 \div 10$  colpi al secondo, in modo da esercitare sollecitazioni impulsive invece che gradualmente.[31] Un'altra prova particolarmente interessante, regolata dalla normativa americana ASTM E647, va a misurare la velocità di avanzamento di una cricca su provini appositamente *precricati* e opportunamente sollecitati, sfruttando per l'analisi strumenti ottici, ultrasonici o estensimetrici. In questo modo, si riesce valutare la sensibilità del materiale alla presenza di intagli.[32]

### 2.4.3 Consigli pratici per ridurre la probabilità di rotture per fatica

In riferimento a quanto finora esposto, è possibile sintetizzare alcuni consigli utili in fase di progettazione per ridurre il rischio di cedimenti dovuti alla fatica, suddivisi in base agli ambiti.[47]

**Materiale.** È necessario assicurarsi della qualità del materiale utilizzato, di modo che sia di elevata purezza, senza fasi segregate, soffiature o porosità, con strutture interne adatte nella tipologia e nelle dimensioni del grano e senza fibrosità. Prediligere per quanto possibile materiali dalle caratteristiche meccaniche non eccessive, poiché essi sono tendenzialmente più duttili e tenaci e fanno avanzare più lentamente le cricche.

**Geometria.** Evitare in ogni modo spigoli vivi o raggi di raccordo troppo ridotti, poiché a causa del fattore d'intaglio diventerebbero inneschi preferenziali per le cricche. Curare ogni variazione di sezione con raggi il più possibile ampi. Ridurre al minimo la dimensione del pezzo per abbassare la probabilità che contenga pericolose inclusioni estranee.

**Lavorazione.** Evitare di creare stati di pretensionamento nel materiale. Nel caso di lavorazioni per asportazione di truciolo non si devono creare superfici di strappamento né sviluppare temperature tali da alterare le caratteristiche superficiali del materiale o, peggio ancora, da creare un reticolo di crinature. Nel caso di stampeggio o fucinatura, evitare cordoni di giunzione o ripiegature e per le deformazioni plastiche a freddo creare stati di precompressione. Nel caso siano previste saldature,

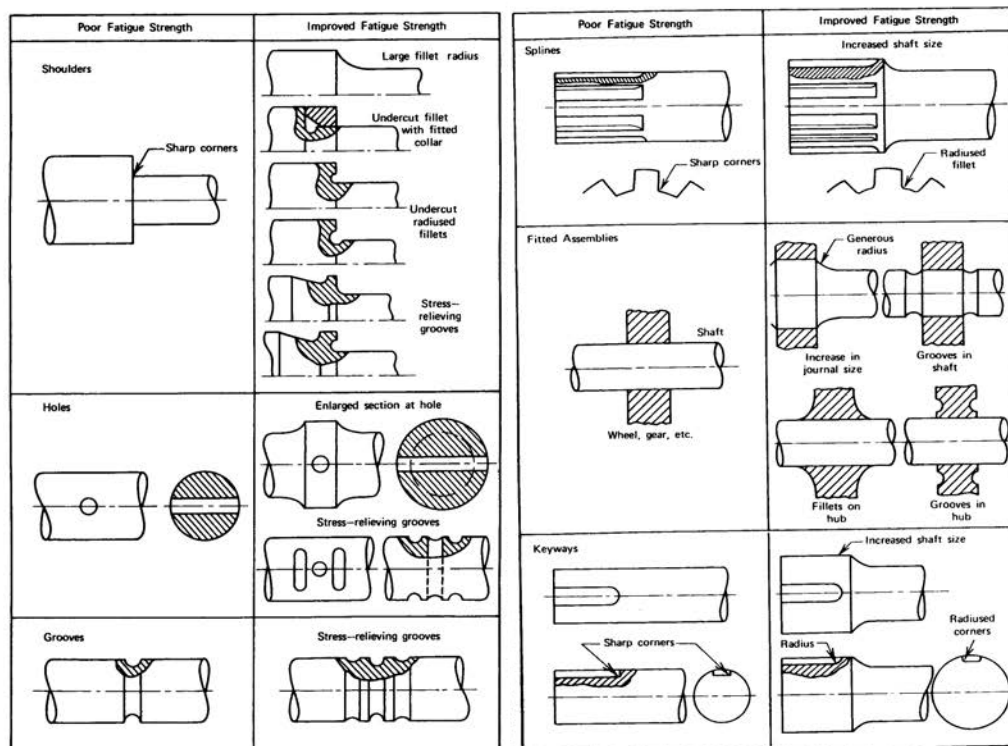


Figura 2.15: *Consigli per il miglioramento della vita a fatica nel caso di geometrie critiche.*[49]

usare ogni accorgimento al fine di assicurare continuità e omogeneità tra materiale base e materiale d'apporto e per ridurre il tensionamento residuo. Curare gli assemblaggi in modo che non vi sia forzamento né giochi eccessivi o disallineamenti che possano portare a vibrazioni. Minimizzare il valore di rugosità superficiale e prevedere trattamenti di rullatura o pallinatura che portino la superficie in uno stato di compressione, rallentando l'avanzamento delle cricche.

**Trattamenti termici.** Curare eventuali trattamenti termici previsti al fine di evitare anomalie della struttura finale, ossidazioni o decarburazioni. Per acciai ad alta resistenza, prevedere trattamenti termici come la bonifica in grado di conferire valori elevati sia di resistenza meccanica sia di tenacità a cuore. Prestare attenzione ad eventuali trattamenti di carbocementazione e nitrurazione, che se da un lato induriscono la superficie riducendo la probabilità di nucleazione di cricche, dall'altro possono portare in tensione la superficie e accelerare la propagazione della cricca una volta innescata.

**Condizioni di lavoro.** Mantenere la temperatura di esercizio prevista in fase di progettazione, poiché temperature eccessive o troppo ridotte vanno ad abbassare

il limite di fatica del materiale. Se possibile evitare ambienti corrosivi o troppo ossidanti, o prevedere opportune protezioni superficiali. Curare la lubrificazione ed evitare per quanto possibile sovraccarichi del pezzo.

#### 2.4.4 Particolarità nel caso delle leghe leggere

Comunemente la trattazione dei fenomeni di fatica viene fatta per elementi in acciaio, di gran lunga materiale più usato in ambito industriale. Nel caso si scelgano materiali differenti tali nozioni vanno in parte riviste, poiché il comportamento ad elevato numero di cicli potrebbe essere molto diverso.

Per quanto riguarda le leghe di alluminio, la principale differenza, già citata nei paragrafi 1.1.1 e 2.1.4, riguarda l'assenza di un valore asintotico per cicli elevatissimi (se non per alcune leghe della serie 5000) e quindi, di fatto, l'impossibilità di progettare a vita infinita. Intorno ai  $10^6 \div 10^7$  cicli si verifica tuttavia un aumento della pendenza inversa della curva di Wöhler, come visibile in *Figura 2.16*, ed altri aumenti possono essere considerati, in base al grado di approssimazione, per ordini di grandezza ancora superiori. Solitamente, si va quindi a ricercare il valore di sollecitazione che permette al pezzo meccanico di raggiungere una durata convenzionale di vita utile di  $5 \cdot 10^8$  cicli e si indica questo come resistenza a fatica della lega ad altissimo numero di cicli.

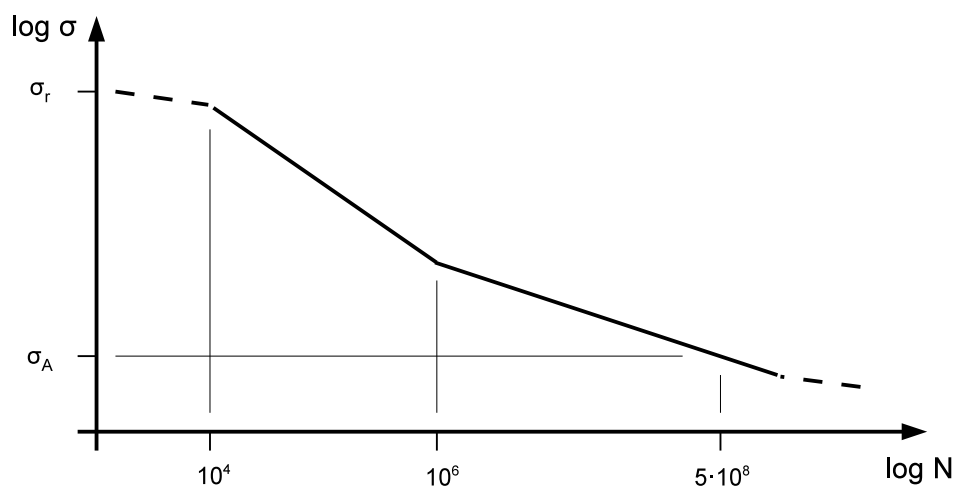


Figura 2.16: *Esempio di curva di Wöhler semplificata nel caso dell'alluminio.*

La pendenza inversa per le leghe di alluminio, almeno nella prima parte, non è dissimile a quella per gli acciai; può quindi essere pari a  $8 \div 10$  per provini lisci ed arrivare fino a  $3 \div 4$  per provini intagliati.[44]

Risulta comunque poco preciso parlare generalmente delle caratteristiche a fatica delle leghe di alluminio, poiché sebbene alcuni aspetti possano essere simili, il com-



portamento può essere anche molto vario tra leghe di classi diverse o sottoposte a diversi trattamenti termici. In particolare, le leghe delle classi 7000 e 5000 risultano essere le più resistenti a fatica, mentre dall'altro capo troviamo le leghe della serie 3000. Allo stesso modo, le leghe invecchiate presentano maggior resistenza rispetto a quelle ricotte, ma non raggiungono le caratteristiche delle leghe non trattabili termicamente. È stato tuttavia osservato che, pur mantenendo la graduatoria, ad elevato numero di cicli i comportamenti tendono ad avvicinarsi, riducendo le differenze tra le diverse classi di lega. Tale andamento è riportato, in modo semplificato, in *Figura 2.17a*. [54]

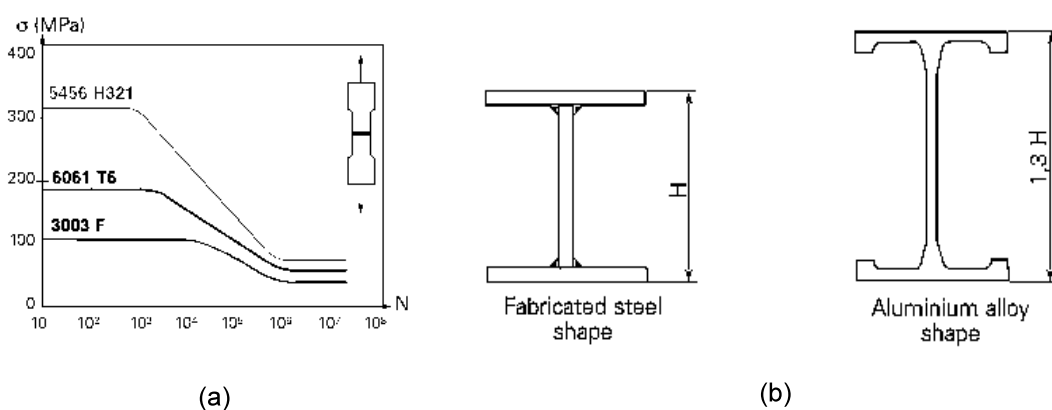


Figura 2.17: (a) Andamento semplificato delle curve di Wöhler per diverse classi di leghe. (b) Esempio di miglioramento della resistenza di un semilavorato di alluminio aumentandone il momento d'inerzia. [54]

A parità di sezione, le leghe di alluminio hanno una resistenza a fatica inferiore a quella degli acciai, ma la maggiore leggerezza consente di ottenere strutture più resistenti a parità di peso, o ancora meglio, ottimizzando la progettazione delle componenti come in *Figura 2.17b*, strutture sia più robuste che più leggere. Inoltre, non presentando transizione duttile-fragile alle basse temperature, l'alluminio risulta più affidabile nell'impiego in luoghi ove le condizioni climatiche sono più rigide. [35]

L'elevato numero di cicli per cui spesso occorre testare i provini rende di fatto inapplicabili le prove più convenzionali per le eccessive tempistiche, obbligando a ricorrere alle prove di fatica ultrasoniche o a particolari metodi accelerati per l'individuazione della resistenza a fatica a  $5 \cdot 10^8$  cicli, come la termografia del provino sollecitato o metodi a sollecitazione crescente, come il metodo di *Gough*, che si rifanno alle ipotesi di Miner viste nel paragrafo 2.2.4.

Le leghe leggere, essendo solitamente molto più duttili degli acciai, presentano un fattore di sensibilità all'intaglio più che doppio rispetto a questi ultimi. Ciò indica che l'effetto di raccordi a ridotto raggio o cricche nel materiale, seppur negativo,

risulta meno incisivo sulla resistenza a fatica. La loro scarsa durezza, tuttavia, le espone maggiormente a possibili danneggiamenti superficiali che possono essere causa di inneschi imprevisti di cricche.

Nel caso di saldature, la zona termicamente alterata risulta essere allo stato temprato ( $T_4$ ) o ricotto ( $O$ ), rispettivamente per le leghe termicamente trattabili e non. Entrambe le condizioni portano ad una riduzione anche significativa della resistenza a fatica in corrispondenza del cordone di saldatura, che risulta quindi essere critico anche nel caso dell'alluminio.

Nei profilati estrusi, la presenza di linee di estrusione, dovute al passaggio del materiale attraverso la matrice, causa un comportamento a fatica anisotropo. Infatti, per sollecitazioni in direzione trasversale rispetto a tali linee, esse agiscono da veri e propri intagli e, combinandosi all'effetto dovuto all'allungamento dei grani nella direzione di estrusione visto nel paragrafo 1.1.3, provocano una resistenza a fatica minore rispetto al caso di sollecitazioni longitudinali.[51]

Si è cercata come per gli acciai una correlazione tra resistenza statica e a fatica delle leghe d'alluminio, che rappresenta un dato comodo per stimare rapidamente il comportamento del materiale. Purtroppo, non è stato individuato un trend chiaro anche se esiste tuttavia una concordanza tra l'aumento della resistenza statica e il miglioramento del comportamento a fatica, più marcato sulle leghe che non hanno subito trattamenti termici rispetto alle leghe invecchiate.

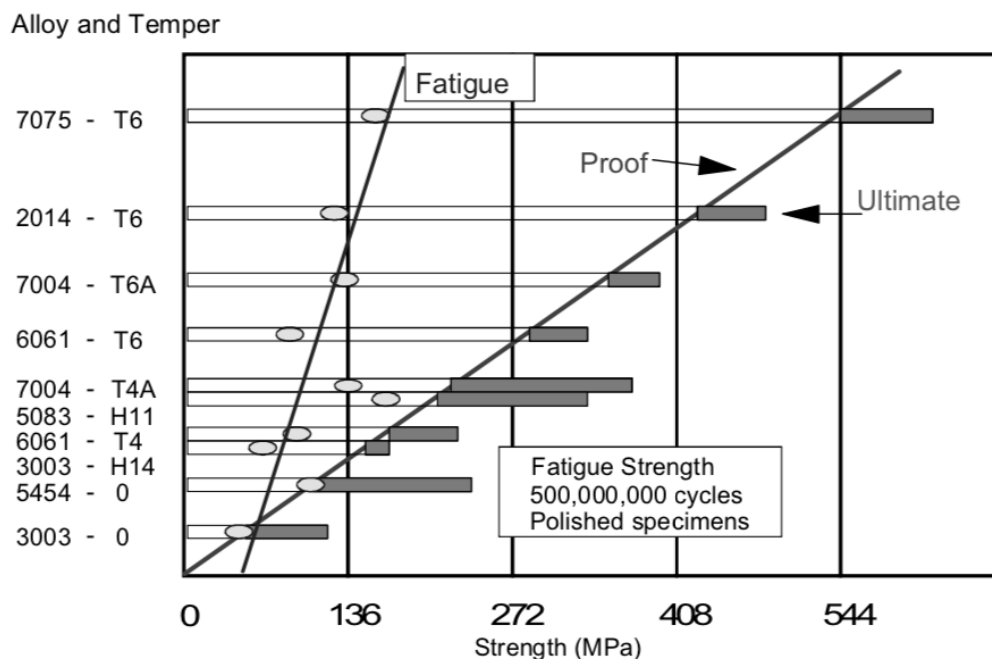


Figura 2.18: Confronto tra resistenza statica e a fatica per diverse tipologie di leghe di alluminio.[20]

Da *Figura 2.18* si nota inoltre come per le leghe a bassa resistenza, limite statico e resistenza a fatica ad altissimo numero di cicli siano piuttosto vicini, mentre si distanziano maggiormente per leghe con resistenza più alta. Infine, si è studiato come l'influenza del rapporto di ciclo diventi sempre minore al crescere del numero di cicli di vita utile, fino a risultare pressoché trascurabile oltre ai  $10^7$  cicli.[37]

Legato al movimento, creazione e ricombinazione dei difetti lineari all'interno dei grani vi è un effetto di indurimento o addolcimento del materiale con il progredire dei cicli a fatica. L'alternanza di sollecitazioni di trazione e compressione causa infatti un moto delle dislocazioni che, in base al tipo di lega in esame, vanno preferenzialmente a moltiplicarsi o ricombinarsi provocando rispettivamente un aumento o un calo dell'incrudimento e quindi una variazione delle caratteristiche meccaniche. Mentre, come vedremo in dettaglio nella sezione 3.1, nel primo caso l'effetto può essere molto positivo, l'addolcimento del materiale lo porta vicino alle caratteristiche dello stato ricotto riducendone la resistenza sia statica che a fatica.

Il motivo per cui l'alluminio non presenta limite di fatica è anch'esso legato al moto delle dislocazioni: al contrario degli acciai, infatti, non esiste una tensione minima al di sotto della quale i difetti risultano congelati bloccando la progressione del danneggiamento. Per questo motivo e vista la maggior variabilità del comportamento delle leghe di alluminio, sui manuali tecnici si consiglia spesso l'impiego di un grado di sicurezza nella progettazione maggiore rispetto a quello utilizzato per gli acciai.[35]



# Capitolo 3

## Le tensioni residue

### 3.1 Reticolo cristallino e suoi difetti

Le tensioni residue sia di trazione che di compressione giocano un ruolo importante nella fase di innesco della rottura per fatica, nonostante entrambe portino solitamente ad un aumento della resistenza meccanica statica. La conoscenza dei fenomeni che legano la difettologia del reticolo cristallino caratteristico dei metalli e l'innesco di cricche permette di dare un peso adeguato ai trattamenti che possono provocare difetti e scegliere il giusto compromesso tra miglioramento delle prestazioni statiche del materiale e comportamento a lungo termine.

Verranno in seguito spiegati i diversi tipi di difetti caratteristici della morfologia dei cristalli e i loro effetti macroscopici sul comportamento meccanico del materiale stesso.

#### 3.1.1 Legame metallico e reticoli cristallini

I materiali metallici si distinguono dalle altre tipologie di elementi chimici per la natura dei legami tra i loro atomi, detti appunto *legami metallici*. La grande distanza dei loro atomi di valenza dal nucleo ne rende facile il completo distacco e li lascia liberi di vagare attraverso la struttura del solido, motivo per cui i metalli sono buoni conduttori elettrici.

L'aspetto che ci interessa, tuttavia, riguarda gli ioni positivi restanti, che generano un sistema di legami reciproci non direzionali ma diffusi a tutti gli altri ioni metallici simili nelle circostanze. Questa simmetria nelle forze di attrazione-repulsione è causa di una ripetitività delle posizioni geometriche nei solidi, che vanno a formare strutture regolari dette *cristalli* estese anche ad atomi distanti tra loro. La particolarità del legame metallico è quella di conferire al materiale contemporaneamente

buona resistenza meccanica e facile deformabilità. Inoltre, la sua non specificità rende possibile l'alligazione di metalli di natura diversa.

La cella unitaria del reticolo, ovvero la forma geometrica solida composta dagli ioni e ripetuta periodicamente, può essere di 14 tipi diversi, ma la maggior parte dei metalli assume tre sole morfologie riportate in *Figura 3.1*: [41]

- *Cubico a corpo centrato (CCC)*. Gli ioni metallici occupano gli otto vertici di un cubo e il suo centro. Gli interstizi minori (*vuoti ottaedrici*) sono in corrispondenza del centro di ciascuna faccia e ciascuno spigolo, mentre gli interstizi maggiori (*vuoti tetraedrici*) si trovano a metà tra due centri ottaedrici contigui e sono quindi quattro per faccia;
- *Cubico a facce centrate (CFC)*. Gli ioni metallici occupano ciascun vertice e il centro di ogni faccia di un cubo. Gli interstizi maggiori si minori si trovano in corrispondenza di ogni spigolo e al centro del cubo, mentre gli interstizi maggiori sono al centro degli otto piccoli cubi in cui si può suddividere la cella unitaria;
- *Esagonale compatto (EC)*. Gli ioni metallici occupano i sei vertici e il centro di ciascuna base, mentre altri tre ioni si dispongono secondo un triangolo equilatero a metà distanza tra le basi. Gli interstizi sono al centro di ciascun ottaedro e tetraedro individuabile tra due celle unitarie affiancate, da cui appunto devono il nome.

Altre morfologie esistenti, ma meno frequenti, sono la forma cubica o esagonale semplice e la forma tetragonale.

Analizzando la densità atomica e la disposizione dei piani cristallini delle varie strutture, si può osservare che quella CFC risulta più plastica e malleabile poiché la distanza tra due posizioni consecutive è minore e quindi lo scorrimento risulta più facilitato; la struttura CCC si posiziona nel mezzo mentre quella esagonale risulta la più rigida.

