

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
indirizzo Automazione



Tesi di laurea magistrale

Resistenza a fatica assiale e a flessione rotante della lega
 $AlSi9Cu3(Fe)$

Relatore

Prof Roberto Doglione

Candidato

Giovanni Simeone

A.A. 2021/2022

“Le speranze hanno quel certo destino da compiere, nascere l’una dall’altra, ed è per questo che, malgrado le tante delusioni, non sono ancora finite a questo mondo.”

JOSE’ SARAMAGO (Le intermittenze della morte)

“L’uomo è un Dio quando sogna e un mendicante quando riflette...”

FRIEDRICH HÖLDERLIN

Premessa e scopo della tesi

Lo scopo principale di questa tesi è lo studio in parallelo della resistenza a fatica sia a flessione rotante che a assiale di elementi metallici realizzati con la lega $AlSi9Cu3(Fe)$ attraverso prove di laboratorio su provini specificamente preparati con contenuti diversi di rame.

Si è scelto di partire con provini grezzi di colata aventi il 2,4% di rame (Cu) incrementandone il contenuto fino al 3,2%. Una volta preparati i provini da materiale grezzo di colata si è proceduto con trattamenti termici per cercare di osservare delle modifiche delle proprietà meccaniche rispetto ai fenomeni di fatica.

Come resistenza di fatica si è scelto un valore di 10 milioni di cicli, superato il quale il provino è stato smontato dall'apparecchiatura di prova e sostituito da un nuovo provino. In caso di rottura prematura del provino si è proceduto ad uno studio sulle cause della rottura.

Per avere una più corretta interpretazione non solo fisica ma anche chimica dei processi che intervengono nella risposta ai cicli di fatica a cui sono stati sottoposti i provini, sono stati fatti analizzare diversi campioni della lega al Microscopio ottico permettendo così di ricavare un'analisi degli elementi presenti all'interno della lega, delle fasi che vanno a creare e di come queste ultime possono influenzare la resistenza a fatica.

L'obiettivo finale è arrivare ad un'analisi accurata della lega che ne permetta una conoscenza profonda anche in risposta ai trattamenti termici T6 eseguiti a temperature di solubilizzazione diverse. Si è ipotizzato che uno studio completo di questa lega con curve di Wöhler per ogni diversa temperatura di solubilizzazione e variazione nella percentuale degli alliganti possa aprire la strada per il suo utilizzo nella realizzazione di nuovi componenti nei settori in cui è già utilizzata e farle trovare posizioni di mercato in settori nei quali non è ancora presente. Una volta raggiunto l'obiettivo si potrà ottimizzare anche il processo produttivo che porta alla realizzazione dei componenti e ridurre gli scarti di produzione per avere un ciclo di vita del prodotto più controllato e prevedibile.

Indice

<i>Premessa e scopo della tesi</i>	1
<i>Indice</i>	2
Cap 1: L'Alluminio e le sue leghe	4
1.1 L'Alluminio	4
1.2 Le leghe di Alluminio	5
1.2.1 Vantaggi dell'impiego dell'alluminio	5
1.2.2 Svantaggi dell'impiego dell'alluminio	5
1.3 Gli alliganti	6
1.4 Classificazione delle leghe di alluminio	7
1.5 Leghe a getti	8
1.6 Campi di applicazione delle leghe di alluminio	9
Cap 2: Il fenomeno della fatica	10
2.1 Il concetto di fenomeno di fatica	10
2.2 Tipologie di carichi ciclici	13
2.3 Danneggiamento per fatica	14
2.3.1 Nucleazione	14
2.3.2 Propagazione della cricca	15
2.3.3 Frattura finale	15
2.4 Propagazione della frattura	15
Cap 3: Storia della lega AlSi9Cu3(Fe)	17
3.1 Leghe Al-Si	17
Cap 4: Trattamenti termici	24
4.1 Storia dei trattamenti termici	24
4.2 Trattamento di precipitazione delle leghe non ferrose	25
4.3 Principali trattamenti termici delle leghe di alluminio	25
4.3.1 Tempra di soluzione	25
4.3.2 Tempra in acqua	26
4.3.3 Invecchiamento	26
4.4 Sistemi attivi di rafforzamento per precipitazione	27
4.5 Prove sul forno	28
4.5.1 Prove iniziali a 180°C	30
4.5.2 Prove iniziali a 460°C	31
4.5.3 Prove finali a 180°C	32
4.5.4 Prove finali a 460°C	33
4.6 Bagno di tempra	34
Cap 5: Fatica a flessione rotante	35
5.1 Descrizione della prova	35