Mentre la maggior parte dei metalli presenta un'unica forma cristallina, alcuni di essi come ferro o cobalto possono esistere con più morfologie in relazione alla loro temperatura; tale fenomeno è detto *polimorfismo* o *allotropia*.

Le leghe possono essere di tipo interstiziale o per sostituzione. Nel primo caso, l'alligante è un elemento con dimensione atomica ridotta e che riesce a trovare posto all'interno degli interstizi; nel secondo gli atomi dell'alligante si sostituiscono a quelle del metallo e, in base alla natura del soluto, la soluzione può essere disordinata o ordinata o si possono formare fasi intermedie dovute a legami chimici, tipicamente quando il soluto è un non metallo.

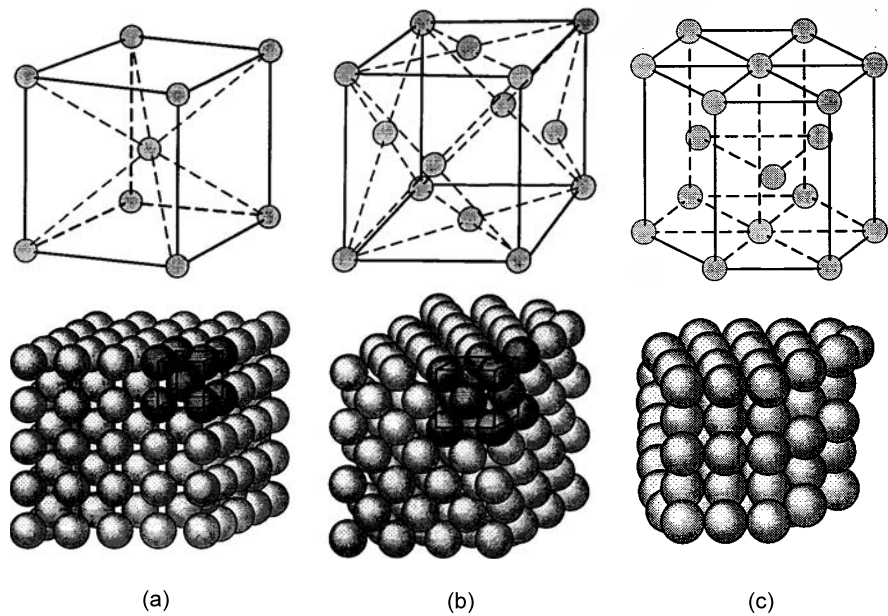


Figura 3.1: *Reticoli cristallini e loro impilamento: (a) cubico a corpo centrato, (b) cubico a facce centrate, (c) esagonale compatto.*[41]

### 3.1.2 I difetti puntiformi

I cristalli metallici nella realtà non compongono un reticolo perfetto ma sono soggetti a imperfezioni; in ambito metallurgico, tuttavia, il termine *difetto* non ha sempre un'accezione negativa ma viene spesso ricercato, poiché un'irregolarità nella struttura cristallina può avere conseguenze positive da un punto di vista pratico.

I difetti puntiformi si possono distinguere in tre categorie: lacune, atomi interstiziali e atomi di sostituzione. La prima tipologia è molto importante poiché è la responsabile della diffusione atomica nei metalli. Esse si formano a causa dell'agitazione termica quando un atomo del reticolo con sufficiente energia lascia la propria posizione creando una lacuna che può spostarsi verso la superficie o verso il centro del grano. La concentrazione di questi difetti cresce con la temperatura ed è possibile aumentarla con appositi trattamenti come la tempra da alte temperature, il bombardamento con particelle nucleari, la deformazione plastica a freddo (incrudimento) o l'ossidazione per alcuni metalli.

Gli altri due difetti prendono in considerazione atomi di altri elementi e distinguono le due tipologie di leghe viste nel paragrafo 3.1.1. Si possono avere atomi sostituzionali che vanno a prendere il posto nel reticolo degli atomi del materiale base poiché hanno dimensioni simili ma non uguali ad essi, oppure atomi interstiziali di dimensione minore che si posizionano appunto negli interstizi del reticolo. Può accadere che atomi del materiale stesso si posizionino nei vuoti: si parla in tal caso

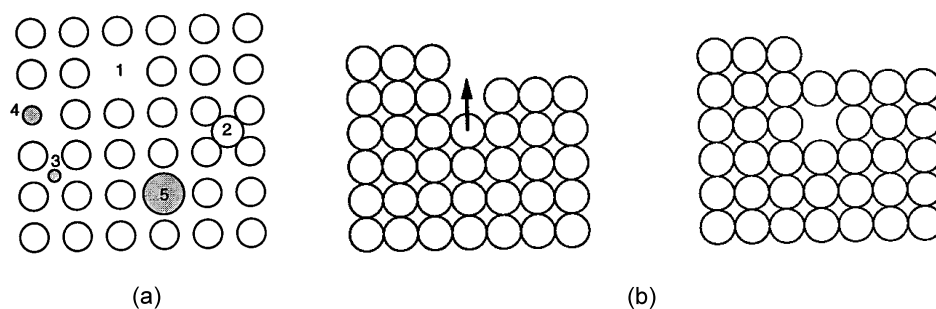


Figura 3.2: (a) Difetti puntiformi: (1) lacuna, (2) atomo autointerstiziale, (3) atomo interstiziale, (4) e (5) atomi sostituzionali. (b) Formazione di una lacuna.[41]

di atomi *autointerstiziali*.

Ciascuno di questi difetti causa una distorsione del reticolo, che verrà messo in trazione o in compressione in base alla natura del difetto, come osservabile in *Figura 3.2a*.

### 3.1.3 I difetti lineari

I difetti lineari, detti anche *dislocazioni*, possono essere di tipo a spigolo, elicoidale o misto. Le dislocazioni a spigolo sono costituite da un semipiano supplementare di atomi che si frappone tra i piani regolari e viene indicata con il simbolo  $\perp$  se ci si riferisce all'estremo inferiore del semipiano o  $\top$  se a quello superiore. Le dislocazioni a elica si ottengono invece facendo traslare un gruppo di cristalli di uno o più piani cristallini. Alcuni esempi sono riportati in *Figura 3.3*.

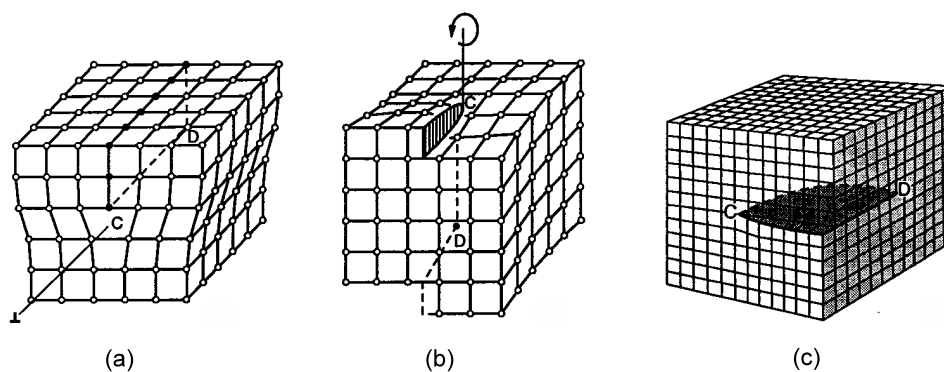


Figura 3.3: Esempi di dislocazioni: (a) a spigolo, (b) a elica, (c) mista.[41]

Un difetto lineare è caratterizzato dalla lunghezza  $L$  della *linea di dislocazione* e dal suo *vettore di Burgers*  $\vec{b}$ . Per individuare tale vettore è necessario individuare un circuito chiuso in un reticolo perfetto e ripetere gli stessi passi in uno contenente una dislocazione: i passi necessari alla richiusura del circuito nel secondo caso ne



determinano modulo e direzione. Come visibile in *Figura 3.5*, nel caso di un difetto a spigolo il vettore sarà quindi perpendicolare alla linea di dislocazione, mentre sarà parallelo per difetti elicoidali.[9]

Ogni dislocazione è associata ad un campo di tensioni elastiche provocate dalla distorsione del reticolo circostante, che danno indicazione anche dell'energia necessaria per far muovere la dislocazione provocando quindi una deformazione plastica. Una dislocazione a elica genera un campo di tensione puramente torsionale, tanto più elevato quanto più volume è coinvolto nella dislocazione. In una dislocazione a spigolo le sollecitazioni in gioco sono invece più complesse: i legami tra gli atomi risultano compressi se al di sopra del piano di scorrimento e in trazione se posti al di sotto. Sono inoltre presenti sia sforzi idrostatici che di taglio. L'energia di deformazione necessaria per muovere le dislocazioni è direttamente legata alla resistenza macroscopica del materiale e può essere calcolata rispettivamente con le seguenti formule:

$$E_{dis,el} = G \cdot L \cdot \vec{b}^2 \qquad E_{dis,sp} = \frac{G \cdot L \cdot \vec{b}^2}{1 - \nu}$$

dove  $\nu$  è il modulo di Poisson e  $G$  il modulo elastico tangenziale. Ne consegue che materiali con legami molto forti, e quindi con modulo elastico elevato, necessitano di una maggiore energia per essere deformati e che per ridurre l'energia totale le dislocazioni tendono naturalmente a contrarsi riducendo  $L$ .

### 3.1.4 I difetti superficiali

Con tali difetti si intendono le imperfezioni presenti in una massa metallica che si estendono in due direzioni e si suddividono in difetti dei giunti dei grani e difetti di impilamento. La coesistenza di diversi grani in una matrice metallica è dovuta al fatto che, in fase di raffreddamento, la solidificazione inizia contemporaneamente in più zone della fase liquida. Alla quasi completa solidificazione, le ultime frazioni di liquido interposte ai grani sono solitamente sottoposte a campi di forze diversi rispetto a quelle che hanno prodotto il resto dei cristalli poiché essi sono attratte da più grani solidi vicini. Nel caso di leghe, inoltre, si possono avere composizioni chimiche diverse frutto dei residui rimasti in soluzione.

La presenza dei giunti tra i grani provoca un aumento dell'energia all'interno del reticolo che dipende dal numero di atomi in posizione distorta e dall'entità delle distorsioni. Ai bordi del grano si avrà quindi una notevole densità di dislocazioni e lacune, nonché una maggiore concentrazione di alliganti o impurezze bassofondenti.

I difetti di impilamento invece sono frutto di irregolarità nella periodicità del reticolo cristallino del metallo a causa della dell'assenza di un piano cristallino o

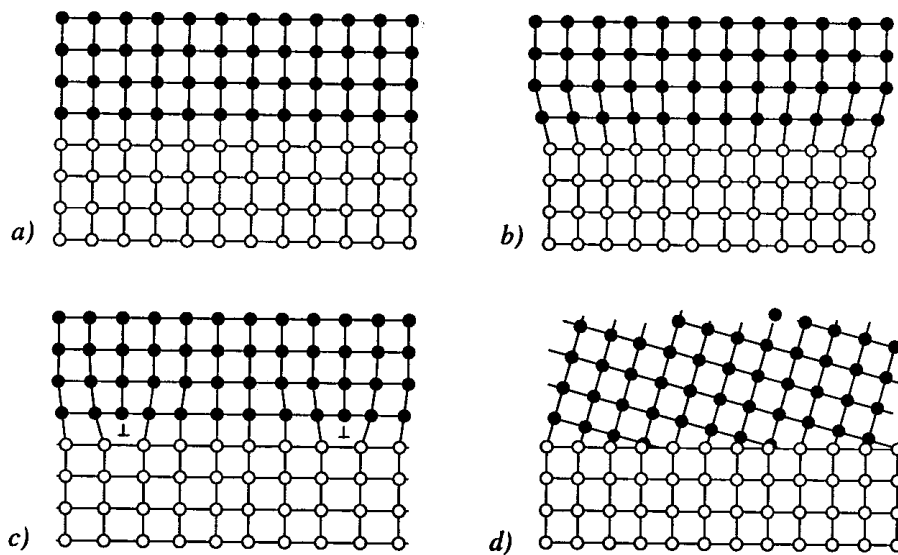


Figura 3.4: *Tipologie di bordo grano: (a) perfettamente coerente, (b) coerente con deformazione plastica, (c) semicoerente, (d) incoerente.*[41]

della sua aggiunta. Anche questi difetti causano un aumento dell'energia interna del reticolo che va a sommarsi a quella provocata dalle altre tipologie di difetti.

### 3.1.5 La mobilità dei difetti lineari

Sebbene tutte le tipologie di difetti abbiano la possibilità di muoversi, quantomeno per diffusione, il movimento delle dislocazioni è quello che risulta più interessante sia per le particolari modalità con cui avvengono sia per gli effetti macroscopici che hanno sulla resistenza meccanica.

Le dislocazioni possono muoversi per scorrimento (*glide*) o per salto (*climb*). Il movimento per scorrimento avviene sotto l'azione di uno sforzo di taglio e lungo un piano detto appunto *piano di scorrimento* che è parallelo al vettore di Burgers nel caso di dislocazioni a spigolo e perpendicolare ad esso nel caso di dislocazioni ad elica, come visibile in *Figura 3.5*.

Le dislocazioni a spigolo possono muoversi anche per salto, liberandosi dell'ultima fila di atomi del semipiano supplementare o acquisendo una fila ulteriore, con la relativa scomparsa o formazione di vacanze e atomi interstiziali; nel primo caso si parla di *scalata positiva*, nel secondo di *scalata negativa*.

Diverse dislocazioni possono interagire tra loro e il risultato dipende dal loro orientamento reciproco. Dislocazioni concordi in segno e su piani di scorrimento simili si respingono, mentre se sono su piani molto diversi si attraggono. Dislocazioni discordi invece si combinano ripristinando il reticolo perfetto se sullo stesso piano o generando lacune o atomi interstiziali se su piani diversi.

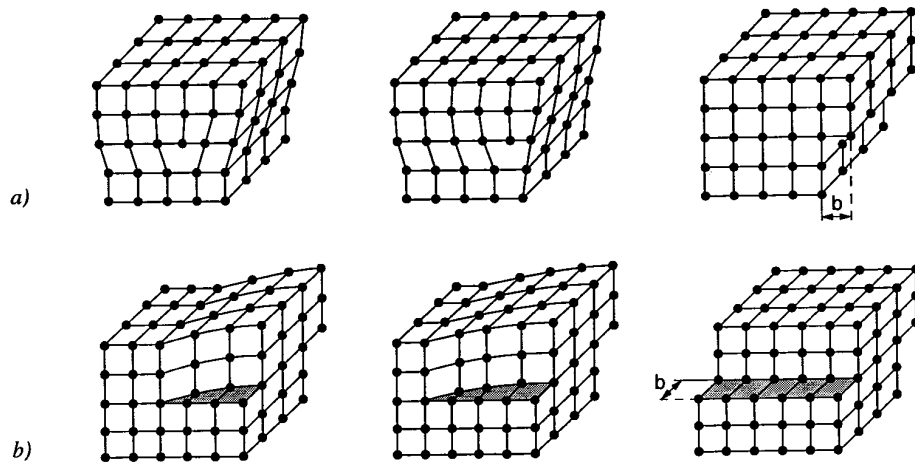


Figura 3.5: Andamento del vettore di Burgers: (a) per dislocazioni a spigolo, (b) per dislocazioni a elica.[41]

La presenza di atomi in lega può influire sulla facilità di movimento dei difetti lineari. Atomi di sostituzione con dimensione maggiore o atomi interstiziali tendono infatti a migrare verso la zona dilatata del reticolo, mentre gli atomi di sostituzione più piccoli verso quella compressa, con l'effetto di mitigare le tensioni dovute alla dislocazione. Si crea quindi un ammasso di atomi estranei nella vicinanza del difetto, detto *atmosfera di Cottrell*, che esercitano un'azione di ancoraggio su quest'ultima rendendone più difficile lo scorrimento, ritardando la deformazione plastica e provocando l'aumento delle caratteristiche meccaniche di cui si è ampiamente discusso nella sezione 1.2 per il caso delle leghe di alluminio.

Quando una dislocazione, mossa da sforzi di taglio, incontra particelle di una fase diversa dalla matrice può attuare comportamenti molto diversi. Nel caso di un difetto a spigolo, esso può superare l'ostacolo con il già citato meccanismo del salto, mentre un difetto elicoidale tenderà a deviare su un piano adiacente aggirandolo; se il reticolo del precipitato è coerente con quello della matrice, la dislocazione può anche attraversare la particella tagliandola.

Comportamento particolare si ha quando le particelle siano più di una, come mostrato in *Figura 3.6*, e si verifica il *meccanismo di Orowan*: la dislocazione in tal caso si sdoppia in una anulare che avvolge la particella e una rettilinea che prosegue oltre l'ostacolo. Può accadere infine che la dislocazione non superi l'ostacolo e rimanga bloccata mentre altre dislocazioni si addossano a essa, impilandosi.

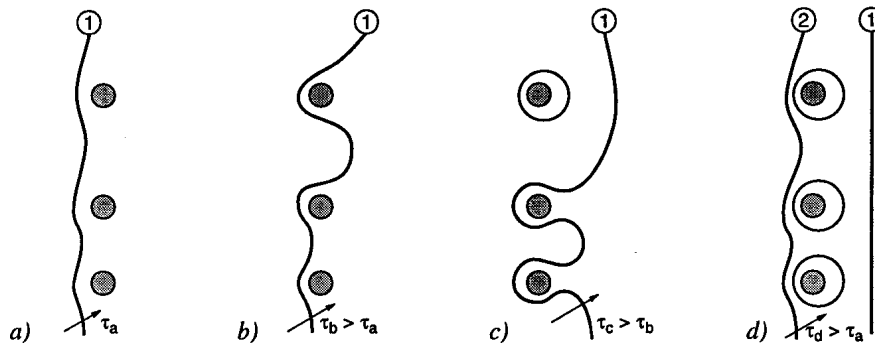


Figura 3.6: *Fasi dello spostamento di una dislocazione secondo il meccanismo di Orowan.*[41]

### 3.1.6 La deformazione plastica

Un cristallo può deformarsi in modo permanente attraverso due meccanismi: la *geminazione* e lo *scorrimento*. Nel primo caso, alcuni atomi del cristallo sollecitato a taglio mutano disposizione in modo da ricreare l'immagine speculare degli altri rimanenti rispetto a un piano detto di geminazione che, talvolta, può essere coincidente con il giunto tra i grani.

Nel caso dello scorrimento, invece, nel cristallo soggetto a taglio si verifica una traslazione di un blocco di atomi. Se la tensione tangenziale è ridotta, gli atomi si spostano solo leggermente dalla loro posizione iniziale e una volta eliminato lo sforzo, una forza di richiamo li riporta in posizione per ridurre l'energia libera nel reticolo. Se la tensione è invece maggiore, gli atomi vanno a prendere il posto di quelli a fianco, trovando una nuova posizione stabile e provocando quindi una deformazione permanente.

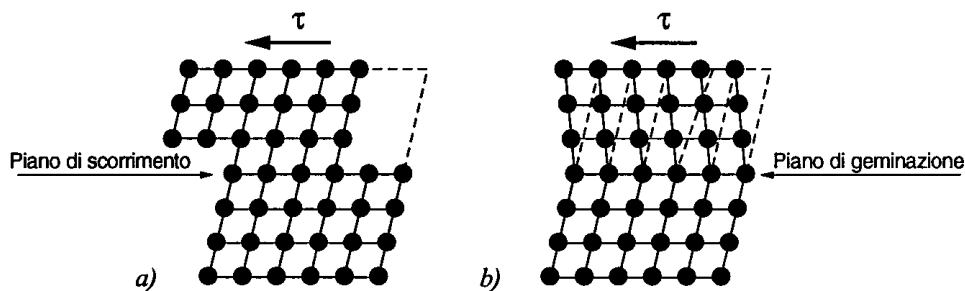


Figura 3.7: *Deformazioni plastiche: (a) per scorrimento, (b) per geminazione.*[41]

La tensione critica calcolata teoricamente, tuttavia, è notevolmente maggiore di quella misurata sperimentalmente.[41] Le motivazioni di tale discordanza sono da ricercare nella presenza di imperfezioni nel reticolo reale che ne vanno ad indebolire la struttura rispetto a un cristallo perfetto: vacanze, atomi estranei, giunti dei grani

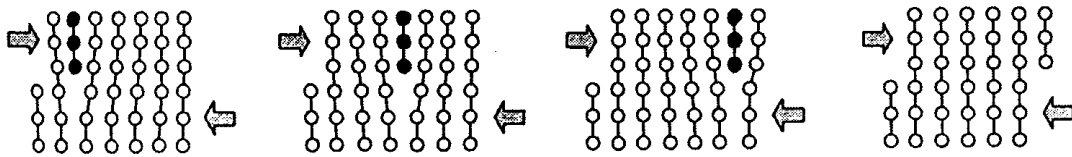


Figura 3.8: *Fasi del moto di una dislocazione a spigolo.*[41]

e soprattutto dislocazioni vanno ad alterare l'energia necessaria a provocare una deformazione permanente.

Per quanto riguarda le dislocazioni e soffermandosi su quelle a spigolo per semplicità, si è già parlato nel paragrafo 3.1.3 di come esse provochino una zona in cui i legami sono in tensione affiancata da una in compressione. Questa condizione facilita lo scorrimento con file di atomi che si legano al semipiano supplementare facendo muovere la dislocazione in direzione concorde con la tensione imposta fino a che essa non raggiunge il bordo grano, come visibile in *Figura 3.8*.

Va anche notato che le deformazioni sono sempre causate da sollecitazioni di taglio rispetto all'orientazione del reticolo, che può essere diversa per ciascun grano. È opportuno quindi valutare nello studio la componente efficace dello sforzo applicato in relazione alla direzione del piano di scorrimento preferenziale.

### 3.1.7 Il fenomeno dell'incrudimento

I fenomeni appena riportati permettono di analizzare meglio il fenomeno dell'incrudimento, di cui si è parlato nel paragrafo 1.1.3. L'incrudimento avviene nei cristalli, soprattutto se CFC come l'alluminio, in corrispondenza di deformazioni plastiche e, considerando per semplicità un monocristallo, si possono evidenziare tre stadi di incrudimento:[41]

- nel primo stadio le dislocazioni si muovono su un solo sistema di scorrimento, quello con mobilità più facile, per distanze relativamente lunghe e senza ostacoli. Si ha quindi un incrudimento piuttosto ridotto;
- nel secondo stadio l'incrudimento diventa più rilevante ma con andamento lineare in base allo sforzo applicato e i piani interessati appartengono a più sistemi di scorrimento;
- nel terzo stadio la velocità di incrudimento diminuisce a causa del riassetto dinamico, con la tensione che varia parabolicamente con la deformazione.

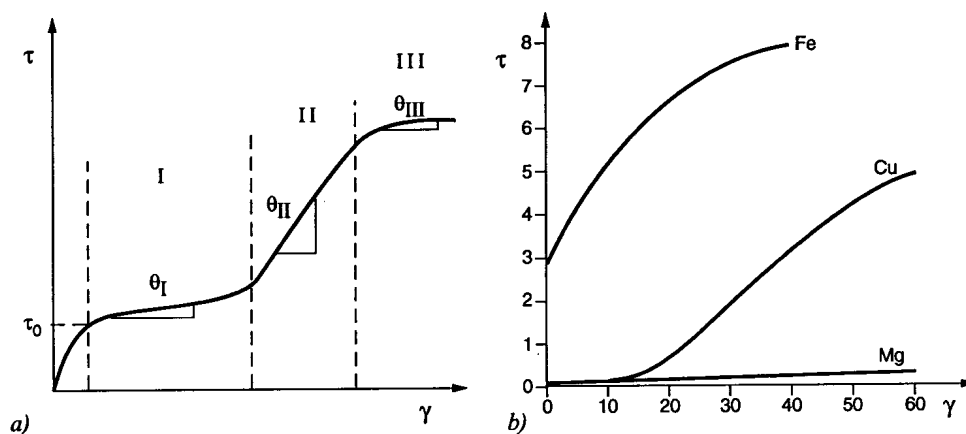


Figura 3.9: (a) Stadi dell'incrudimento. (b) Incrudimento per monocristalli metallici CCC (Fe), CFC (Cu), EC (Mg).[41]

I tre stadi, in verità, non sono sempre chiaramente distinguibili in quanto la loro estensione dipende da molti fattori tra cui la temperatura, la purezza del metallo, il tipo di reticolo e l'orientazione iniziale.

Nel caso reale, tuttavia, i metalli sono composti da un gran numero di cristalli orientati a caso perciò, se si applica una tensione al pezzo metallico, la deformazione varierà localmente da grano a grano. Un aumento progressivo di tale sforzo porta le dislocazioni nei grani orientati parallelamente ad esso a muoversi, mentre gli altri grani subiscono un trascinamento che man mano aumenta il numero di grani orientati parallelamente. I bordi grano, però, rappresentano barriere spesso insormontabili per le dislocazioni che si fermano, impilandosi e migliorando la resistenza meccanica rispetto ad un metallo monocristallino.

Se la spinta dovuta all'impilamento dislocativo non supera la resistenza di rottura del cristallo il giunto trasmette lo sforzo ai grani adiacenti, altrimenti si crea una microfessura che può rappresentare l'innescò di una cricca.

La mancanza di simultaneità nelle deformazioni plastiche dei grani fa sì che, al cessare della sollecitazione, la deformazione macroscopica sia solo la media delle deformazioni dei singoli grani, per cui quelli meno stirati si troveranno in trazione e viceversa quelli maggiormente stirati saranno in compressione. Si ottiene quindi ciò che è visibile in *Figura 3.10*: un aumento della densità delle dislocazioni dovute all'incrudimento fa aumentare proporzionalmente la tensione di snervamento del materiale rispetto allo stato ricotto, ancor più se presenta grana fine e quindi più bordi grano. La densità delle dislocazioni non deve essere tuttavia eccessiva poiché renderebbe il metallo troppo fragile e soggetto a criccate per eccessive tensioni residue e mancanza di ulteriore plasticità.

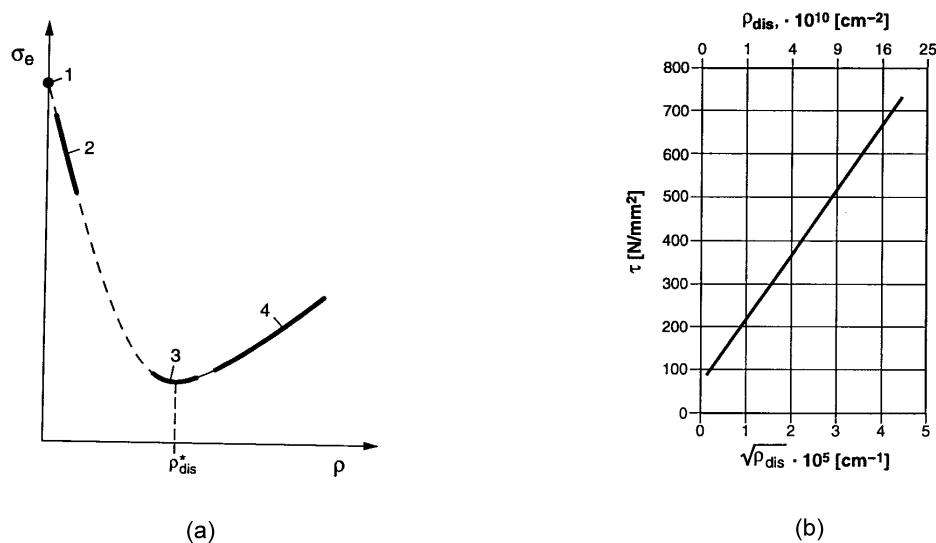


Figura 3.10: (a) Andamento della resistenza meccanica in base alla densità di dislocazioni: (1) materiale teorico, (2) provini whiskers da laboratorio, (3) ricottura profonda, (4) incrudimento. (b) Andamento proporzionale della tensione di snervamento in funzione della densità delle dislocazioni nella zona 4.[41]

## 3.2 Il fenomeno delle tensioni residue

Benché il concetto dell'esistenza di tensioni residue sia stato formalizzato già nella prima metà del XIX secolo, ancora oggi è un fenomeno largamente sottostimato e spesso trascurato. Esso tuttavia riguarda la grandissima maggioranza dei materiali tecnici, si manifesta su ogni manufatto che subisca una lavorazione meccanica, un trattamento termico, un processo chimico o metallurgico e può influire pesantemente sulle prestazioni meccaniche dei componenti.

In seguito, le tensioni residue verranno espone nel dettaglio, analizzandone gli aspetti peculiari, le cause e gli effetti sul materiale in esame.

### 3.2.1 Definizione

Riguardo alle tensioni residue sono state nel tempo proposte diverse definizioni, ma una delle più semplici e chiare è la seguente:

*"dato un corpo in condizioni di equilibrio termico e non soggetto a sollecitazioni meccaniche esterne, si definiscono tensioni residue tutte quelle tensioni presenti all'interno del corpo indipendentemente dalla condizione di equilibrio con l'ambiente circostante."*[14]

Esse vengono definite *residue* in relazione al fatto che hanno natura residuale rispetto ai processi a cui il materiale è stato sottoposto. In inglese, oltre al termine

*residual stress*, si è progressivamente affermato anche *lock-in stress*, ossia "tensioni bloccate all'interno", che rende forse meglio l'idea della natura di queste tensioni.

Sfruttando lo schema di *Figura 3.11* possiamo avere una rappresentazione intuitiva di tale concetto. Nello schema (a) è rappresentato un sistema composto da due elementi rigidi connessi attraverso due elementi elastici, il tutto in equilibrio in assenza di sforzi. Nello schema (b) è invece stato aggiunto un terzo elemento elastico di lunghezza libera maggiore: il sistema raggiunge una nuova condizione di equilibrio in cui sulle molle precedenti si registra una sollecitazione di trazione mentre la molla appena inserita sarà in uno stato di compressione. Riconducendo questo semplice modello alla realtà microscopica dei materiali, le tensioni presenti sugli elementi elastici possono ben rappresentare le tensioni residue presenti all'interno di una singola zona del materiale.

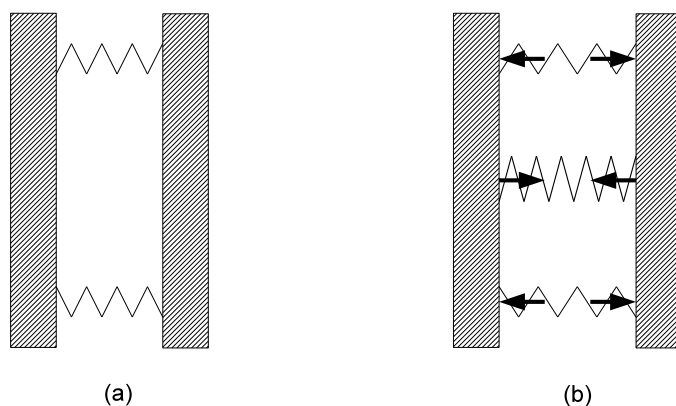


Figura 3.11: *Schema intuitivo del concetto di tensioni residue.*

Dall'esempio traspare che tali tensioni non entrano in gioco nell'equilibrio dell'elemento verso l'esterno ma si autobilanciano completamente all'interno di esso. In termini più rigorosi, le tensioni residue si instaurano ogni qualvolta all'interno del materiale sono presenti delle disomogeneità a livello di reticolo cristallino, come i difetti analizzati nella sezione 3.1, o del comportamento fisico o meccanico nel caso di fasi diverse o materiali compositi. Poiché le tensioni residue possono manifestarsi in svariate forme e modi, si tende a categorizzarle in base a due diversi fattori: la lunghezza caratteristica e la causa della loro presenza.

### 3.2.2 La lunghezza caratteristica

La categorizzazione in base alla dimensione spaziale su cui si sviluppa lo stato tensionale è quella ingegneristicamente più significativa. In particolare, si definisce *lunghezza caratteristica* la dimensione spaziale entro cui una determinata tensione residua si equilibra. Conoscere tale proprietà permette di scegliere il sistema di



misura più consono per l'osservazione e di discriminare il significato e l'effetto dello stato tensionale stesso. In base alla lunghezza caratteristica si possono distinguere le tre tipologie di tensioni residue descritte in seguito.[14]

**Tipo I.** La loro lunghezza caratteristica è di ordine superiore a quella del grano, fino ad arrivare a coincidere con quella dell'intero componente. L'andamento di tali tensioni si presenta omogeneo su porzioni di materiale dimensionalmente significative e quindi la loro analisi può essere svolta utilizzando i tradizionali modelli continui per il materiale. Tali stati tensionali vengono comunemente associati ai processi termici o meccanici subiti dal materiale in ambito industriale, capaci di indurre nel materiale deformazioni elastiche o plastiche non omogenee. Va rimarcato che questo tipo di tensione residua può essere presente in tutti i materiali tecnici, quindi non solo nei metalli ma anche in compositi, plastiche e legno.

**Tipo II.** La loro lunghezza caratteristica è dello stesso ordine di grandezza del grano e sono solitamente causate da fenomeni di interfaccia tra i grani o da disomogeneità tra grani adiacenti. Alcuni esempi di tale tipologia di tensioni si trovano negli acciai martensitici qualora vi sia presente dell'austenite residua: il diverso volume specifico delle due strutture fa sì che la non completa trasformazione dell'austenite in martensite provochi uno stato tensionale tra i grani adiacenti. Un altro esempio è riscontrabile sull'interfaccia tra fibra e matrice nei materiali compositi.

**Tipo III.** La loro lunghezza caratteristica è inferiore alla dimensione del grano. Esse sono quindi causate da disomogeneità interne al grano, come dislocazioni, vacanze o altre imperfezioni del reticolo che si riequilibrano all'interno del grano stesso.

Le tensioni residue di primo tipo vengono comunemente indicate come *macro-tensioni residue*, mentre quelle di secondo e terzo tipo come *micro-tensioni residue*. L'interesse ingegneristico si sofferma sulla tipologia più macroscopica, poiché direttamente coinvolta nel computo delle caratteristiche meccaniche, mentre le altre tipologie vengono considerate solamente come portatrici di informazioni sulla qualità del materiale utilizzato. In realtà, diversi fenomeni macroscopici hanno un innesco che avviene per fenomeni intergranulari, come si è visto per le cricche a fatica nel paragrafo 2.1.3, e l'analisi degli stati tensionali microscopici può fornire a riguardo informazioni significative. Comunque sia, a prescindere dalla loro tipologia, l'effetto quantitativo complessivo delle tensioni residue in un punto è dato da una semplice combinazione lineare, così come è lineare la combinazione con le eventuali tensioni statiche o dinamiche imposte dall'esterno, come trattato nel paragrafo 3.2.4.

### 3.2.3 Natura delle tensioni residue

Come già detto alla fine del paragrafo 3.2.1, le tensioni residue nascono da una disomogeneità delle caratteristiche meccaniche o metallurgiche tra zone adiacenti all'interno del materiale. L'origine di tali differenze sono riconducibili a quattro tipi di causa spesso interagenti tra loro e descritti in dettaglio a seguire.[16]

**Variazioni termiche.** Nel caso di tensioni residue termicamente indotte, i possibili motivi che portano a disomogeneità sono la variazione di temperatura in materiali multifasici le cui fasi abbiano coefficienti di dilatazione termica molto diversi o processi di raffreddamento non omogenei che portano a deformazioni differenziali tra le diverse zone dello stesso componente.

Quest'ultima evenienza è tipica di saldature e trattamenti termici bruschi, come la tempra, ed è la principale causa di tensioni residue nel cuore di componenti massivi, oltre che in superficie, tanto che spesso si possono verificare rotture durante il raffreddamento per le elevatissime tensioni interne provocate, di cui si riporta un esempio in *Figura 3.12*.

Analizzando inoltre leghe multifasiche costituite da grani aventi diversa struttura dopo il raffreddamento, si registrano anche forti stati tensionali residui dovuti proprio alla diversa variazione di volume dei singoli grani in un contesto più o meno rigidamente vincolato.

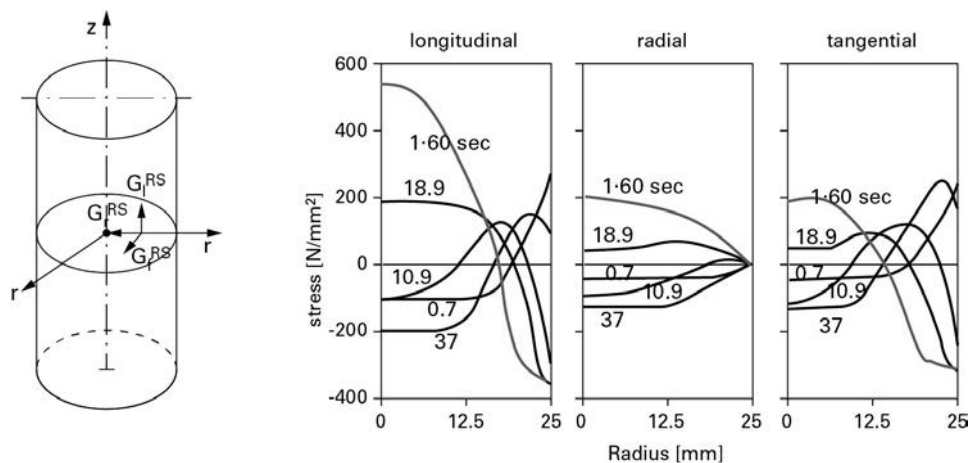


Figura 3.12: *Evoluzione delle tensioni residue per un provino in acciaio temprato in acqua da 600°C. Si nota come le tensioni residue si avvicinino ai 600 MPa.*[38]

**Lavorazioni meccaniche.** Anche in questo caso si possono distinguere due motivazioni per la presenza di tensioni residue: l'asportazione di truciolo e la deformazione plastica. Relativamente al primo caso, è impossibile generalizzare gli effetti di una

lavorazione di questo tipo poiché le variabili che entrano in gioco sono molteplici ed è troppo riduttivo considerare solo il puro e semplice meccanismo di asportazione di truciolo. Variando infatti parametri quali velocità di lavorazione, orientazione dell'utensile o profondità di passata l'effetto finale può essere completamente stravolto, come visibile in *Figura 3.13*.

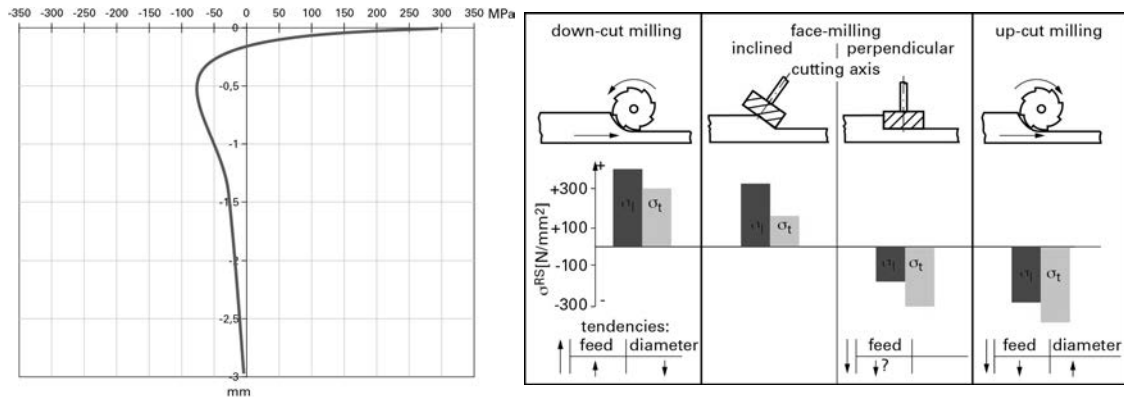


Figura 3.13: Andamento delle tensioni residue lungo lo spessore tipiche di una lavorazione per asportazione di truciolo e diversi risultati ottenibili variando leggermente la lavorazione.[38]

Per quanto riguarda invece le lavorazioni per deformazione plastica, lo stato tensionale residuo diventa funzione di un *parametro di forma*, rapporto tra la sezione del materiale e la superficie di contatto con l'elemento deformante. Se tale rapporto risulta inferiore all'unità, ovvero con forti rapporti di riduzione, la deformazione risulta omogenea nella sezione e non si producono tensioni residue; all'aumentare del parametro di forma, tale omogeneità viene persa e nascono tensioni residue che sono solitamente di trazione in superficie e di compressione a cuore. Quando il rapporto raggiunge valori molto elevati, quindi con bassissimi rapporti di riduzione su ampie sezioni di materiale senza che le deformazioni raggiungano il cuore, si ha invece un'inversione del profilo delle tensioni, con uno strato di compressione in superficie che ne migliora le caratteristiche meccaniche. Tali lavorazioni sono dette *skin pass*. Per queste ultime lavorazioni, risulta particolarmente pericoloso il caso di distribuzione delle tensioni residue in modo asimmetrico rispetto all'asse, quando anche piccole asportazioni di materiale in superficie potrebbero portare a distorsioni geometriche del pezzo.

**Reazioni chimiche.** In questo caso le tensioni possono essere indotte da variazioni di volume in seguito a reazioni chimiche, come spesso avviene con l'ossidazione, per precipitazione o per trasformazione di seconde fasi. Alcuni processi vengono

espressamente utilizzati allo scopo di creare tensioni residue superficiali migliorative delle caratteristiche meccaniche, come la cementazione e la nitrurazione.

**Transizioni di fase.** I cambiamenti di fase possono avvenire per meccanismo diffusivo o ricostruttivo.[16] Nel primo caso, la struttura cristallina finale risulta dalla deformazione ordinata di quella iniziale e prevede la presenza di un piano invariante, mentre le variazioni dimensionali avvengono sui piani perpendicolari ad esso; è il caso tipico della martensite negli acciai. Nel secondo caso, l'intera massa di atomi subisce una diffusione casuale e la struttura finale risulta non correlata con quella iniziale.

### 3.2.4 Effetti delle tensioni residue

Prima di analizzare gli effetti delle tensioni residue, è necessario ricordare che esse devono essere trattate alla stregua di tutte le tensioni di altra natura e quindi combinate con esse. Occorre innanzitutto uniformare gli assi principali di tensioni residue ed esterne calcolandone le relative componenti lungo le direzioni degli assi principali scelti come riferimento per l'intero pezzo meccanico.

Fatto ciò, è possibile quantificare direttamente il contributo delle tensioni residue rispetto allo stato di sollecitazione complessiva, utilizzando un qualsiasi criterio di resistenza. Utilizzando ad esempio il criterio di Von Mises, la tensione equivalente frutto della combinazione tra sollecitazione applicata e residua risulta la seguente:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_x^{sa} + \sigma_x^{sr})^2 + (\sigma_y^{sa} + \sigma_y^{sr})^2 - (\sigma_x^{sa} + \sigma_x^{sr})(\sigma_y^{sa} + \sigma_y^{sr}) + 3(\tau_{xy}^{sa} + \tau_{xy}^{sr})^2}$$

Dall'equazione è facile notare come la presenza di tensioni residue abbia effetti migliorativi o peggiorativi sulla resistenza del componente a seconda della natura trattiva o compressiva che esse assumono. In termini di qualità statiche, solo i materiali fragili presentano un effetto migliorativo dovuto alle tensioni residue a riposo, come nel caso del vetro temprato, mentre i materiali plastici ne beneficiano solo in minima parte, in quanto l'approssimarsi della condizione di plasticizzazione in esercizio porta comunque gli stati tensionali interni ad essere trascurabili.