5.2 Descrizione della macchina	36
5.3 Prove sperimentali	40
5.3.1 Procedura settaggio sforzo sulla macchina	40
5.4 Risultati ottenuti	41
5.5 Conclusioni	43
Cap 6: Fatica assiale	44
6.1 Descrizione della prova	48
6.2 Descrizione della macchina	49
6.2.1 Parte hardware	50
6.2.2 Parte software	54
6.2.3 Spegnimento automatico della macchina	58
6.3 Prove sperimentali	59
6.3.1 Procedura settaggio sforzo sulla macchina	59
6.4 Risultati ottenuti	60
6.5 Conclusioni	62
Cap 7: Analisi al microscopio ottico	63
7.1 Dettagli dei difetti	64
7.2 Descrizione delle rilevazioni	69
7.3 Misurazione del difetto	72
7.4 Durezza Vickers	76
Cap 8: Conclusioni	79
Bibliografia	81

Cap 1: L'Alluminio e le sue leghe

1.1 L'Alluminio

L'ALLUMINIO PURO (minimo di alluminio pari al 99.50%) è un metallo di color grigio argenteo con una struttura cristallina cubica a facce centrate.



Figura 1: Lattine e Struttura cristallina cubica a facce centrate dell'alluminio

La sua densità e la sua temperatura di fusione sono pari rispettivamente a 2700 kg/m³ e 660°C. Le principali proprietà dell'alluminio puro, che lo hanno reso importante a livello industriale, sono:

- bassa densità
- buona conducibilità elettrica e termica, pari a circa 2/3 della conducibilità del rame
- elevata grado di deformabilità
- buona resistenza alla corrosione in ambienti neutri con pH da 4 a 8
- buona saldabilità
- elevata riflettanza
- paramagnetismo
- atossicità
- elevate doti di lavorabilità meccanica (malleabilità e duttilità)
- facilità di trattamento superficiale
- riciclabilità

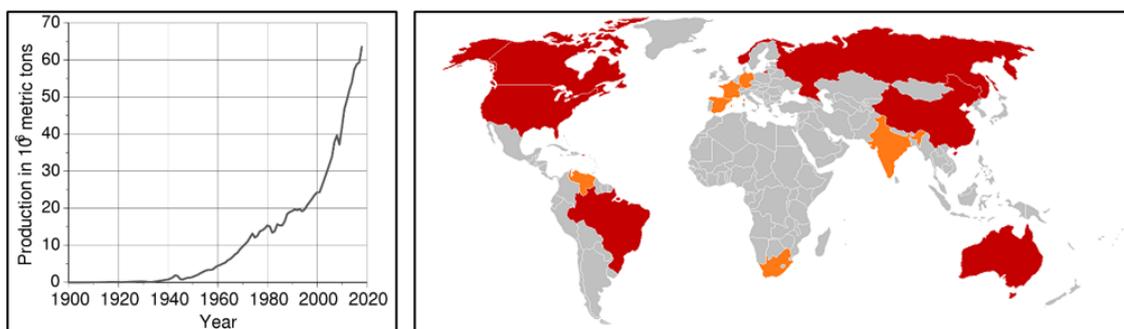


Figura 2: Produzione annuale dell' alluminio e principali paesi produttori

L' alluminio primario utilizzato nelle fonderie viene ricavato a partire dalla bauxite tramite un procedimento che prevede due stadi successivi:

1. Produzione di allumina Al_2O_3 dalla bauxite (processo Bayer)
2. Elettrolisi di allumina fusa in criolite (processo di Hall-Héroult)

Combinato con altri elementi si ha un cambiamento radicale delle caratteristiche. Ad esempio l'ossido di alluminio (Al_2O_3) o corindone (i cristalli trasparenti della migliore qualità sono più conosciuti come zaffiri e rubini), è la sostanza naturale più dura dopo il diamante, con durezza relativa 9 nella scala di Mohs.

1.2 Le leghe di Alluminio

Le proprietà meccaniche dell'alluminio puro, allo stato ricotto, non sono particolarmente elevate e ne hanno da sempre impedito un ampio utilizzo in ambito industriale, per applicazioni strutturali, dove invece trovano largo impiego le sue leghe.