Completamente diverso, invece, è il discorso per quanto riguarda il comportamento a fatica, dove gli effetti della presenza di tensioni residue sono sempre tutt'altro che trascurabili; nel caso in cui il componente sia sottoposto in esercizio ad un elevato numero di cicli ad ampiezza ridotta, in particolare, la riduzione della vita utile rispetto a quella teorica risulta molto netta.

Data la natura statica delle tensioni residue, un modo efficace per tenerle in considerazione è quello di sfruttare i diagrammi di Goodman-Smith e di Haigh, che come visto nei paragrafi 2.2.1 e 2.1.4 permettono di trovare la zona di esercizio in sicurezza in base alla tensione media e alla sua ampiezza, e modificarli opportunamente come nell'esempio di *Figura 3.14*. Da essa è possibile osservare come tensioni residue di tipo trattivo comportino sempre un peggioramento del limite di fatica, mentre tensioni residue di tipo compressivo siano positive per bassi valori delle stesse mentre risultano a loro volta dannose per valori maggiori.

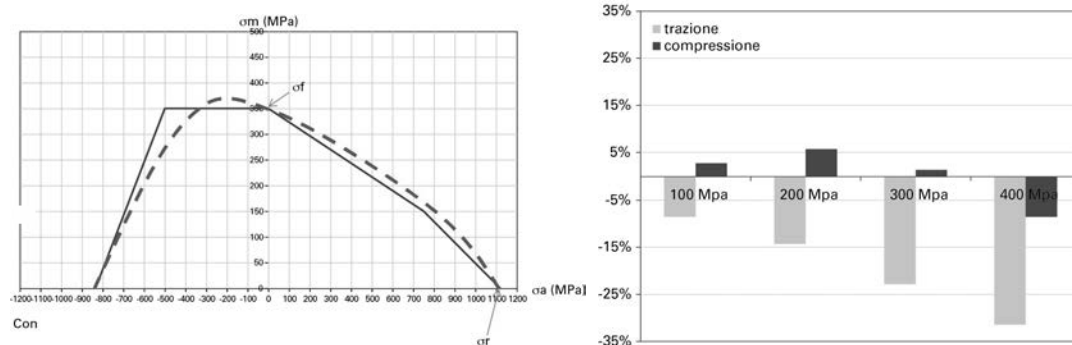


Figura 3.14: *Diagramma di Haigh modificato per tener conto delle tensioni residue e quantificazione numerica della differenza in base a diversi valori tensionali.*[38]

Con questo approccio si considerano solo gli effetti macroscopici delle tensioni residue, che hanno in realtà influenza anche su altri aspetti della progettazione a fatica, come il fattore di concentrazione delle tensioni e la sensibilità all'intaglio. Per questi parametri, tuttavia, non sono ancora disponibili modelli generalizzati e in fase di progettazione la loro importanza va valutata di caso in caso sfruttando modelli numerici specifici in base a materiale, geometrie e condizioni di utilizzo.

### 3.2.5 Tecniche di misurazione delle tensioni residue

La valutazione delle tensioni residue su un componente meccanico può essere fatta mediante due tecniche distinte: una basata sul principio della diffrazione e l'altra mediante l'utilizzo di sensori estensimetrici.

Quest'ultima tecnica prevede un'asportazione di materiale, di solito minima, che permette al materiale adiacente di rilassarsi; misurando attraverso estensimetri la deformazione avvenuta è poi possibile risalire allo stato tensionale preesistente. Poiché per ragioni pratiche l'asportazione di materiale non può mai scendere al di sotto di qualche millimetro cubo e la superficie coperta dall'estensimetro è almeno qualche decina di millimetri quadrati, è chiaro come questa tecnica possa essere usata solamente per valutare le macro-tensioni residue. Inoltre, come visto nel paragrafo

3.2.3, l'asportazione di materiale può essere a sua volta causa di nuove tensioni residue che andrebbero a falsare la prova. Tale prova ha tuttavia il vantaggio di poter analizzare il campione a profondità via via crescenti, riuscendo a realizzare profili di tensioni interne accurati fino a 50 mm di profondità.

Il metodo diffrattometrico è invece una tecnica non distruttiva che sfrutta, appunto, la diffrazione differenziale di un fascio di raggi X monocromatico in base allo stato tensionale del materiale. Quando il fascio colpisce il materiale, esso è in grado di eccitare gli atomi appartenenti a diversi piani reticolari che emettono a loro volta una radiazione con pari lunghezza d'onda e speculare a quella eccitante rispetto al piano stesso. Conoscendo la lunghezza d'onda del fascio e variando l'angolo di incidenza si va a cercare quella condizione in cui le radiazioni riflesse risultino in fase, sommandosi e dando come risultante la massima radiazione possibile, come visibile in *Figura 3.15*. Da questi dati si ricava poi la distanza interplanare con semplici calcoli goniometrici.

Andando a confrontare la distanza misurata con quella teorica del materiale e conoscendo le forze interatomiche che tendono a riportare in posizione gli atomi, tipiche per ogni metallo, si può infine ricavare l'entità delle tensioni presenti. È intuibile come questa tecnica risulti essere estremamente puntuale, in quanto lo spot del fascio ha il raggio inferiore al millimetro e la profondità di penetrazione supera con difficoltà le poche decine di millimetri.

Si adatta quindi per le valutazioni delle tensioni residue superficiali, ma risulta limitata nel caso sia richiesta un'analisi anche per gli strati sub-superficiali. Se necessario, risulta comunque possibile anche in questo caso asportare materiale dalla superficie, per mezzo meccanico o con attacco elettrochimico, perdendo però la caratteristica di non distruttività della prova.

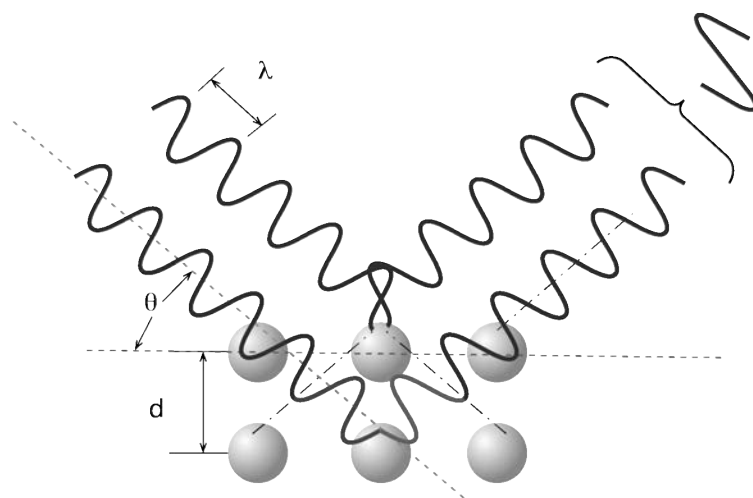


Figura 3.15: *Diffrazione di raggi X su diversi piani cristallini.*[15]

# Capitolo 4

## La pallinatura

### 4.1 Il trattamento di pallinatura controllata

Per il miglioramento dello stato tensionale superficiale, che a causa delle lavorazioni meccaniche subite può presentare tensioni residue trattive come ampiamente esposto nella sezione 3.2, sono state sviluppate diverse lavorazioni. Il loro scopo comune è quello di migliorare la vita a fatica dei componenti sia migliorandone la finitura superficiale che, soprattutto, generando sulla superficie delle deformazioni plastiche che eliminino le tensioni residue trattive portando anzi ad avere uno stato di compressione.

Tra le diverse tecniche spicca la pallinatura controllata che, nonostante sia un processo industrialmente consolidato e maturo, rimane spesso sottovalutato, sconosciuto o confuso con la pallinatura classica, che è semplicemente un trattamento per la pulizia delle superfici. In seguito verranno esposte le basi scientifiche che ne giustificano l'utilizzo e le modalità industriali di applicazione del trattamento.

#### 4.1.1 Il processo fisico

La pallinatura controllata, detta anche *shot-peening*, è un processo di lavorazione a freddo che consiste nel colpire il componente da trattare con delle particelle solide, dette *media*, realizzabili in diversi materiali e lanciate ad alta velocità, nell'ordine di  $30 \div 140$  m/s, per mezzo centrifugo o con getti di aria compressa.[17]

L'obiettivo del trattamento è quello di indurre la plasticizzazione degli strati superficiali del materiale e, di conseguenza, uno stato tensionale compressivo degli strati immediatamente adiacenti. Il fenomeno è regolato dalle leggi della meccanica dell'impatto, che non rientra né nella statica né nella dinamica. A differenza di queste due, dove si considera che sia sempre tutta la struttura dei corpi coinvolti

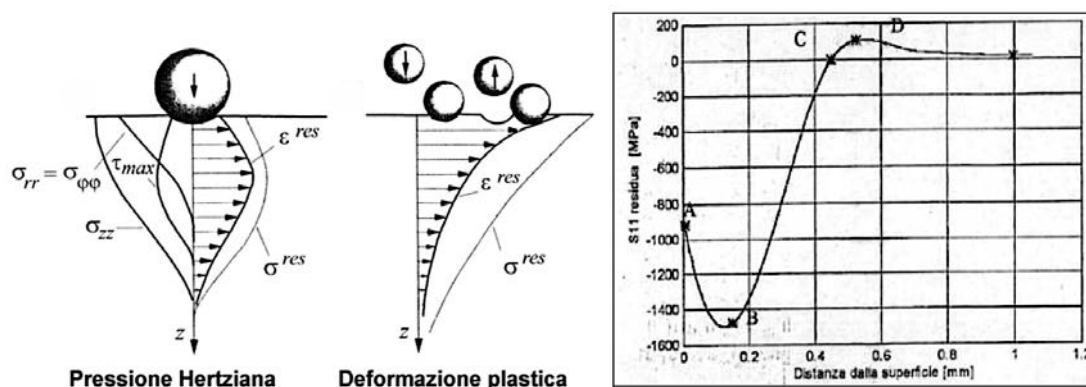


Figura 4.1: *Causa della formazione di tensioni residue mediante shot-peening e loro andamento lungo lo spessore.*

a rispondere alla sollecitazione, negli impatti gli effetti della sollecitazione indotta dall'urto si attuano in un lasso di tempo talmente breve che l'energia dell'impatto stesso non viene redistribuita sull'intera struttura ma si concentra nella zona immediatamente adiacente all'impatto.

Il confine tra la meccanica classica e la meccanica dell'impatto è segnato dal rapporto tra la durata dell'impatto e il tempo naturale di risposta del materiale: quando la prima è maggiore, l'energia dell'impatto viene scaricata nella zona dell'urto e solo in minima parte viene trasmessa al materiale adiacente, concentrandosi quindi su un volume molto ridotto e amplificando gli effetti dell'urto.

Per analizzare nel dettaglio i meccanismi che entrano in gioco durante il trattamento di shot-peening, si consideri un singolo *media* all'interno del flusso proiettato dall'ugello. Pochi istanti prima dell'impatto, l'energia globale del *media* corrisponde con quella cinetica, ovvero  $E_m = \frac{1}{2}mv^2$ , dove  $m$  è la massa del pallino e  $v$  la sua velocità. Nel caso si verifichino le ipotesi che massa e dimensione dei singoli *media* siano trascurabili rispetto a quelle dell'elemento da trattare, tale contenuto energetico corrisponde a quello dell'impatto. Data l'incompenetrabilità dei corpi rigidi, ne deriva una pressione di contatto fortemente localizzata, detta pressione *hertziana*, che si traduce in una forza di deformazione interna ai due corpi.

All'esaurirsi dell'energia di impatto, la deformazione può essere solo elastica, aver raggiunto il limite di rottura del materiale o, nel caso auspicato con la pallinatura, rientrare nel campo plastico. Segue in ogni caso una fase di restituzione della componente elastica che porta al distacco di ciò che è rimasto del *media* dal componente. La plasticizzazione della superficie del componente avviene in tre passaggi:[17]

1. la sollecitazione indotta dall'urto delle particelle produce una deformazione plastica compressiva del materiale superficiale, ortogonale alla superficie stessa.



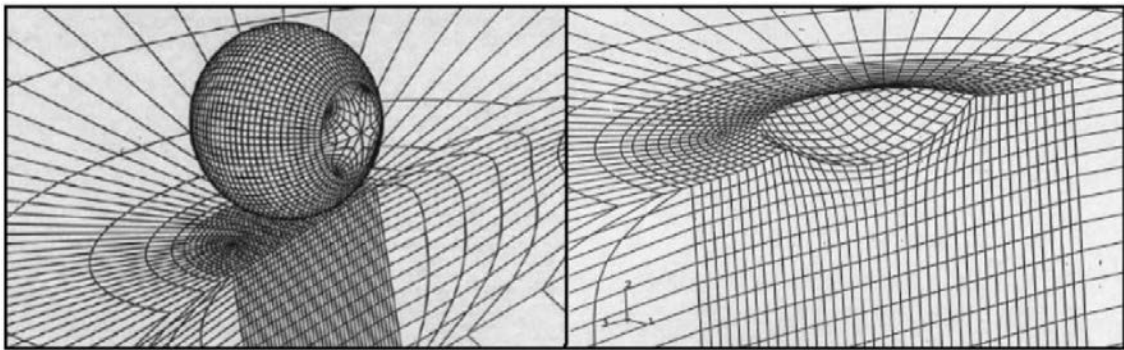


Figura 4.2: Mesh dell'impatto di un pallino e dell'impronta lasciata.

2. per effetto Poisson, a tale deformazione corrisponde una deformazione plastica di segno opposto parallela alla superficie, sempre circoscritta al materiale più superficiale;
3. il materiale sottostante, ancora in campo elastico, risponde alla deformazione dello strato superficiale con una forza compressiva elastica che genera lo stato tensionale desiderato.

### 4.1.2 I benefici ottenibili

Lo stato tensionale prodotto dalla pallinatura controllata può raggiungere notevoli profondità di penetrazione ed è spesso impiegato per ritardare o eliminare la formazione di cricche di fatica.[12] Gli aspetti su cui lo shot-peening va ad influire sono soprattutto tre:

- lo sforzo residuo di compressione in superficie, causato dalla plasticizzazione e dall'elevata pressione hertziana, rallenta solo leggermente la nucleazione delle chicche di fatica ma ne ostacola notevolmente l'avanzamento;
- l'incrudimento, dovuto agli impatti con i pallini che provocano l'aumento delle dislocazioni e la distorsione dei grani in superficie, aumenta durezza e resistenza meccanica superficiale e rallenta l'innescio di cricche ma ne facilita in parte la propagazione;
- la finitura superficiale, in dipendenza dal diametro dei *media*, presenta le impronte dei pallini (*dimples*) ed è quindi leggermente ruvida e irregolare e di conseguenza più propensa all'innescio di cricche rispetto ad una superficie lucidata a specchio, come descritto nel paragrafo 2.3.3.

Il risultato complessivo risulta nettamente favorevole per la vita a fatica, sia in fase di innesco che in fase di propagazione delle cricche. Il contributo maggiore viene dato dalle tensioni residue di compressione e dall'incrudimento, che prevengono l'innesco e la nucleazione di cricche allungando di molto la frazione di vita del provino senza danneggiamenti, e al contempo ne rallentano la crescita una volta generate.

La pallinatura permette di innalzare del 10 ÷ 20% il limite di fatica per superfici lisce e fino al 70% per superfici grezze o con difetti. Nel caso di superfici che presentano intagli, la pallinatura porta a ridursi, fino ad annullarsi, l'effetto negativo dovuto al fattore di concentrazione delle tensioni.[12]. Si hanno inoltre benefici per quanto riguarda la corrosione sotto sforzo, la vaiolatura per fatica (*pitting*) e, grazie ai *dimples*, alla trattenuta di oli e grassi lubrificanti da parte della superficie.[57]

Con un trattamento rapido e tutto sommato economico si ha così la possibilità di prolungare la durata di esercizio di un componente o aumentarne i livelli di carico senza gravare sulla massa o sugli ingombri, usare materiali eccessivamente costosi o, nel peggiore dei casi, prevedere onerose riprogettazioni.

## 4.2 I parametri di pallinatura

È intuibile come gli effetti del trattamento non sono prevedibili dalla sola energia cinetica indicata nel paragrafo 4.1.1, ma siano frutto della combinazione di diversi fattori tra cui la velocità dell'impatto, la massa della singola particella, le caratteristiche meccaniche del metallo da trattare e dei *media*.

Verranno riportati in seguito i parametri di lavorazione regolabili dall'operatore per variare il risultato finale o a cui è necessario prestare particolare attenzione.

### 4.2.1 L'intensità

L'intensità di pallinatura è un parametro funzione di velocità, durezza, peso e dimensione dei pallini e dell'angolo tra flusso e superficie; rappresenta la principale caratteristica utilizzata per valutare l'effetto del trattamento. Essa viene scelta in base alla natura del materiale da trattare e ai requisiti che si vogliono ottenere in funzione delle condizioni operative previste; in base a ciò si stabilisce lo stato di tensioni residue desiderato e si definisce la *curva di saturazione* del processo. L'intensità del trattamento viene riportata in punti *Almen*, in onore di John O. Almen che per primo mise a punto un test di intensità per la pallinatura.

La prova viene svolta su appositi provini unificati nella forma di lamierini di acciaio bonificato al carbonio C70 e durezza di circa 44 HRC, detti provini *Almen* e distinti in classi N, A, C rispettivamente per pallinatura leggera, media o intensa.

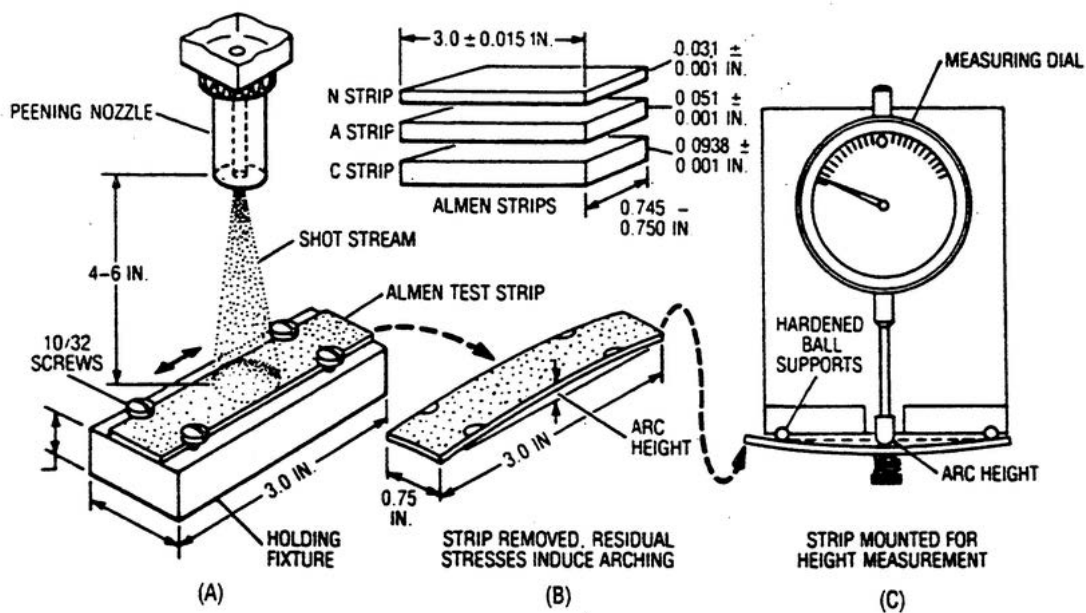


Figura 4.3: Fasi schematiche di una prova dell'intensità di pallinatura messa a punto da Almen.

Di questi provini viene trattata una sola superficie in modo che le tensioni residue che vengono a crearsi facciano incurvare il provino in modo convesso rispetto alla superficie trattata; l'altezza raggiunta dall'arco, misurata con appositi comparatori, è indicativa dell'energia trasmessa dal trattamento. Ripetendo la prova a parità dell'intensità del fascio me per tempi diversi di esposizione al trattamento e riportando i dati su un grafico dove in ascissa si ha il tempo di esposizione e in ordinata l'altezza dell'arco, si arriva a costruire la curva di saturazione.[28]

Per tempi di esposizione bassi, le impronte sulla superficie saranno rare e il provino si incurverà solo leggermente. All'aumentare dell'esposizione l'incurvatura crescerà progressivamente fino a che il trattamento raggiunge copertura totale: da quel momento in poi anche mantenendo i provini esposti per molto tempo la curvatura non subirà grandi variazioni poiché la superficie del provino è già tutta in campo plastico. Tale situazione corrisponde alla saturazione e il primo provino a presentare tale fenomeno è indicato come intensità di 1 Almen.

Per esprimere questo concetto in modo più rigoroso si ricorre alla legge di Almen, che suggerisce di porre a confronto un provino fatto con un certo tempo di esposizione con quello ottenuto con il doppio del tempo (2 Almen) e verificare quando la differenza di inflessione risulta inferiore al 10%. Le normative suggeriscono comunque l'utilizzo di almeno quattro provini sottoposti a tempi di esposizione diversi.

In generale, la portata dei pallini e la pressione dell'aria compressa concorrono

congiuntamente a determinare l'intensità del fascio. In condizioni normali, si ha una portata di pallini di  $3 \div 10$  kg/min e una pressione di  $2 \div 5$  bar, valori eventualmente riducibili per lavorazioni che richiedono particolare precisione o delicatezza. Anche l'angolo del getto influisce sull'intensità, per cui solitamente l'ugello è montato su una testa orientabile in grado di seguire al meglio il profilo del pezzo da trattare.