1.2.1 Vantaggi dell'impiego dell'alluminio

- Bassa T di fusione (per l'Al puro è $660^\circ C$, per le leghe è ovviamente più bassa)
- Fluidità del liquido
- Ottima finitura superficiale
- In alcune famiglie di leghe risponde ai trattamenti termici di rafforzamento; non risponde nelle leghe binarie Al-Si che non danno precipitati metastabili; le leghe da pressocolata Al-Si-Cu-Mg vanno trattate con cautela perché possono dare luogo a blistering se presente un'ampia porosità.

1.2.2 Svantaggi dell'impiego dell'alluminio

1. Ritiro da solidificazione
 - Dipende dalle fasi presenti; l'Al puro ritira molto, il 6%
 - In generale gli elementi leganti non spostano un gran che il problema
 - Il Si contrasta il ritiro, perché il Si solido ha una densità prossima a quella della lega liquida
 - Le leghe ipereutetiche ritirano solo 1-2%
2. Difettologia varia tipica della fonderia
 - È necessario controllo composizionale per evitare gli strappi a caldo
 - Presenza di tensioni residue (questo vale per qualunque materiale colato)
 - Possibilità di distorsioni se si rilasciano le tensioni residue con ricottura di distensione
 - Le leghe per pressocolata di solito non si trattano termicamente (F) se non applicando T5; il T6 impone cautele a causa del pericolo di blisterin

3. Hot Tearing (strappi a caldo)

Si può avere l'insorgenza di strappi a caldo quando lo stress, a causa della presenza d'intagli e rientranze geometriche, durante le ultime fasi di solidificazione supera la resistenza a trazione del metallo pastoso. Vi sono fattori che lo promuovono, altri che lo contrastano:

- Gli hot spots (punti caldi a fine solidificazione) alle rientranze ed intagli, che generano solidificazione finale isolata con vincolo volumetrico al ritiro liquido-solido, favoriscono molto la nucleazione di cricche intergranulari
- Il Fe, usualmente indesiderato perché ritenuto impurezza fragilizzante, se presente in quantità sufficiente (1-2%), fluidifica l'ultimo liquido abbassandone la temperatura eutettica e accomoda il metallo pastoso allo stress
- I grandi intervalli di solidificazione favoriscono il fenomeno, perché alla fine si ha poco liquido eutettico che può riempire e riparare le cricche da strappo a caldo
- Le leghe Al-Cu e Al-Mg sono suscettibili
- Leghe Al-Si sono resistenti per via della fluidità impartita dal Si al liquido eutettico

1.3 Gli alliganti

I principali elementi di alligazione utilizzati nelle leghe commerciali sono il rame, il manganese, il silicio, lo zinco e il magnesio; gli effetti di tali elementi sulle proprietà dell'alluminio sono elencate:

	Cu	Mn	Si	Mg	Zn
Proprietà meccaniche	↑↑	↑	↑	↑	↑↑
Deformabilità a freddo	↓	↑	↓	↓	↓
Resistenza a corrosione	↓	↑	=	↑	=
Saldabilità	↓	↑	=	↑	↓

Tabella 1: Effetti degli alliganti ↑ migliora; ↓ peggiora; = rimane invariata

Silicio (Si): migliora la colabilità e riduce il coefficiente di dilatazione; nelle leghe ipereutettiche (Si>12%) conferisce alla lega un certo potere autolubrificante.

Rame (Cu): accresce la resistenza meccanica a caldo, la resilienza e la resistenza a fatica; peggiora la saldabilità della lega.

Magnesio (Mg): Conferisce alla lega un buon comportamento alla corrosione, infatti le leghe Al-Mg, in presenza di elementi alcalini o in ambiente marino, hanno caratteristiche anche migliori dell'alluminio puro.

Manganese (Mn): Nella fonderia è principalmente impiegato come correttivo nei confronti del ferro, elemento indesiderato, svolgendo la funzione di tampone.

Zinco (Zn): È stato uno dei primi leganti dell'alluminio. Viene utilizzato per aumentarne la resistenza e la durezza, ma determina una scarsa resistenza alla corrosione a fronte di una buona lavorabilità.