Il test con provini Almen ha tuttavia il solo scopo di determinare l'energia cinetica del getto e non, come spesso erroneamente si crede, di ottimizzare i parametri del trattamento. Esso inoltre dà informazioni specifiche a quel preciso impianto di pallinatura e componente da trattare: non è quindi possibile estendere i risultati a contesti diversi.

### 4.2.2 I pallini

Il pallino è "l'utensile" che va direttamente a lavorare il pezzo ed è quindi senza dubbio un parametro di primaria importanza. La forma del pallino deve assolutamente essere di tipo sferico per garantire una buona resistenza a fatica dei materiali trattati; forme diverse o pallini frantumati lascerebbero infatti sulla superficie impronte irregolari e angolose che potrebbero comportarsi da punti di innesco della frattura.

I materiali più comunemente utilizzati per i *media* sono l'acciaio, la ceramica e il vetro, scelti in base al tipo di materiale da trattare e all'intensità desiderata. Il peso specifico del pallino fa variare anche di molto l'energia cinetica del flusso, mentre il suo modulo elastico modifica la deformazione della superficie interessata all'urto e quindi la risposta del *media* all'impatto. Una scelta attenta del limite di rottura del pallino può inoltre essere sfruttata come limite di sicurezza per evitare plasticizzazioni eccessive del materiale trattato.

Aumentare la dimensione del pallino permette di ottenere una profondità del trattamento maggiore a scapito però della finitura superficiale e della possibilità di trattare con precisione gole e raccordi di dimensione ridotta. A parità di energia cinetica, un pallino di grandi dimensioni sparato a velocità inferiori ha potenzialmente capacità maggiore di deformare il materiale, data l'energia necessaria alla frantumazione più alta, e interesserà quindi uno strato di materiale più spesso; con pallini di ridotte dimensioni sparati ad altissima velocità si otterrà invece una minore profondità efficace del trattamento ma una migliore finitura superficiale.

### 4.2.3 La copertura

La copertura è un parametro che misura l'estensione dell'area colpita dalla miriade di *media* che vanno ad urtare contro la superficie stessa in relazione all'estensione della superficie totale da trattare. Tale rapporto è direttamente collegato al tempo di esposizione del particolare meccanico al flusso di pallini e alla portata del getto.

Risulta importante verificare che la copertura si avvicini il più possibile alla saturazione, raggiungendo almeno il 98%, altrimenti il trattamento svolto non porta ai miglioramenti della resistenza a fatica desiderati. Bisogna tuttavia prestare attenzione anche a non incorrere nel fenomeno dell'*overpeening* esposto nel paragrafo 4.2.5. La distanza dell'ugello dalla superficie da trattare gioca in questo caso un ruolo primario: oltre a determinare la perdita di energia e velocità dei pallini, essa va anche a regolare la dimensione e la concentrazione della zona colpita dal getto.

Per controllare lo stato di copertura, di solito limitatamente ad alcuni punti critici della superficie, il pezzo viene osservato con un ingrandimento di circa 50x e viene valutata dall'operatore la densità dei *dimples*.

### 4.2.4 Rugosità superficiale e forma dei dimples

In generale, la pallinatura controllata non è un trattamento che mira al miglioramento della finitura superficiale ma piuttosto all'ottenimento di uno stato tensionale residuo adeguato. In alcuni casi, tuttavia, è possibile ottenere benefici anche sotto tale aspetto, ossia quando ad essere trattati sono semilavorati grezzi con superfici grossolane.

L'abbassamento della rugosità risulta comunque solo un co-effetto che viene raramente ricercato di proposito poiché sono necessarie più passate con *media* di dimensioni via via calanti. Nella maggior parte dei casi, invece, i pezzi da pallinare hanno superfici ben rifinite e il trattamento deve evitare di introdurre rugosità eccessiva sfruttando, ad esempio, pallini meno duri, o prevedendo successivi trattamenti di lucidatura che non vadano ad intaccare lo stato tensionale ottenuto, come la vibrofinitura.[40] Nel caso di acciai cementati o nitrurati è raro che la pallinatura modifichi lo stato di rugosità superficiale, rendendo l'unione di questi processi molto interessante.[28][43]

Per alcune applicazioni è poi importante che la forma del cratere lasciato dall'impatto del *media* sia il più possibile tondeggiante. Sono state quindi sviluppate tecniche di analisi che sfruttano un microscopio per raccogliere le immagini e un software che analizza ciascun *dimple* valutandolo in una scala da 0 a 1 in base all'affinità con lo stampo circolare perfetto di riferimento, come riportato in *Figura 4.4*.

Esistono poi normative, come la *ASTM B851*, che indicano il massimo numero di impronte difformi per centimetro quadro in base alla tolleranza scelta.







Valori di rotondità per shot comuni					
	0.796		0.869		0.904
	0.791		0.912		0.976

Figura 4.4: Esempi di valutazione della forma dei dimples.[12]

#### 4.2.5 L'overpeening

Un limite del trattamento di pallinatura è, ad oggi, la mancanza di schemi di calcolo che permettano di scegliere le migliori condizioni per il trattamento, per cui la buona riuscita del trattamento è spesso affidata alla sensibilità e all'esperienza dell'operatore. D'altronde, la prova in scala *Almen* esposta nel paragrafo 4.2.1, è sì economica ma non permette di legare con precisione lo stato tensionale desiderato ai parametri da impostare, anche se in tal senso sono allo studio approcci di calcolo specifici.[6] Fino a quando non si raggiungerà un adeguato livello di comprensione di tali legami, lo shot-peening prevederà dei fattori di rischio latenti.

Uno di questi rischi è l'*overpeening*, ovvero un fenomeno di sovratrattamento ottenuto attraverso un'esposizione eccessiva al getto di *media* o l'utilizzo di una pressione eccessiva dell'aria compressa. Quando ciò avviene, soprattutto se il materiale da trattare è poco duttile, si aumenta il rischio di danni sotto forma di profonde rigature o principi di sfogliatura.

Quando un materiale lavorato a freddo esaurisce la sua duttilità, infatti, si ha la formazione di incrinature localizzate. Come risultato di tali fessurazioni, si ha una marcata riduzione delle tensioni residue che porta alla perdita dei benefici introdotti dal trattamento e una contemporanea formazione di danni che riducono ulteriormente la resistenza a fatica dell'elemento.

In *Figura 4.5* si riporta un grafico con l'andamento della resistenza a fatica in funzione del tempo di esposizione al trattamento di una molla elicoidale usata per uno studio su tale fenomeno.[6] Si possono distinguere tre zone:

1. nella zona A, caratterizzata da una copertura fino al 100 ÷ 120%, la pendenza della curva è indice di un'elevata sensibilità al trattamento, ovvero di un forte

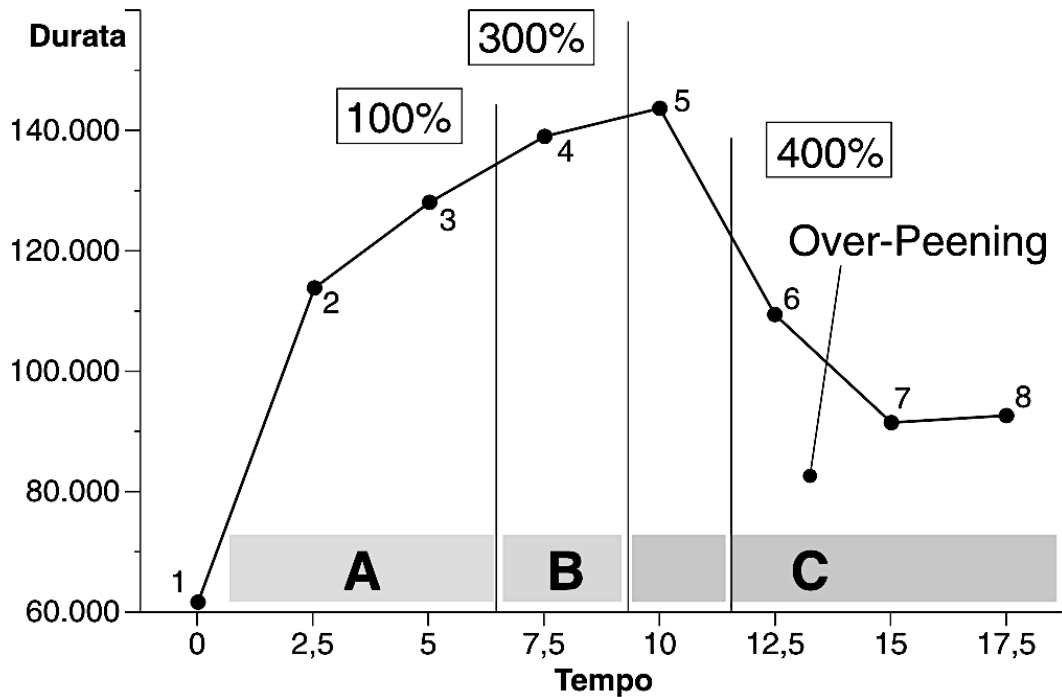


Figura 4.5: *Andamento della resistenza a fatica in funzione del tempo di trattamento.*[6]

incremento di resistenza all'aumentare del tempo di esposizione. In questa fase l'energia cinetica del pallino viene convertita in tensioni residue sulla superficie e, solo in misura minore, in deformazione plastica. La sensibilità diminuisce mano a mano che ci si avvicina alla saturazione;

2. nella zona B, indicativa di una copertura fino al 300%, si raggiunge il massimo risultato del trattamento ma con una sensibilità al trattamento inferiore. L'energia del pallino va ora maggiormente a provocare scorrimenti plastici rispetto a tensioni compressive e gli effetti che si ottengono sono scarsamente prevedibili e, di fatto, non giustificano il costo del prolungamento del trattamento. Per questi motivi in ambito industriale ci si ferma solitamente nella zona A;
3. nella zona C, per coperture oltre al 300%, si ha un collasso delle caratteristiche meccaniche resistenziali dovute all'*overpeening*. Il materiale non acquisisce ulteriori tensioni residue e subisce solamente uno scorrimento delle creste e delle valli che va di fatto a indurre cicli di fatica alla superficie prima ancora che essa entri in esercizio. In supplemento, si verifica una maggiore propensione alla propagazione di cricche a causa dei danni e dello stato tensionale superficiale raggiunto.





# Capitolo 5

## La prova sperimentale

### 5.1 Obiettivo della prova

Come ampiamente esposto nel capitolo 2, la rottura per fatica è un fenomeno difficilmente prevedibile e di non banale comprensione. La presenza di eventuali intagli o variazioni di sezione ha particolare influenza nella durata della vita utile, soprattutto se presentano raggi di raccordo molto ridotti. Se previsti da progetto, questi fattori possono essere trattati per ridurre l'effetto o comunque opportunamente considerati nel calcolo della durata della vita utile.

Esiste tuttavia l'eventualità che si formino intagli superficiali non presenti inizialmente ma ottenuti involontariamente durante l'esercizio a causa di danneggiamenti, corrosione o altro. Questi vanno a modificare la resistenza a fatica del componente, la cui vita utile viene ridotta di una quantità non conoscibile a priori poiché dipende da una miriade di caratteristiche relative al danno difficilmente rilevabili, come la profondità, la posizione sul pezzo, le caratteristiche geometriche del fondo gola e lo stato del materiale nei dintorni del danno.

Questa incertezza sulla vita utile residua comporta l'impossibilità di utilizzare in sicurezza il pezzo, che potrebbe cedere improvvisamente durante l'esercizio causando danni anche gravi ai macchinari o agli operatori. L'esistenza di questo rischio dovrebbe spingere a sostituire il pezzo danneggiato appena il danno viene notato, anche se non se ne conosce la precisa entità e quindi l'influenza che ha sulla vita utile del componente, andando incontro a spese talvolta cospicue e magari non strettamente necessarie.

Una via alternativa, analizzata nel corso di queste prove, potrebbe essere quella di sottoporre il pezzo danneggiato ad un trattamento di *shot-peening*, al fine di ridurre l'influenza dell'effetto dell'intaglio grazie alla generazione di tensioni residue superficiali di compressione che rallentano la progressione a fatica del danno e ar-

rivare quantomeno a recuperare la durata della vita utile supposta in assenza del danneggiamento.

Per farlo verranno impiegati dei semilavorati estrusi in lega leggera. Si valuterà il loro comportamento a fatica allo stato di consegna per confermare dei valori di riferimento trovati in letteratura; in seguito, si applicheranno su alcuni campioni degli intagli in maniera controllata, simulando un danneggiamento accidentale ma in modo da rendere la prova il più possibile ripetibile e i dati confrontabili, e si valuteranno gli effetti del danno sulla vita a fatica. Infine, alcuni pezzi intagliati verranno pallinati dopo una determinata percentuale della durata teorica e si andrà a verificare se tale trattamento può portare quantomeno al recupero della vita di progetto.

Le prove di fatica non verranno effettuate su provini standardizzati ma direttamente sui semilavorati. Tale tecnica di analisi, citata nel paragrafo 2.4.2, è sempre più impiegata in ambito industriale per avere dati relativi non solo al materiale impiegato ma al componente nel suo complesso, evidenziando quindi eventuali problemi dovuti alla particolare geometria o finitura superficiale; in questo modo i dati raccolti sono più facilmente applicabili alle condizioni di esercizio reali.

## 5.2 Analisi e preparazione dei provini

Prima della vera e propria prova di fatica, è necessario eseguire delle operazioni preliminari per l'allestimento e l'approntamento dell'occorrente.

Di primaria importanza è la verifica dei semilavorati, per escludere la presenza di difetti grossolani che possono influenzare la prova, e la loro preparazione, tagliandone spezzoni di dimensione adeguata per le prove da svolgere e pulendoli da eventuali residui oleosi o grassi con del solvente. Per avere una panoramica completa del materiale in esame è poi utile effettuare delle prove sui campioni così come consegnati dal fornitore (campioni *tal-quale*) per avere dei valori di riferimento e confermarne le caratteristiche previste da letteratura.

### 5.2.1 La caratterizzazione del provino

I semilavorati presi in esame sono dei profilati tubolari quadri ottenuti per estrusione, di dimensione  $80 \times 80$  mm di lato e 4 mm di spessore, in lega di alluminio *EN AW 6063 T6*. Le barre consegnate dal fornitore, lunghe 2 m ciascuna, sono state tagliate mediante seghetto a nastro in provini di 900 mm; i restanti spezzoni da 200 mm si sono rivelati utili per effettuare le svariate prove per la caratterizzazione, gli intagli e la pallinatura.

Il materiale in esame, come descritto nel paragrafo 1.2.3, è una lega alluminio-magnesio-silicio facilmente estrudibile e dalle buone caratteristiche meccaniche e di resistenza alla corrosione. La tensione di snervamento minima garantita dal fornitore è di 170 MPa mentre quella a rottura è di 215 MPa con un allungamento del 10% circa e un modulo di elasticità di 69000 MPa.[48] Valori più tipici si aggirano intorno ai 250 MPa per la rottura e 220 MPa per lo snervamento; inoltre, in linea di massima, con un'ampiezza della sollecitazione di 120 MPa la vita a fatica dovrebbe essere intorno al milione di cicli con una probabilità di sopravvivenza del 97,5%.[53][51]

Attraverso un rugosimetro *Mitutoyo SJ-210* è stata verificata la rugosità delle barre allo stato di consegna, ottenendo una rugosità media  $R_a$  di 0,160  $\mu\text{m}$  nella misura assiale e di 0,546  $\mu\text{m}$  in quelle trasversali, con valori massimi  $R_z$  rispettivamente di 1,095  $\mu\text{m}$  e 3,899  $\mu\text{m}$ .

Un provino ottenuto da uno spezzone tal-quale è stato inglobato in resina e lapato in modo da poterne osservare la struttura mediante microscopio elettronico, ricercando eventuali inclusioni. Esse si sono mostrate piuttosto rare e isolate, sintomo di buona qualità del materiale. Attraverso l'analisi della riemissione di raggi X (*spettrofotometria*) si è potuta studiare la natura di tali inclusioni, risultate essere per lo più un composto ferro-magnesio-silicio oppure ossido di ferro, mentre al di fuori di tali inclusioni si è riscontrato alluminio pressoché puro. Alcuni esempi sono riportati in *Figura 5.1* e *Figura 5.2*.

Infine, su ciascun provino è stato individuato il tratto utile, che per le caratteristiche della macchina di cui si discuterà nel paragrafo 5.4.1 è ampio 160 mm, e il punto dove dovrà essere effettuato l'intaglio.

### 5.2.2 La realizzazione degli intagli

Gli intagli prodotti sui profilati devono simulare un danno accidentale, procurato ad esempio da un evento fortuito avvenuto durante la vita utile del pezzo meccanico, ma devono essere il più possibile simili tra loro come forma e profondità in modo da rendere le prove confrontabili. Per questo motivo sono stati presi tutti gli accorgimenti possibili per massimizzarne la ripetibilità pur cercando di evitare le caratteristiche di intenzionalità del danno che avrebbe, ad esempio, un intaglio eseguito con macchine utensili. Per effettuarli è stato quindi utilizzato un *cutter*, la cui lama in acciaio temprato molto dura e affilata permette di produrre intagli netti, profondi e costanti senza troppe difficoltà.

Prima di operare direttamente sui provini, sono state svolte delle prove su spezzoni dello stesso materiale ed è stato studiato un sistema di guide in modo che l'intaglio risultasse rettilineo e perpendicolare alla superficie. Poiché non è stato

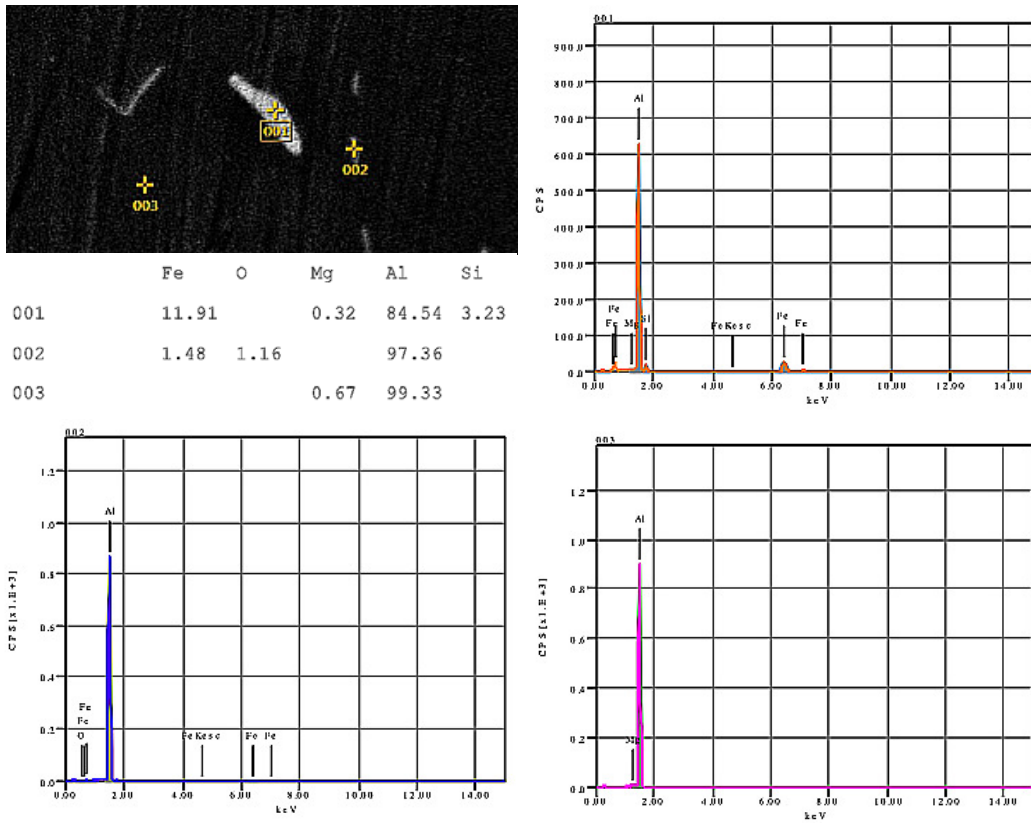


Figura 5.1: Esempio di inclusioni osservate e analisi della composizione.

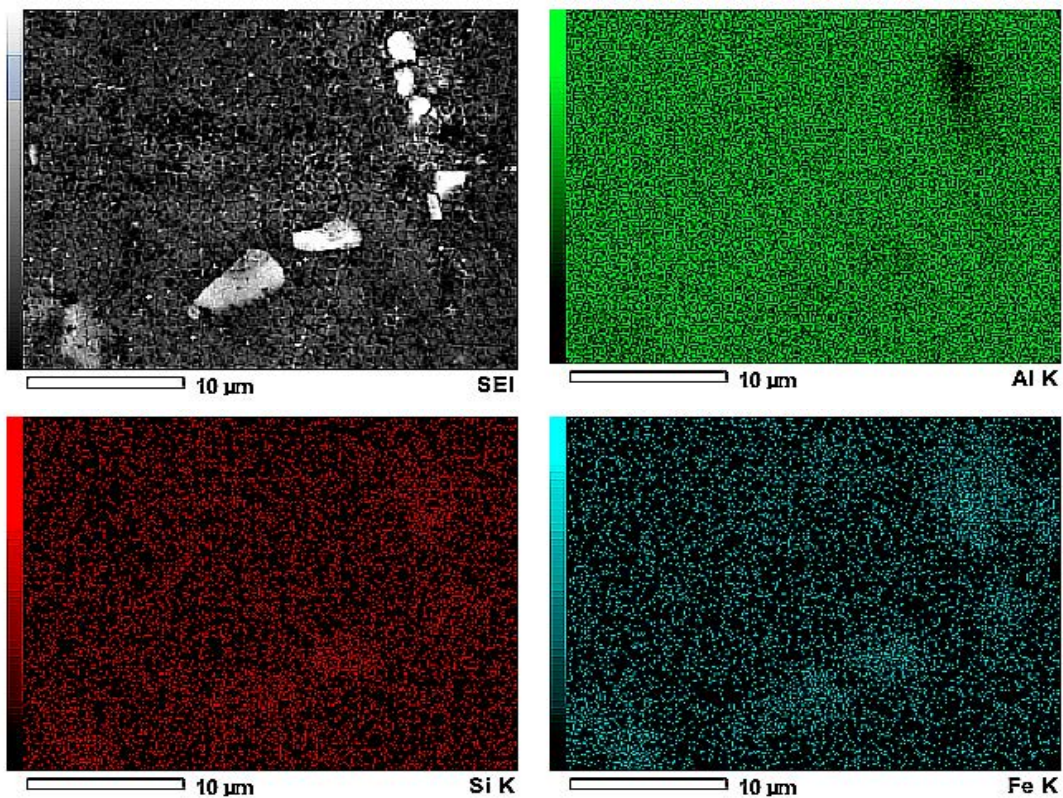


Figura 5.2: Altro esempio di inclusioni e mappa delle rilevazioni di alluminio, silicio e ferro rispettivamente.

possibile eseguire controlli sulla forza applicata al taglierino, si è optato per una verifica a posteriori di larghezza e profondità degli intagli sfruttando il rugosimetro con punta in diamante di  $2\ \mu\text{m}$  di raggio e impostando la velocità di traslazione della testina a  $0,25\ \text{mm/s}$ , la minima disponibile, per migliorare la precisione di inseguimento del profilo dell'intaglio.