1.4 Classificazione delle leghe di alluminio

Le leghe dell'alluminio vengono suddivise in due categorie:

- leghe da deformazione plastica;
- leghe per getti

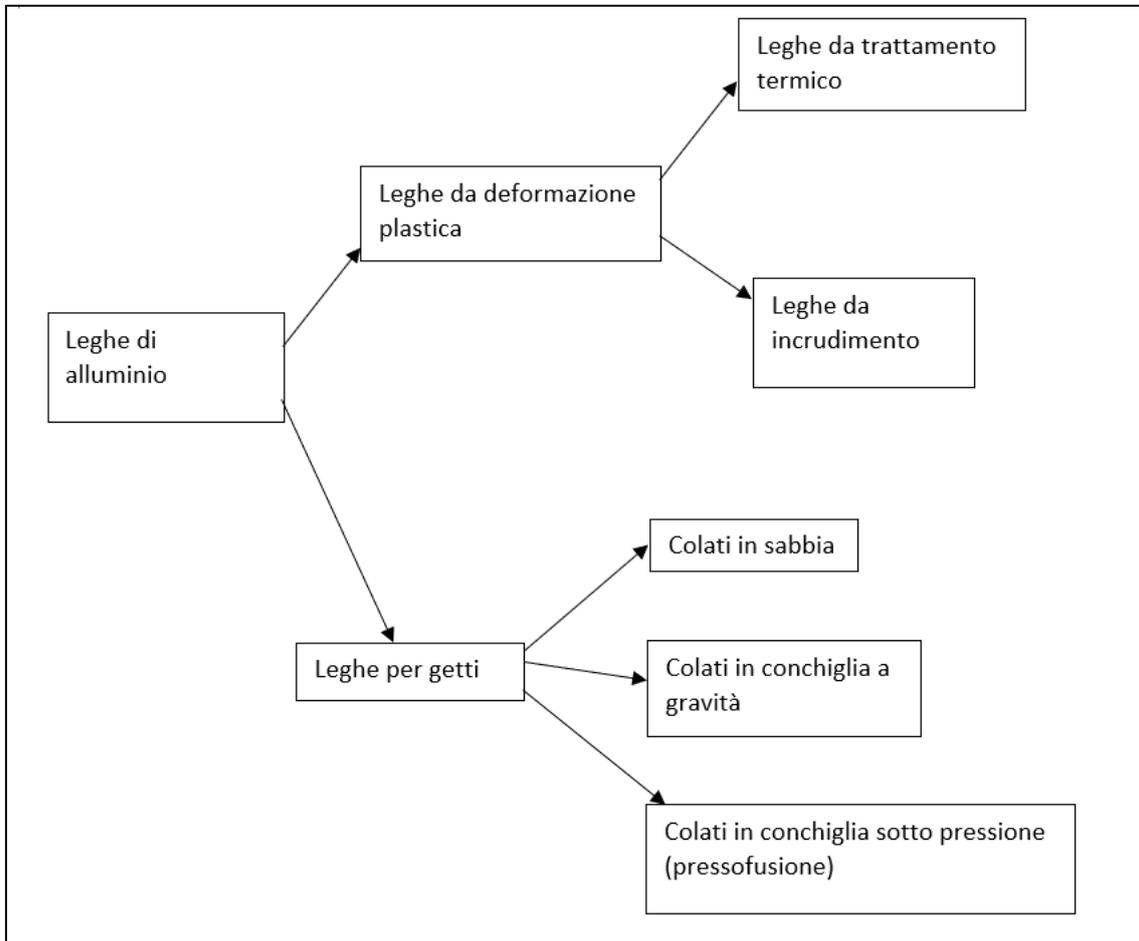


Figura 3: Classificazione generale delle leghe di alluminio

Dato l'elevato numero di leghe di alluminio realizzabili, si è deciso di utilizzare un sistema per la designazione di questo tipo di leghe che si basa su di un numero di quattro cifre che ha valore simbolico e che permette di individuare la composizione chimica della lega.

Secondo l'organismo di normazione statunitense ASTM (American Society for Testing and Materials International) le leghe da fonderia sono così classificate:

- leghe 1xx.y: è alluminio non legato di composizione controllata delle impurezze, soprattutto Fe e Si; le cifre xx designano la purezza indicando la percentuale oltre il 99%; per esempio la lega 150.y è Al con purezza del 99,5%
- leghe 2xx.y contengono Cu come principale elemento in lega
- leghe 3xx.y contengono Si come elemento legante principale, ma possono anche contenere Mg e Cu
- leghe 4xx.y sono leghe binarie Al-Si
- leghe 5xx.y contengono Mg come principale elemento in lega
- leghe 6xx.y serie non usata
- leghe 7xx.y contengono Zn come elemento legante principale e Mg come legante secondario, ma possono anche contenere Cu, Mn e Cr