L'attendibilità delle misure con rugosimetro è stata verificata sezionando in più parti la superficie con gli intagli di prova e, una volta inglobata in resina e lucidata, osservandone il profilo al microscopio elettronico (*SEM*). In questo modo si è potuto inoltre confrontare con precisione diversi intagli, prendere le misure più significative e accertarne la similitudine. A titolo d'esempio, alcune immagini di tali intagli ottenute e misurate attraverso il *SEM* e il relativo profilo ottenuto con il rugosimetro sono riportate in *Figura 5.3* e *Figura 5.4*.

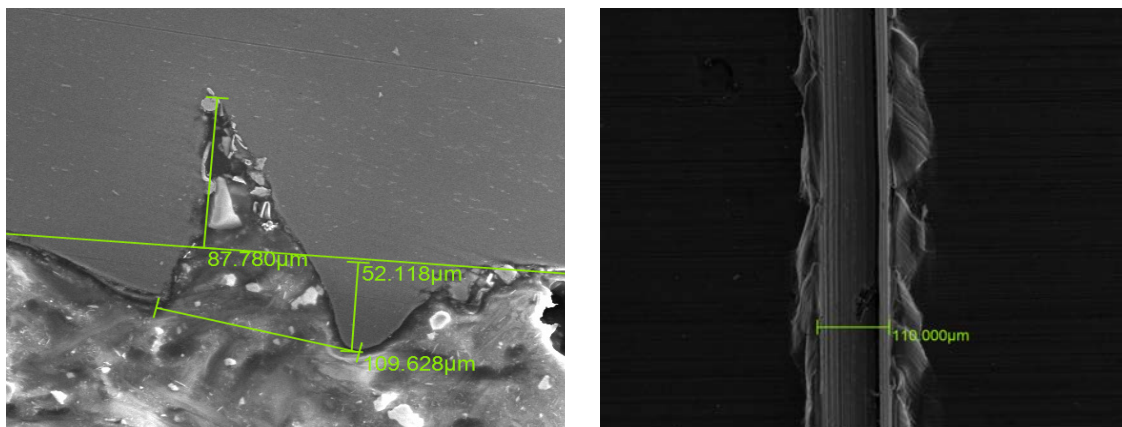


Figura 5.3: *Intaglio visto al microscopio elettronico, in sezione e sulla superficie.*

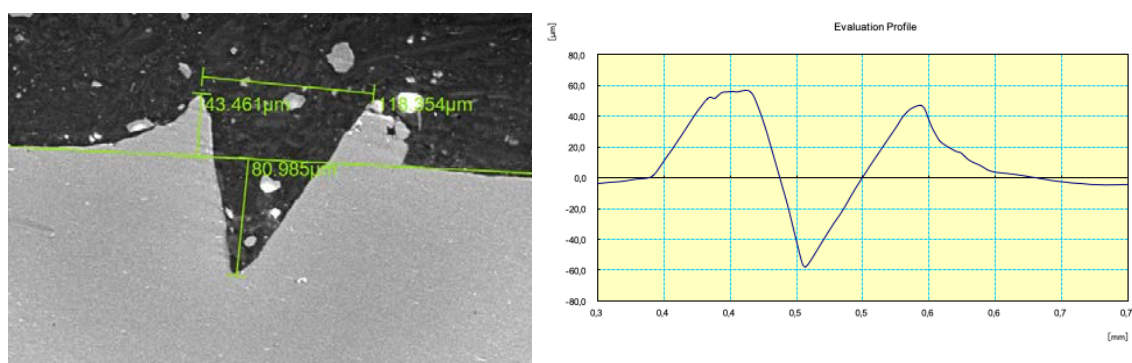


Figura 5.4: *Confronto tra un intaglio visto al microscopio elettronico e il suo profilo ricavato con rugosimetro.*

Attraverso i diagrammi citati nel paragrafo 2.3.4, si è cercato di stimare il fattore di intaglio  $K_t$  delle incisioni prodotte, ma il profilo acuminato e le proporzioni relative portano il coefficiente fuori scala, ben al di sopra dei valori riportati nei grafici.

È stato confrontato anche il profilo degli intagli con quello della lama del *cutter*, osservata prima e dopo l'esecuzione dell'intaglio, escludendo ogni problematica relativa alla possibile usura della stessa. Tuttavia, per sicurezza, ciascun intaglio sui provini è stato effettuato con lame nuove.

Una volta verificata la ripetibilità, è stato possibile procedere con l'intaglio dei profilati da testare. L'incisione è stata svolta in direzione trasversale su una delle facce, in posizione centrale rispetto alla lunghezza dello spezzone in modo che risulti ampiamente all'interno del tratto utile individuato nel paragrafo 5.2.1.

## 5.3 La pallinatura dei campioni

Il cuore della prova consiste nella verifica dell'efficacia del trattamento di *shot-peening* nel recuperare le caratteristiche perse a causa del danno. Come ampiamente visto nel capitolo 4, la scelta dei parametri per un corretto trattamento risulta piuttosto complessa e laboriosa e si affida in parte alla sensibilità dell'operatore che deve quindi essere adeguatamente preparato.

La particolarità della prova ha spinto ad optare per la tecnica del *flap-peening*, che permette di eseguire il trattamento senza dispersione di *media* e si adatta quindi a situazioni più critiche dove l'eventuale intervento dev'essere eseguita in opera, con l'obbligo di ridurre al minimo le particelle che, disseminate, potrebbero portare a successivi grippaggi o malfunzionamenti degli apparati in movimento.

### 5.3.1 Il flap-peening

Il *flap-peening* è una tecnica di pallinatura sviluppata negli anni '70 in ambito aeronautico. In questa variante, i *media* non vengono lanciati mediante l'uso di aria compressa, ma sono inglobati ai due estremi di una bandella flessibile in materiale polimerico o composito, detto appunto *flap*, che viene messa in rotazione attraverso un apposito mandrino adattabile ad un qualsiasi trapano portatile. In questo modo, i pallini vanno ad impattare sulla superficie da trattare ad ogni mezzo giro del mandrino, ottenendo un effetto del tutto simile a quello dello *shot-peening* tradizionale.

L'intensità del trattamento dipende in questo caso dall'altezza mantenuta dal mandrino rispetto alla superficie, dalla velocità di rotazione, dalla dimensione dei *media* e dalla durata del trattamento.[22] Infatti, mentre velocità e dimensione dei pallini agiscono direttamente nell'energia prodotta dagli urti, la durata va ad influire sulla copertura, che come nel caso tradizionale deve almeno arrivare a saturazione, e l'altezza del mandrino modifica l'inflessione del *flap* e quindi l'angolo di impatto.

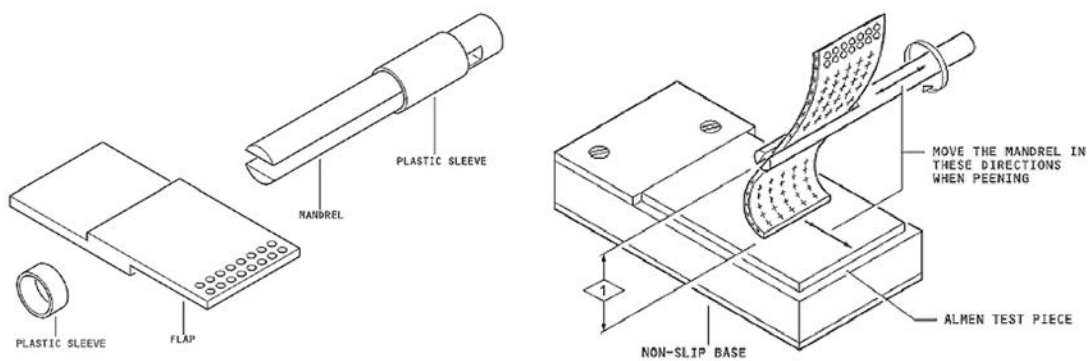


Figura 5.5: Schema e funzionamento del flap-peening.[1]

Questa tecnica presenta alcuni importanti vantaggi, come la possibilità di eseguire il trattamento direttamente in opera, senza quindi la necessità di disassemblare il componente per introdurlo nel macchinario per la pallinatura, la maggior versatilità e il costo notevolmente inferiore dell'occorrente per il *flap-peening* rispetto ad una cabina per *shot-peening* convenzionale e l'assenza di *media* dispersi, che permette di ridurre i tempi dedicati alla protezione di zone delicate e alla successiva pulizia. Inoltre, per quanto riguarda l'incremento della resistenza a fatica, spesso il *flap-peening* risulta essere più efficace rispetto al tradizionale *shot-peening* ad aria compressa, come visibile in *Figura 5.6*, soprattutto per numero di cicli molto elevato.[22][27]

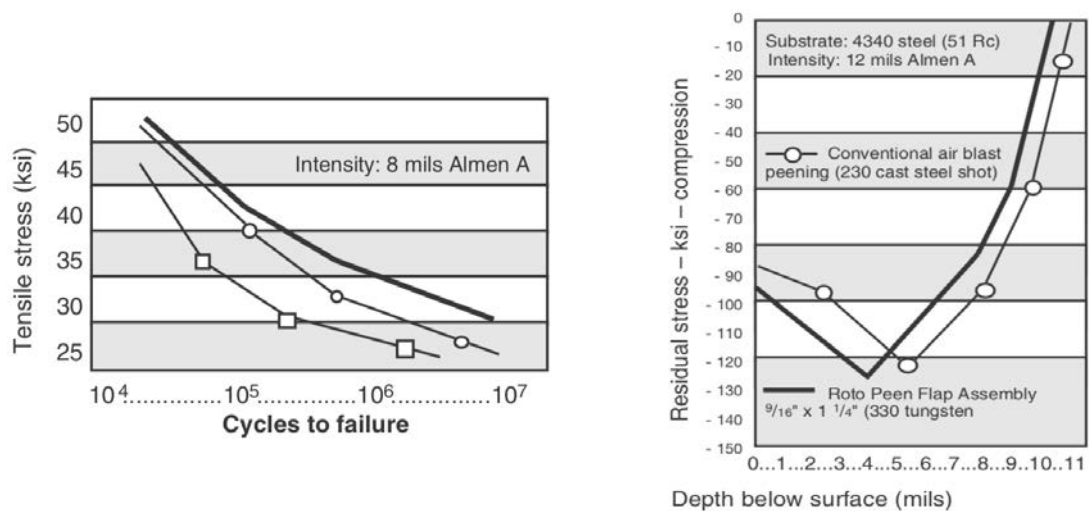


Figura 5.6: Confronto tra gli effetti di flap-peening e shot-peening.[22]

Ovviamente, la sua applicazione è possibile solo per superfici sufficientemente ampie e regolari, mentre se presenti numerose discontinuità è opportuno affidarsi al processo classico. Valutazione opposta va fatta invece per i fori profondi e stretti, dove il *flap-peening* risulta più conveniente.

### 5.3.2 Scelta dell'intensità

La scelta di un'intensità di pallinatura efficace ma non eccessiva richiede l'esecuzione e l'analisi di diverse prove su alcuni campioncini, oltre ovviamente ai test sui provini *Almen*. Affinché il trattamento abbia un effetto positivo tangibile sulla riduzione della vita a fatica dovuta all'intaglio, la profondità dello strato alterato dev'essere superiore a quella dell'intaglio stesso, che si aggira in media a poco meno di  $100\ \mu\text{m}$ , senza tuttavia sfociare nell'*overpeening* visto nel paragrafo 4.2.5.

Essendo l'alluminio un materiale tenero, i *dimples* lasciati dai *media* sulla superficie sono più profondi che sull'acciaio e lo strato di materiale interessato è maggiore. Inoltre, la maggior duttilità riduce il rischio di *overpeening* che si verifica per intensità *Almen* maggiori. Per effettuare le prove, sono stati pallinati degli spezzoni del semilavorato ad intensità di 12 A, 5 A e 14 N (equivalenti a circa 2,5 A: la scala in punti *N* è utilizzata per avere più risoluzione a basse intensità).

La valutazione dello spessore alterato nel caso delle leghe di alluminio, e in particolare per profilati estrusi, risulta essere più complesso in quanto la notevole dimensione dei cristalliti e dei grani e la loro orientazione rendono di difficile interpretazione i risultati ottenuti attraverso diffrazione a raggi X, tecnica solitamente utilizzata per misurare le tensioni residue. Infatti, effettuando delle prove a diverse

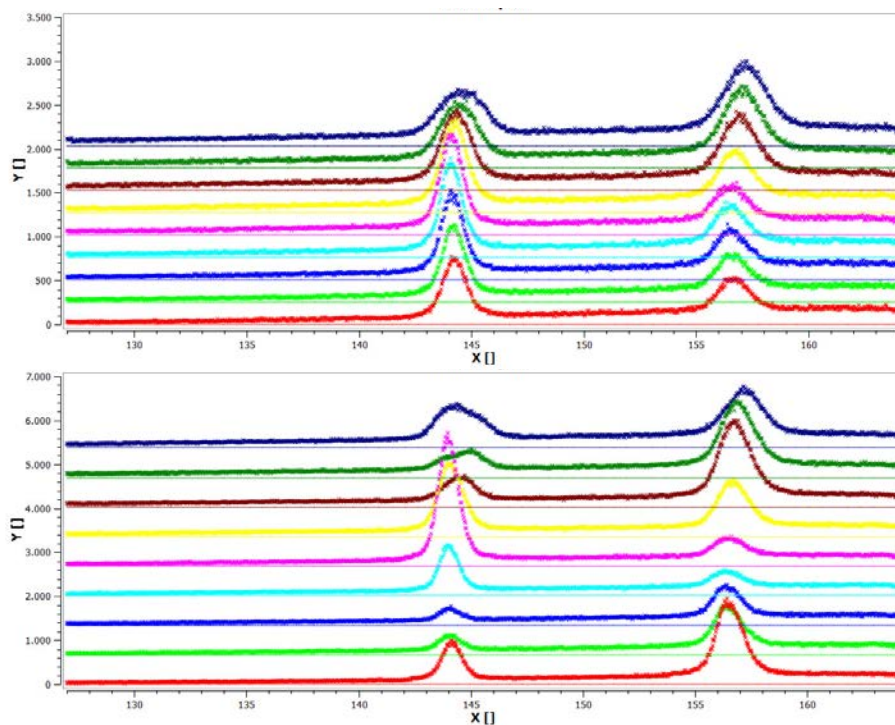


Figura 5.7: Grafici ottenuti con il diffrattometro rispettivamente in superficie e a  $120\ \mu\text{m}$  di profondità: si nota come nel secondo grafico la posizione dei picchi sia affetta da notevole incertezza.



profondità erodendo chimicamente (per i motivi esposti nel paragrafo 3.2.5) gli spezzoni di prova pallinati con diverse intensità, si è potuto constatare che in superficie e a  $70\ \mu\text{m}$  di profondità il trattamento, indipendentemente dall'intensità, provocava tensioni residue intorno ai  $-170\ \text{MPa}$ . Oltre tale spessore, dove si sarebbero potute apprezzare differenze tra le varie intensità di trattamento, i risultati ottenuti sono affetti da eccessiva incertezza, come intuibile in *Figura 5.7*, e quindi non significativi. Si è quindi deciso di ricorrere ad un metodo alternativo per valutare lo spessore alterato: l'acquisizione del profilo di microdurezza sulla sezione dei provini.

Le prove di microdurezza sono state effettuate utilizzando un microdurometro *Vickers* con una massa applicata di  $15\ \text{g}$ , la minore disponibile in modo da interessare il minor spessore possibile, per un tempo di  $15\ \text{s}$ . Ciascuno dei tre spezzoni è stato sezionato verticalmente, inglobato in resina e lucidato in modo da poter misurare l'andamento della durezza lungo lo spessore, indice dell'incrudimento dovuto al trattamento di *shot-peening*.

Per avere un profilo definito, è stata eseguita una *cucitura*, termine utilizzato per indicare una serie di prove in sequenza e a distanza il più possibile ravvicinata, di cui un esempio è riportato in *Figura 5.8*. Attraverso il microdurometro si è ricavata la misura della diagonale dell'impronta, il valore della durezza in punti *Vickers* è stato poi calcolato dalla formula:[11]

$$HV = 1854,4 \cdot \frac{F}{d^2}$$

dove  $F$  è la forza applicata espressa in grammi-forza e  $d$  la media in millimetri delle due diagonali dell'impronta.

A causa dell'impronta di dimensioni molto ridotte e dell'esiguo peso utilizzato per

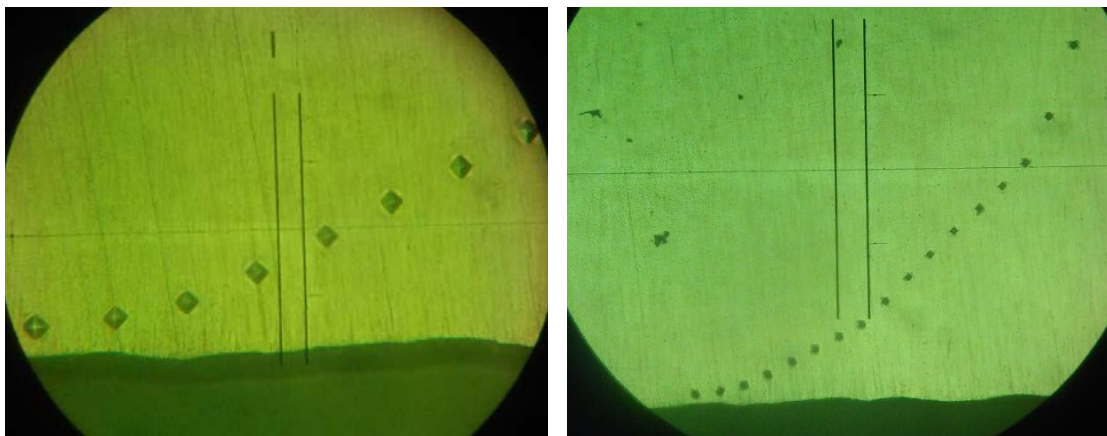


Figura 5.8: Immagini a diversi ingrandimenti di una cucitura eseguita con microdurometro *Vickers*.

le prove, i risultati si sono mostrati affetti da una variabilità non trascurabile: è stato quindi necessario mediare i valori ottenuti da diversi profili per trarne andamenti di durezza attendibili. Essi sono riportati rispettivamente in *Tabella 5.1* e in *Figura 5.9*.

Osservando l'andamento dei profili, seppur abbastanza irregolari, si nota chiaramente il trend decrescente della durezza e l'effetto maggiore delle pallinature più intense, soprattutto di quelle a 5 A e 12 A, piuttosto simili, rispetto a quella a 14 N. In tutti i profili si ottiene un incremento di durezza importante e abbastanza simile (10 ÷ 15 HV) nella fascia che verrà interessata dall'intaglio, ovvero all'incirca 0,1 mm, e per le prove a maggiore intensità si mantiene un indurimento apprezzabile fino a circa 0,5 ÷ 0,6 mm, mentre per quella meno intensa lo strato indurito supera a malapena gli 0,3 mm. Va comunque ricordato che attraverso tali misure si va a valutare solamente lo spessore che ha subito incrudimento e presenta quindi un incremento di durezza, mentre lo strato per cui è stato alterato lo stato tensionale residuo comprende anche una zona in cui le tensioni sono rimaste nel campo elastico: i benefici reali della pallinatura arrivano quindi sicuramente a profondità maggiori.

Profondità [mm]	Misure impronte [ $\mu\text{m}$ ]			Valori durezza [HV]		
	14 N	5 A	12 A	14 N	5 A	12 A
0,015	17,50	17,38	17,46	90,8	92,1	91,2
0,020	17,66	17,18	17,36	89,2	94,2	92,3
0,030	17,58	17,42	17,28	90,0	91,7	93,2
0,050	17,72	17,54	17,36	88,6	90,4	92,3
0,075	17,70	17,44	17,48	88,8	91,5	91,0
0,100	17,68	17,44	17,46	89,0	91,5	91,2
0,125	17,92	17,60	17,60	86,6	89,8	89,8
0,150	18,24	17,82	17,56	83,6	87,6	90,2
0,200	18,42	17,84	17,86	82,0	87,4	87,2
0,250	18,60	18,12	17,90	80,4	84,7	86,8
0,300	18,64	18,20	17,94	80,1	84,0	86,4
0,350	19,04	18,42	18,06	76,7	82,0	85,3
0,400	19,22	18,58	18,18	75,3	80,6	84,2
0,450	19,14	18,56	18,30	75,9	80,7	83,1
0,500	19,16	18,64	18,46	75,8	80,1	81,6
0,600	19,18	18,96	19,02	75,6	77,4	76,9
0,750	19,32	19,22	19,08	74,5	75,3	76,4
1,000	19,50	19,54	19,50	73,2	72,9	73,2
A cuore	19,45	19,55	19,34	73,5	72,8	74,4

Tabella 5.1: Valori medi della misura delle diagonali delle impronte e dei relativi valori di microdurezza.

Alla luce dei risultati ottenuti, si è optato per un'intensità del trattamento di 5 A, poiché si è visto dare risultati simili rispetto all'intensità di 12 A mantenendo

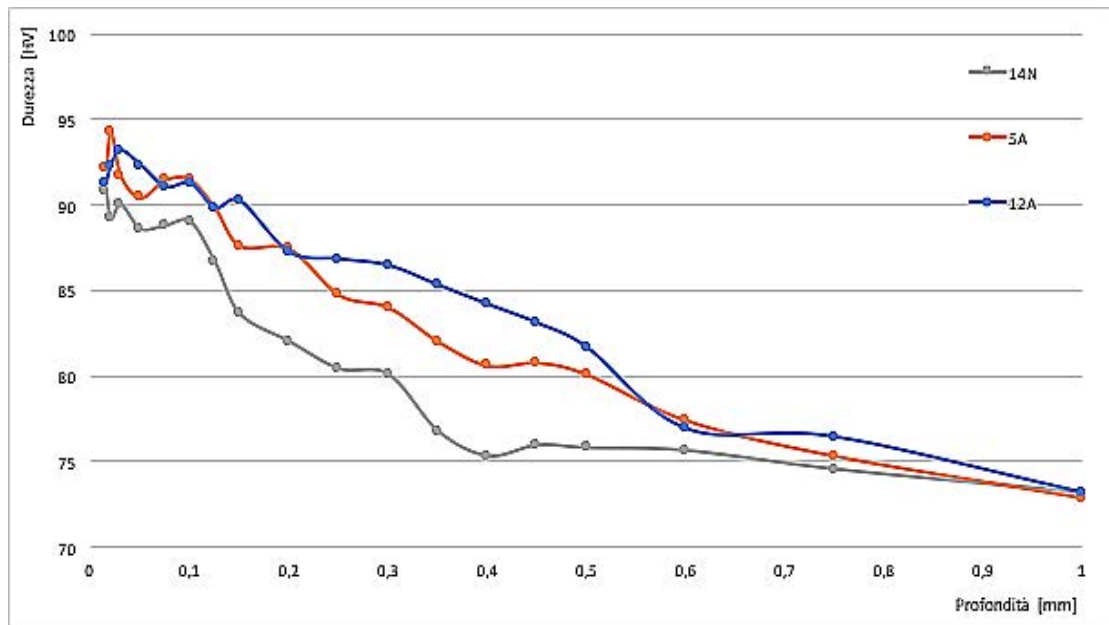


Figura 5.9: Andamento dei profili di durezza per le tre intensità di pallinatura analizzate.

tuttavia un certo margine di sicurezza dal rischio di *overpeening*. Per esaminare l'effetto della pallinatura sulla morfologia degli intagli è stato intagliato e pallinato uno spezzone del semilavorato, successivamente sezionato, inglobato in resina e lucidato per poter essere osservato al microscopio elettronico. Come è possibile vedere dagli esempi riportati in *Figura 5.10*, l'azione del *flap-peening* è andata a chiudere gli intagli, cancellando inoltre le rifollature presenti ai lati. In linea di principio, la forma ottenuta dagli intagli dovrebbe ora risultare più critica dal punto di vista della resistenza a fatica, ma ci si aspetta che l'incrudimento e lo stato di compressione introdotto dal trattamento sovrasti ampiamente tale effetto, migliorando quindi significativamente la resistenza a fatica dei campioni ove il danno è stato trattato.

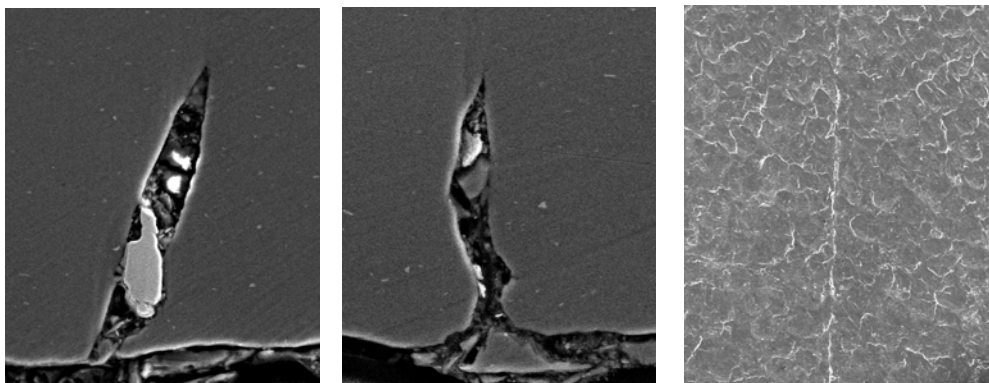


Figura 5.10: Immagini di alcuni intagli dopo pallinatura, visti in sezione e dalla superficie.

## 5.4 La prova di fatica

La prova vera e propria consiste nella verifica della vita a fatica dei provini intagliati e pallinati. Questa fase è sicuramente la più dispendiosa in termini di tempo, ma anche una di quelle che richiede maggior attenzione. Come visto nel capitolo 2, i risultati delle prove dipendono, anche fortemente, da un gran numero di parametri e il mancato controllo di essi va ad aggiungere variabilità ad una prova che già include un'incertezza intrinseca non trascurabile.

Fasi cruciali risultano quindi essere l'azzeramento della macchina e l'impostazione di un carico adeguato e stabile, che dia alla prova una durata sufficiente da non risultare oligociclica ma al contempo non eccessiva per non dilatare ulteriormente le già durevoli prove.

### 5.4.1 Descrizione del macchinario

La macchina utilizzata per effettuare le prove di fatica possiede una particolare conformazione schematizzata in *Figura 5.11*, adatta al test di interi semilavorati che vengono sottoposti a flessione alternata.[39] Un banco prova di  $2 \times 1,2$  m provvisto di scanalature a T permette di posizionare a piacere gli appoggi su cui verrà vincolato il semilavorato, mentre una struttura a castello sorregge il motore e gli elementi che trasmettono lo sforzo al provino.

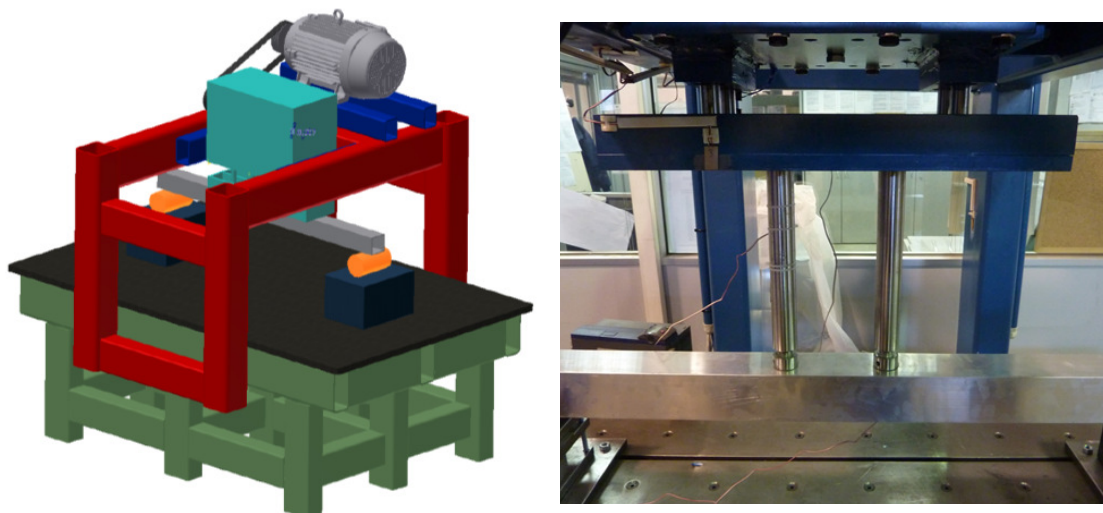


Figura 5.11: *Schema della macchina a disposizione per le prove di fatica su semilavorati[39] e immagine del provino estensimetrato in posizione.*

La rotazione del motore elettrico viene trasmessa ad una camma attraverso un rapporto di riduzione fisso. Essa movimentata un telaio a cui possono essere fissate una o due colonnette verticali che impongono al pezzo una deformazione costante

pari a 2, 3 mm. La velocità di rotazione del motore è controllata da un inverter e può essere impostata in modo da arrivare anche a 15 Hz di frequenza della sollecitazione imposta al semilavorato. Un contatore digitale permette di tener traccia dei cicli effettuati dalla macchina.

La camma utilizzata impone una forma d'onda non sinusoidale, ma che prevede una fermata a deformazione massima per una frazione importante del periodo. Tale andamento risulta essere più gravoso per il provino, anche se, come visto nel paragrafo 2.2.1, il suo effetto viene normalmente trascurato poiché difficile da quantificare e comunque scarsamente influente.

Nella configurazione utilizzata per la prova, che prevede sul campione la presenza di un tratto a momento costante, la deformazione è imposta da due colonnette verticali distanti 160 mm, che individuano quindi il tratto utile. Per evitare che venga sollecitata eccessivamente la faccia del tubolare dove le colonnette impongono lo sforzo, sono stati interposti tra esse due blocchetti di acciaio di modo che la spinta venga applicata equamente su tutta la larghezza.

Il banco prova è stato inoltre dotato di un sistema di acquisizione dati che sfrutta uno o più estensimetri applicati all'interno del tratto utile del provino per monitorare le sollecitazioni attraverso l'allungamento relativo locale, salvando i dati raccolti nella memoria di un computer.

### 5.4.2 Impostazione delle prove di fatica

La scelta dei carichi e della frequenza di lavoro è risultata piuttosto complessa, frutto di un inevitabile compromesso tra la maggior significatività di una prova ad elevato numero di cicli e la durata temporale delle prove stesse.

L'analisi dei modi di vibrare della trave va a porre un limite superiore alla frequenza imponente, per evitare di incappare in fenomeni di risonanza che falserebbero i risultati della prova. Per una trave appoggiata, le frequenze naturali si possono ottenere attraverso la formula:[30]

$$f_n = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{n}{L}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}}$$

dove  $n$  è il numero relativo al modo di vibrare,  $L$  la lunghezza della campata,  $E$  il modulo elastico del materiale,  $J$  il momento d'inerzia lungo l'asse di deformazione e  $m$  la densità lineare della trave. Nel nostro caso, la prima frequenza naturale è di circa  $15 \div 20$  Hz in base alla scelta del carico da imporre e quindi alla lunghezza effettiva della campata. Per mantenere in ogni condizione un sufficiente margine di

sicurezza, si è deciso di non superare la metà della minima frequenza naturale, non andando quindi oltre ai 7,5 Hz.

Per contenere quindi la durata delle prove e avere la possibilità di svolgerne un numero maggiore, si è deciso di considerare una resistenza teorica di circa un milione di cicli applicando, come anticipato nel paragrafo 5.2.1, una sollecitazione pulsante di ampiezza pari a 120 MPa.

Nel caso di una trave appoggiata soggetta a due carichi concentrati a distanze uguali dagli appoggi, che rispecchia la condizione di carico in esame, la freccia in corrispondenza dei punti di applicazione dei carichi si può calcolare dalla formula:[11]

$$f = \frac{P \cdot a^2}{2 \cdot E \cdot J} \cdot \left( L - \frac{4}{3}a \right)$$

dove  $P$  è il carico applicato, deducibile dalla sollecitazione che si desidera imporre, e  $a$  è la distanza tra appoggi e punto di applicazione dei carichi. Invertendo tale formula è possibile ricavare il valore di quest'ultimo parametro che mi garantisce una tensione di picco di 120 MPa sulla faccia inferiore del semilavorato, che risulta essere pari a 296 mm. Il diagramma del momento risulta quindi essere quello rappresentato in *Figura 5.12*, con le due forze applicate dal macchinario pari a 11900 N l'una e un momento flettente massimo di 3522,5 Nm.

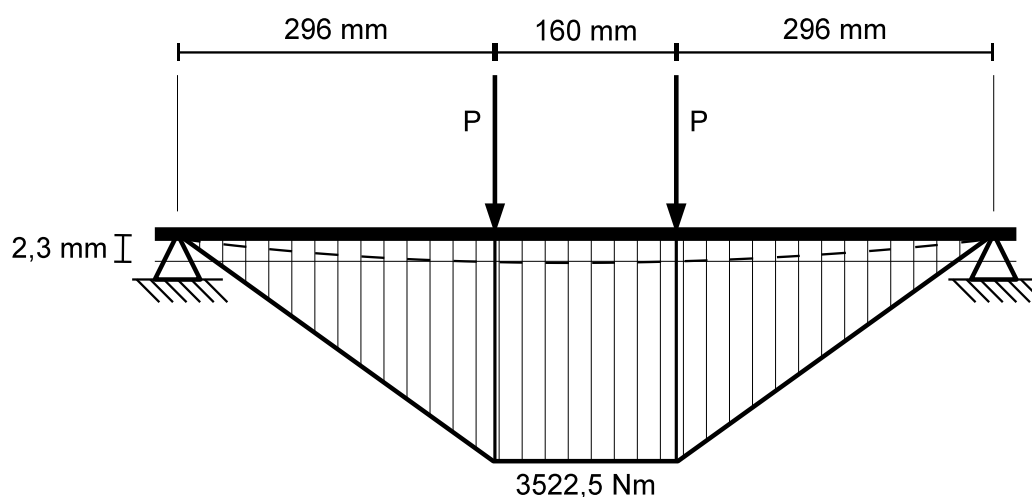


Figura 5.12: Schema delle misure e del momento flettente relativi al semilavorato in prova.

Grazie agli estensimetri applicati sui provini e alla centralina di acquisizione dei dati, è stato possibile di volta in volta verificare la regolarità dell'applicazione del carico e la correttezza dei valori di picco, potendo escludere quindi eventuali scivolamenti degli appoggi o delle colonnette. Attraverso la *legge di Hooke*, infatti,

si ricava che l'allungamento relativo previsto per un carico di 120 MPa è pari a  $1740 \mu\epsilon$  e tale valore può essere direttamente confrontato con quello misurato dalla centralina.

Nonostante la frequenza di campionamento di 8 Hz non sia sufficiente per un'analisi precisa delle sollecitazioni, risulta comunque possibile osservare per frequenze non troppo elevate l'andamento nel tempo della sollecitazione e in ogni caso risalire al momento del cedimento finale anche se esso avviene in assenza dell'operatore. Come visibile infatti in *Figura 5.13*, i dati raccolti permettono di ricostruire con discreta precisione l'andamento temporale della sollecitazione, ma l'elevato *sampling time* causa un errore di campionamento incoerente che rende impossibile la corretta individuazione di picchi e valli.[7]

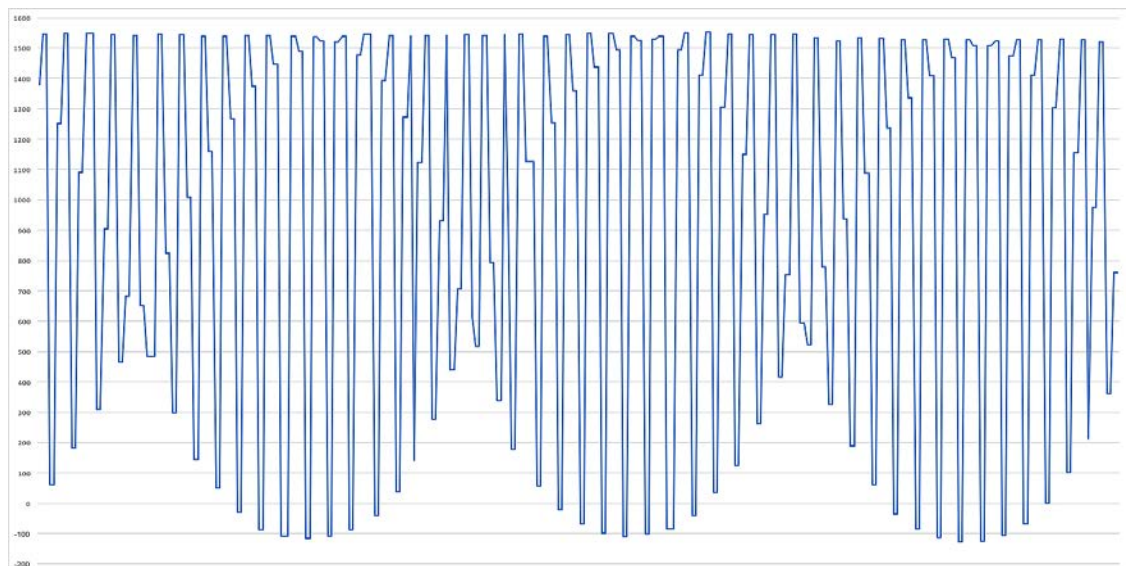


Figura 5.13: Esempio dell'andamento della sollecitazione durante le prove di fatica, a 2 Hz.

### 5.4.3 Analisi della frattura

Mano a mano che le prove venivano svolte, per verificare che il cedimento dei pezzi non fosse provocato dalla presenza di difetti occulti del materiale sono state analizzate le diverse zone di frattura. Oltre ad accertare la significatività dei risultati ottenuti, si è potuto studiare anche la morfologia della rottura, ricavandone osservazioni interessanti. Oltre a constatare che, come atteso, nei provini intagliati la rottura avvenisse proprio in corrispondenza del danno, si è riscontrata l'inclinazione della sezione di frattura di  $45^\circ$  rispetto alla direzione dello sforzo, caratteristica delle fratture per sovraccarico di tipo duttile. Essa è ben visibile in *Figura 5.14*. Si

possono notare inoltre delle cricche secondarie in prossimità del bordo della frattura.

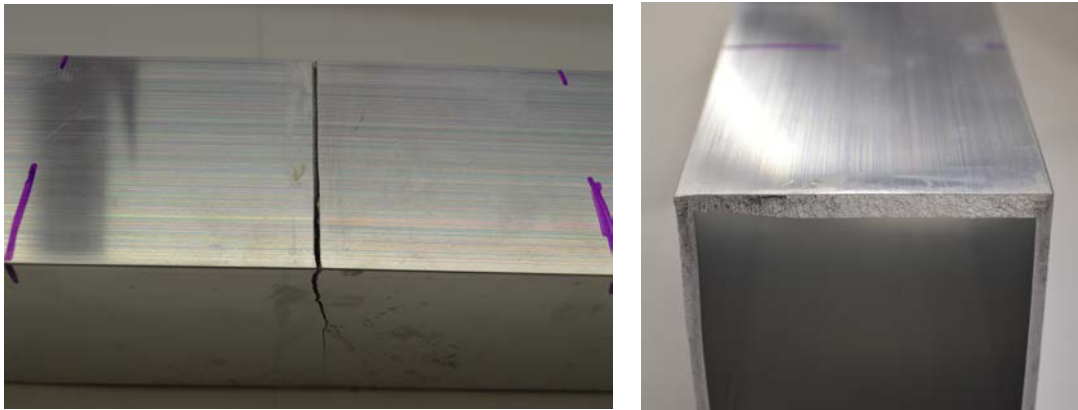


Figura 5.14: Foto del semilavorato fratturato e della sezione di rottura messa in evidenza una volta separate completamente le due metà.

Sfruttando delle immagini ottenute al microscopio elettronico, di cui alcuni esempi sono riportati in *Figura 5.15*, *Figura 5.16* e *Figura 5.17*, è stato possibile evidenziare ulteriori particolarità. È infatti chiaro come, al contrario della rottura per sovraccarico, l'avanzamento delle cricche di fatica si presenti ortogonale rispetto alla direzione dello sforzo, così come atteso e riportato nel paragrafo 2.1.3, e di tipo transgranulare. Si nota inoltre come l'avanzamento della cricca di fatica sia piuttosto

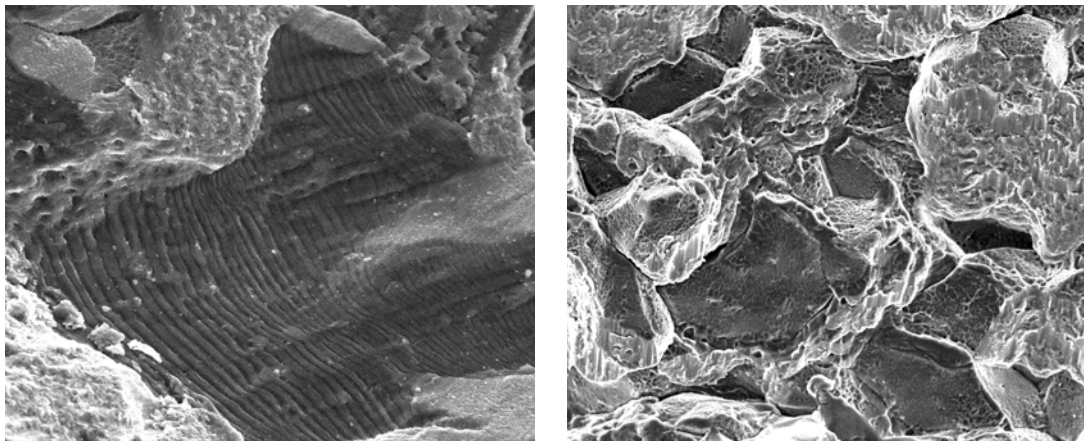


Figura 5.15: Immagini rispettivamente di una zona di propagazione della cricca di fatica, in cui si vedono chiaramente le linee di spiaggia, e di una zona di rottura per sovraccarico.

sto ridotto, a causa del carico applicato al semilavorato che, per quanto rientri con margine nelle condizioni di fatica ad alto numero di cicli, risulta comunque piuttosto elevato. Nella zona di propagazione sono inoltre ben visibili le linee di spiaggia,



caratteristiche delle rotture per fatica, mentre la zona rotta per sovraccarico si presenta frastagliata e irregolare, com'è tipico per materiali di natura duttile per cui la frattura è intergranulare.