- leghe 8xx.y contengono Sn come principale elemento in lega
- gruppo 9xx.y serie non usata
- Le cifre xx designano la singola lega senza implicare la composizione
- La cifra y vale:
 - 0 per i getti
 - 1 per i lingotti standard
 - 2 per i lingotti con forcelle composizionali più strette dello standard, pur se comprese in quello; tale specificazione è dovuta al fatto che rifornendo i lingotti le quantità di Fe e Zn tendono ad aumentare, quelle di Mg a diminuire
- Le lettere maiuscole che possono precedere la designazione numerica indicano modificazioni della lega o differenti limiti delle impurezze. Di solito la purezza cresce nell'ordine A → B → C

La lettera che identifica il tipo di trattamento termico può ad esempio essere:

- F - grezzo di colata.
- O - ricotto.
- T4- Solubilizzato e temprato (segue invecchiamento naturale)
- T5- invecchiato artificialmente
- T6 - solubilizzato, temprato ed invecchiato artificialmente
- T7 – solubilizzato, temprato e superinvecchiato
- T8 – solubilizzato, temprato, deformato a freddo e invecchiato artificialmente; nelle leghe da fonderia non è mai praticato, salvo casi speciali come quando si vuole aumentare il limite elastico in compressione dei supporti

1.5 Leghe a getti

La scelta della tecnica di colata è essenzialmente legata a motivazioni di carattere economico:

- la formatura in sabbia viene preferita a quella in conchiglia nel caso in cui i componenti presentino elevata complessità geometrica e debbano essere prodotti in quantità limitata;
- la colata in conchiglia per gravità o sotto pressione viene invece adottata quando sia necessario garantire un'elevata produttività, indispensabile in produzioni di media e grande serie; tale tecnologia richiede però investimenti iniziali di elevata entità sia per l'acquisto degli stampi che dei macchinari per la colata.

La tecnica di colata influenza molto la microstruttura del getto e le sue proprietà meccaniche. Di norma l'utilizzo di conchiglie metalliche, a più elevata conducibilità termica rispetto alle forme in sabbia, permette la creazione di strutture con microstruttura più fine e maggiore resistenza meccanica. La maggior velocità di raffreddamento delle conchiglie e l'elevata rigidità possono però causare l'insorgere di tensioni residue che, unitamente al problema della fragilità a caldo tipica dei getti d'alluminio, può provocare la cricatura del semilavorato.

1.6 Campi di applicazione delle leghe di alluminio

Il principale campo di applicazione delle leghe di alluminio è quello dei trasporti e in particolare il settore aeronautico dove ricopre un'importanza fondamentale il suo basso peso strutturale. Il rapporto proprietà meccaniche/peso è uno dei migliori in circolazione tanto da riuscire a ritagliarsi uno spazio di mercato ancora importante nonostante l'avvento dei materiali compositi. Fino a dieci anni fa, più del 70 % della struttura di un aeroplano era costituita in lega leggera.

Un altro campo in cui queste leghe hanno trovato molto spazio è quello motoristico/ferroviario per la realizzazione di componenti del motore e si stima che specifici trattamenti termici possano portare l'utilizzo di questa lega anche alla produzione di componenti che raggiungono temperature superiori con i benefici importanti per la riduzione del peso.

In fonderia si fanno:

- Blocco motore
- Cilindri, pistoni
- Supporti motore, supporti alternatore
- Collettori
- Pulegge, parti ausiliari, smorzatori
- Carcassa e alloggiamenti trasmissioni
- Ruote
- Braccetti di sospensione