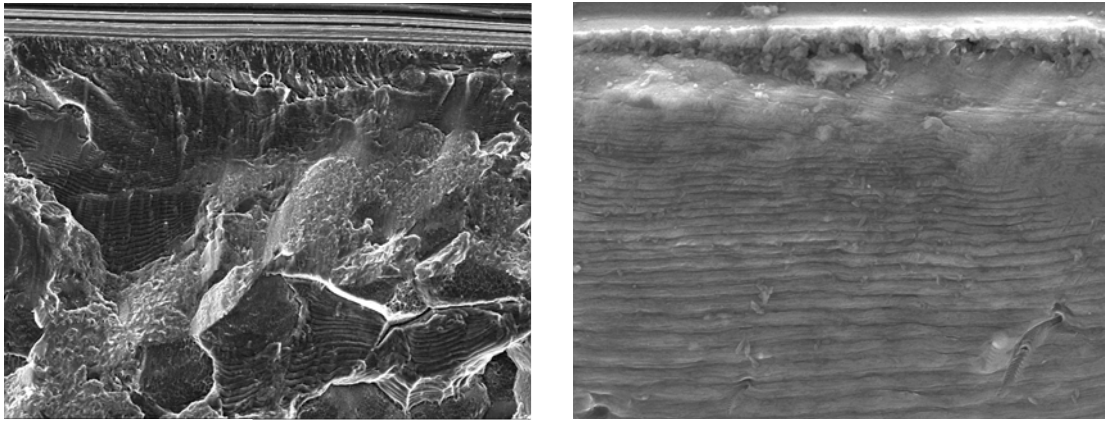


Figura 5.16: Immagini ingrandite della superficie di propagazione della cricca nel campione intagliato.

Osservando in particolare la *Figura 5.17*, relativa al campione intagliato e pallinato, si può notare come i *dimples* presenti sulla superficie superiore vadano a deformare la parete dell'intaglio senza però cancellarlo del tutto. Tale eventualità potrebbe accadere nel caso di intagli meno profondi e porterebbe alla totale cancellazione del danno, con benefici ancora superiori.

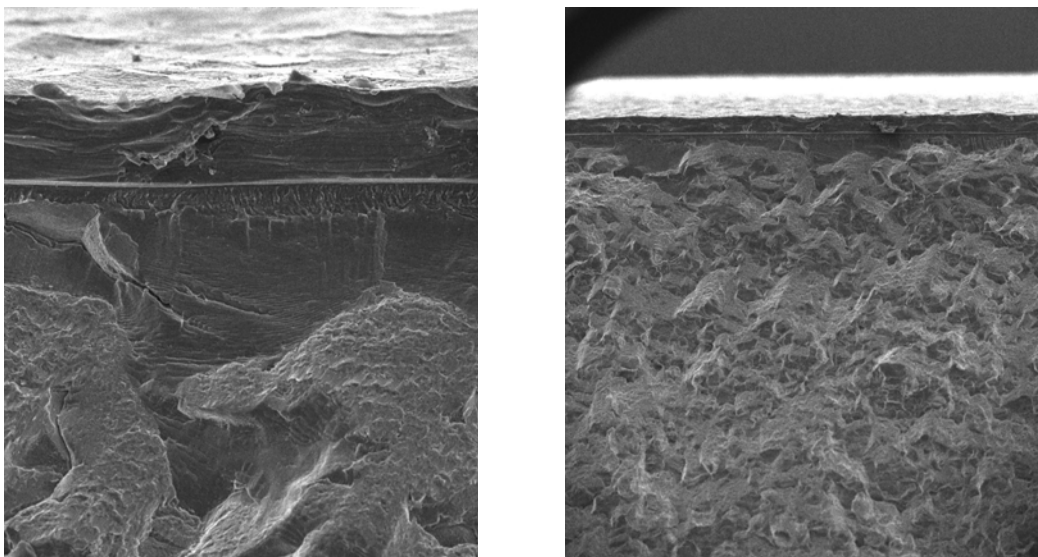


Figura 5.17: Immagini ingrandite della superficie di rottura del campione intagliato e pallinato.

## 5.5 Svolgimento e risultati delle prove

Tenendo presente che nella maggior parte dei casi il progettista meccanico, almeno inizialmente, non ha la possibilità di effettuare prove sperimentali per ricavare dati sulla vita a fatica del semilavorato utilizzato ma si deve basare sui valori teorici riportati in letteratura, è stato deciso di fare affidamento sulle durate riportate in bibliografia[53] e già citate nel paragrafo 5.2.1. Perciò, ipotizzando il criterio di progettazione *Safe Life* descritto nel paragrafo 2.4.1, si pone un milione di cicli come durata prevista del componente, già comprensiva del margine di sicurezza.

Una serie di prove sugli stessi semilavorati svolte in precedenza dall'azienda ospitante per altri studi vanno comunque a validare il dato, avendo registrato per le medesime condizioni una durata media di 1,4 milioni di cicli. Altre due prove di controllo sono state svolte per precauzione, ottenendo dati allineati con quanto precedentemente indicato.

Le successive prove hanno interessato i campioni intagliati, al fine di verificare che il danneggiamento causasse una riduzione della vita utile sufficiente da giustificare la necessità di un intervento di riparazione. Avendo ottenuto in media una durata pari al 40% di quella considerata da progetto, si può considerare il danno significativo e adeguato al tipo di sperimentazione in essere.

Sempre nell'ottica di avvicinarsi il più possibile ad un'applicazione pratica ragionevole, è stato deciso di ipotizzare un verosimile intervallo di ispezione del componente, evitando quindi la condizione per cui il danno venga riparato immediatamente dopo l'accaduto, eventualità alquanto rara nei contesti industriali più comuni. In base anche ai risultati ottenuti dai provini intagliati, si è deciso di simulare un intervallo di controllo pari a un quinto della vita prevista del componente.

Nella prova è stata quindi inserita una fase di 200000 cicli tra l'inizio della sollecitazione a fatica del campione intagliato e il successivo intervento di ripristino mediante *flap-peening*. Una volta eseguito il trattamento, le prove sui campioni sono state fatte proseguire fino al sopraggiungere della rottura. Se essa non avveniva una volta superato con un certo margine il milione di cicli complessivo, la prova veniva fermata e valutata con esito positivo, in quanto si considerava soddisfatto l'obiettivo di riportare la vita dei componenti ai valori precedenti il danneggiamento.

Valutazione simile a quella degli intervalli di ispezione non sarebbe altrettanto appropriata in relazione al momento in cui avviene il danneggiamento: nonostante sia assai improbabile, o comunque non così frequente, che esso avvenga prima dell'inizio dell'entrata in servizio del componente, l'evoluzione del danno e delle eventuali cricche preesistenti sono indipendenti e, essendo la fatica un fenomeno localizzato, la probabilità che vadano a influenzarsi tra loro negativamente è tanto bassa da

essere trascurabile rispetto all'incertezza considerata dal concetto di probabilità di sopravvivenza, secondo quanto già visto nei paragrafi 2.1.2 e 2.1.4.

Si può quindi considerare che la vita residua di un provino intagliato sia all'incirca di 400000 cicli dal momento del danneggiamento, a meno che il precedente affaticamento subito abbia effetto preponderante rispetto all'intaglio stesso. In tal caso, è compito dell'operatore valutare l'utilità dell'eventuale trattamento in base alla frazione di vita residua del componente quando il danno viene notato.

I provini trattati hanno tutti superato abbondantemente la soglia del milione di cicli, rompendosi intorno a 1,25 milioni o venendo fermati prima, ritenendo la prova superata con margine. Tali risultati confermano ampiamente l'applicabilità e l'efficacia del trattamento di *flap-peening* per ripristinare la resistenza a fatica propria del semilavorato prima dell'applicazione dell'intaglio. In *Tabella 5.2* sono riportate le durate in cicli di ciascuna prova, tra le quali spicca chiaramente il miglioramento ottenuto grazie al trattamento di pallinatura.

Tipo provini	Numero prova	Rottura?	Numero cicli raggiunti
Intagliati	1	sì	376020
	2	sì	450810
	3	sì	468842
Intagliati e pallinati	1	sì	1273778
	2	no	1163793
	3	no	1144610

Tabella 5.2: *Risultati delle prove di fatica sui diversi campioni testati.*

L'utilizzo di un carico piuttosto elevato sul semilavorato e quindi l'aver considerato una durata che, per quanto ampiamente in regime di fatica ad alto numero di cicli risulta molto inferiore rispetto al valore di riferimento convenzionalmente posto a 500 milioni di cicli per le leghe leggere (paragrafo 2.4.4), è un aspetto che non va a togliere significatività alla prova svolta, tant'è vero che, così facendo, si sono considerate condizioni più critiche, lavorando quindi in favore di sicurezza.

L'effetto benefico sulla resistenza a fatica delle tensioni residue di compressione introdotte dallo *shot-peening*, infatti, risulta essere tanto maggiore quanto più ridotto è lo sforzo applicato. Come visto nel paragrafo 3.2.4, le tensioni residue vanno a variare localmente il rapporto di ciclo, spostando la tensione media verso sinistra nel diagramma di *Goodman-Smith* (consultabile in *Figura 2.5* del paragrafo 2.2.1), ovvero verso le sollecitazioni negative. Se l'ampiezza dello sforzo ciclico è trascurabile rispetto al valore delle tensioni residue, la sollecitazione risultante sarà sempre di compressione, condizione indiscutibilmente meno critica per la resistenza a fatica.

Il notevole carico imposto dalla macchina e le elevate temperature ambientali registrate nel periodo della prova hanno reso necessario lavorare a frequenze inferiori rispetto a quelle previste per evitare il surriscaldamento della scatola della trasmissione. Questo contrattempo ha portato a una dilatazione dei tempi necessari per ciascuna prova rendendo impossibile testare il numero di campioni inizialmente preventivato. Nonostante ciò, l'evidente concordanza dei dati ottenuti dà modo di attestare con certezza il buon esito della prova sostenuta e di confermare quindi la tesi in essere.

# Conclusione

Lo scopo della prova svolta è quello di valutare l'esistenza di una possibilità concreta, efficace e facilmente applicabile per l'utilizzo del trattamento di pallinatura controllata, nello specifico di *flap-peening*, allo scopo di eliminare o quantomeno ridurre l'effetto di indebolimento a fatica causato da un danno accidentale verificatosi sulla superficie di un componente meccanico in lega di alluminio.

Per fare ciò si è studiato un metodo il più possibile ripetibile per provocare sui semilavorati a disposizione un intaglio che mantenesse le caratteristiche di un danno accidentale. Alcuni provini intagliati sono stati poi sottoposti a prove di fatica a flessione monodirezionale per verificare che l'effetto del danno provocasse una riduzione della vita a fatica rispetto a quella attesa sufficiente per giustificare la necessità di una sostituzione preventiva per mancata affidabilità del componente o, come nel caso in esame, di un intervento di ripristino delle caratteristiche iniziali.

Si sono in seguito svolte delle prove su alcuni spezzoni del semilavorato per valutare l'intensità di pallinatura più adatta per il tipo di materiale e per lo scopo del trattamento. Una volta optato per un'intensità di 5 A, il trattamento è stato eseguito nella zona del danno sui rimanenti provini intagliati, in seguito sottoposti anch'essi a prove di fatica.

Poiché tutti i provini testati hanno superato con margine la durata della vita utile ipotizzata per i campioni non danneggiati, è possibile affermare che tale trattamento ha avuto effetti ristoratori sulla superficie danneggiata, riportando i semilavorati in condizione di concludere il loro ciclo di vita previsto.

Questa tesi, per il ridotto campione statistico a disposizione, non si pone l'obiettivo di provare l'efficacia del metodo analizzato al di sopra di ogni ragionevole dubbio, ma si propone di aprire una strada a futuri studi più approfonditi che attraverso un maggior numero di prove possa verificarne con maggior sicurezza possibilità e limiti, studiare nel dettaglio i diversi aspetti che possono influenzare il risultato ed eventualmente ideare delle metodologie che possano amplificare i benefici ottenuti.

Alcuni possibili sviluppi futuri possono riguardare lo studio dell'effetto di una ripallinatura della superficie danneggiata a intervalli regolari allo scopo di migliorar-

ne l'efficacia, l'estensione dello studio su materiali diversi e il confronto dell'effetto ottenuto con diverse intensità di pallinatura.

Confermando la validità del trattamento si è comunque arrivati ad indicare una soluzione alternativa alla sostituzione di componenti che, a causa di un danno accidentale, non possono più dare garanzie di durata e quindi di sicurezza per i macchinari e gli utenti. Intervenendo con il *flap-peening*, trattamento rapido, versatile ed economico, può essere possibile riportare il pezzo alle caratteristiche di resistenza a fatica precedenti al danno, risparmiando sui costi dei ricambi che possono talvolta essere molto onerosi o addirittura irreperibili.







# Bibliografia

- [1] K.N. Abushgair. Experimental studies the effect of flap peening process on aluminum alloys. Technical report, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 2017.
- [2] G. Anzalone, P. Bassignana, and Brafa Musicoro G. *Corso di Meccanica - Solidi*, volume 1, 2, 3. Hoepli, 2005.
- [3] B. Atzori, G. Meneghetti, and B. Rossi. *Frattura ed integrità strutturale*, pages 33–45. Università degli Studi di Padova, 2009.
- [4] L. Baiocchi. La fatica nei materiali metallici: dalla teoria alla pratica. Master's thesis, Università degli Studi di Padova, 2011.
- [5] M. Benedetti, C.L. Azanza Ricardo, C. Santus, and V. Fontanari. Studio dell'effetto della pallinatura sul comportamento a fatica della lega al-7075-t651. In *XXXVI Convegno Nazionale*. Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, September 2007.
- [6] A. Bergo and C. Fragassa. Overpeening: un nemico nascosto da combattere. *Trattamenti e Finiture*, pages 32–37, February 2006.
- [7] M. Bertocco and A. Sona. *Introduzione alle misure elettroniche*. Lulu, 2012.
- [8] F. Bonollo. *Leghe di alluminio*.
- [9] F. Bonollo, P. Ferro, and G. Timelli. *Dispense di materiali metallici*. Libreria Progetto, 2012.
- [10] F. Bonollo and R. Tovo. Fatigue in al casting alloys: metallurgical aspects. Technical report, Project TALAT - European Aluminium Association, 1999. Lecture 1254.
- [11] L. Caligaris, S. Fava, and C. Tomasello. *Manuale di Meccanica*. Hoepli, 2006.

- [12] F. Carlà. L'influenza del trattamento superficiale di pallinatura sulle prestazioni a fatica della lega ti - 6al - 4v. Master's thesis, Università di Bologna, 2011.
- [13] M. Cavallini, V. Di Cocco, and F. Iacoviello. Rotture per fatica: due secoli di studi. In *Meccanica della frattura*.
- [14] F. Chichi. Introduzione alle tensioni residue: da nemico nascosto a prezioso alleato. *Il progettista industriale*, March 2014. Articolo online.
- [15] F. Chichi. La misura delle tensioni residue: ecco come operare con le tensioni superficiali. *Il progettista industriale*, May 2014. Articolo online.
- [16] F. Chichi. Le tensioni residue di primo, secondo e terzo tipo: le cause e l'effetto. *Il progettista industriale*, April 2014. Articolo online.
- [17] F. Chichi. L'ingegneria delle superfici: lo shot peening. *Il progettista industriale*, pages 38–42, September 2016.
- [18] F. Chichi, G. Marconi, and M. Lavecchia. Come raddoppiare il limite di fatica flessionale. *Trattamenti e Finiture*, pages 24–28, October 2017.
- [19] A. Cigada and T. Pastore. *Struttura e proprietà dei materiali metallici*. McGraw Hill, 2012.
- [20] R. Cobden. Aluminium: Physical properties, characteristics and alloys. Technical report, Project TALAT - European Aluminium Association, 1994. Lecture 1501.
- [21] M. Colussi. Studio dell'attrezzatura per l'esecuzione di prove sperimentali mediante metodi avanzati di progettazione a fatica. Master's thesis, Università degli Studi di Padova, 2014.
- [22] 3M Company. *3M<sup>TM</sup> Roto Peen Flap Assemblies TC330*, 2003.
- [23] M. Conserva, G. Donzelli, and R. Trippodo. *Aluminium and its applications*. Edimet, 1992.
- [24] G.P. Demelio. La fatica nei materiali. In *Corso di Meccanica dei Materiali*.
- [25] J.P. Den Hartog. *Mechanical Vibrations*. Dover Publications, 1934.
- [26] N.E. Dowling. *Mechanical behaviour of materials*. Pearson, 2013.

- [27] S. Forgues, B. Labelle, M. King, and N. Manor. Controlled rotary flap peening for repair applications. Technical report, Shockform Inc. and 3M Company, 2011.
- [28] C. Fragassa. I segreti della pallinatura controllata. *Trattamenti e Finiture*, pages 50–56, April 2007.
- [29] E. Gianotti. Alluminio e sue leghe. Technical report, Trattamenti Termici Ferioli & Gianotti.
- [30] M. Giovagnoni. *Analisi delle vibrazioni nei sistemi meccanici*. Libreria Internazionale Cortina, 2009.
- [31] G. Grosso and M. Di Tella. *Corso di Tecnologia Meccanica - Progetto ERGON*, volume 1, 2, 3. Edizioni Scolastiche Bruno Mondadori, 1996.
- [32] F. Iacoviello. Resistenza a fatica: procedure sperimentali ed analisi dei risultati ottenuti. Technical report, Università di Cassino, 2010.
- [33] International Standard. *ISO 1143 - Metallic materials - Rotating bar bending fatigue testing*, 2010.
- [34] S. Klapakjian and S.R. Schmidt. *Tecnologia meccanica*. Pearson, 2014.
- [35] D. Kosteas. Static design of members and joints. Technical report, Project TALAT - European Aluminium Association, 1999. Lecture 2401 to 2406.
- [36] B. Leban. Progettazione statica, 2018.
- [37] M. Lucifora. Caratterizzazione a fatica di leghe di alluminio per batterie di perforazione petrolifere. Master's thesis, Università di Pisa, 2004.
- [38] E. Macherauch. Introduction to residual stresses. Technical report, Universität Karlsruhe, 1984.
- [39] D. Maestrini, E. Carretta, F. Chichi, and G. Marconi. To test the fatigue resistance of aluminum components: A new patented equipment. Technical report, XVII International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals, 2014.
- [40] G. Marconi. Trattamenti meccanici per migliorare l'aspetto e le prestazioni dei manufatti. *Metal Cleaning & Finishing*, pages 35–39, January 2007.
- [41] G.M. Paolucci. *Lezioni di metallurgia*, volume 1, 2, 3. Libreria Progetto, 2002.

- [42] F. Perugini. Studio di un'attrezzatura per prove di ultrafatica. Master's thesis, Università di Bologna, 2012.
- [43] I. Pokorska, A. Nakonieczny, and C. Fragassa. Nitrurazione e pallinatura, un binomio per un acciaio da competizione. *Fonderia Pressofusione*, pages 46–52, November 2008.
- [44] M. Quaresimin and M. Zappalorto. *Costruzione di macchine*. CLEUP, 2014.
- [45] A. Rovoletto. Analisi numerica del fattore di concentrazione delle tensioni di una piastra soggetta a trazione e indebolita da intagli a v simmetrici. Master's thesis, Università degli Studi di Padova, 2015.
- [46] P.K. Saha. *Aluminium Extrusion Technology*. ASM International, 2000.
- [47] A. Secciani and G. Villani. *Produzione metalmeccanica*, volume 1, 2, 3. Cappelli Editore, 1996.
- [48] Metra S.p.A. *Lega di alluminio da estrusione EN AW - 6063*.
- [49] R.I. Stephens, A. Fatemi, R.R. Stephens, and H.O. Fuchs. *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & sons, 2001.
- [50] S.L. Straneo, R. Consorti, G. Manfè, and M. Straneo. *Disegno, progettazione e organizzazione industriale*, volume 1, 2, 3. Principato, 1995.
- [51] R. Sundström. High cycle fatigue properties of extruded 6060-t6, 6063-t6 and 6082-t6. Master's thesis, Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm, 2018.
- [52] S. Suresh. *Fatigue of materials*. Cambridge University Press, 1991.
- [53] T. Tomaszewski and J. Sempruch. Fatigue life prediction of aluminium profiles for mechanical engineering. Technical report, Bydgoska Szkoła Wyższa, 2017.
- [54] C. Vargel. Aluminium and the sea. Technical report, Alcan Aerospace, Transportation and Industry Inc., 2004.
- [55] Autori vari. *Manuale del Perito Industriale*. Edizioni Cremonese, 1980.
- [56] G. Vianello. *Corso di meccanica applicata alle macchine*, volume 1, 2, 3. Sansoni, 1977.
- [57] S. Zanol. Studio sull'efficacia del trattamento di pallinatura nel miglioramento della resistenza a fatica di leghe d'alluminio. Master's thesis, Università degli Studi di Trento, 2008.