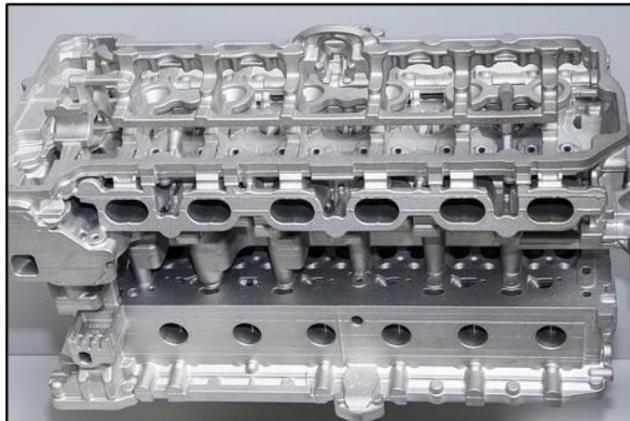


Figura 4: Componenti realizzati in Alluminio

Cap 2: Il fenomeno della fatica

2.1 Il concetto di fenomeno di fatica

Quando si parla di fatica nel campo della meccanica si intende un fenomeno di progressiva degradazione di un materiale sottoposto a carichi variabili nel tempo (NON COSTANTI) che porta alla rottura del materiale anche se è rimasto nel suo limite elastico e non ha mai raggiunto il campo plastico. Questo ha portato ad uno studio più accurato delle sollecitazioni, soprattutto se variabili, a cui i componenti meccanici sono sottoposti. In passato la rottura per fatica è stata la principale causa di rottura di molti pezzi che lavoravano ad un valore inferiore alla loro tensione di rottura o di snervamento statico e che quindi si pensava operassero in una condizione di sicurezza. Nonostante il fenomeno sia conosciuto da anni ed un attento studio abbia portato grandi miglioramenti in ambito industriale, si stima che sia ancora tutt'oggi responsabile di circa il 90 % delle rotture degli organi di macchine in materiale metallico riportanti appunto le caratteristiche del cedimento a fatica. In Italia è tristemente noto l'incidente ferroviario di Viareggio del 2009 che ha portato alla morte di 32 persone generato dal cedimento per fatica di un'asse di un carrello del treno merci.

Alla fine del XIX secolo si continuavano a osservare una serie di rotture considerate "inspiegabili" di assi ferroviari progettati per resistere a carichi (statici) ben superiori a quelli per cui avveniva la loro rottura improvvisa in esercizio. Il 19 ottobre del 1875, si verificò il deragliamento della locomotiva AMSTETTEN sulla rotta Salisburgo-Linz. La causa del deragliamento fu la rottura di una ruota, che non aveva resistito al carico rotante permanente. Il primo ad intuire che la rottura fosse dovuta alla natura ciclica del carico fu August Wöhler un ingegnere tedesco che lavorava sulla produzione di binari.

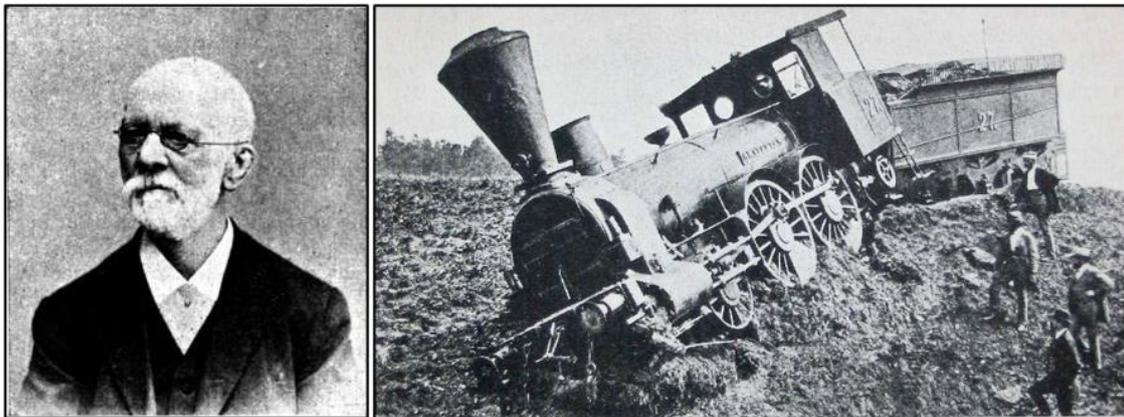


Figura 5: August Wöhler e deragliamento della locomotiva AMSTETTEN

Wöhler cercò di ricostruire in laboratorio lo stato di sollecitazione, mettendo sotto una attenta lente di osservazione due parametri: lo spazio massimo del ciclo di sollecitazione con il numero di cicli che il componente riusciva a compiere prima della rottura. Ne ricavò una serie di curve su base statistica chiamate "diagrammi di Wöhler", che sono un forte supporto alla progettazione di componenti meccanici sollecitati a fatica. Dopo un'attenta analisi statistica ricavata da un importante campionamento, osservò che alcuni materiali avevano un limite inferiore di sollecitazione al di sotto del quale il materiale non si rompe nemmeno se sottoposto ad un numero molto alto di cicli (teoricamente infinito, nella pratica dell'ordine del

milione di cicli), questo valore è chiamato Limite di fatica. È importante ricordare che le curve di Wöhler sono curve generiche, aventi in ascissa il numero di cicli che il provino compie prima di rompersi e in ordinata l'ampiezza dell'oscillazione. Sono quindi curve che non contengono altre informazioni come la tensione media del carico oppure la frequenza a cui la prova viene effettuata. Non viene tenuto conto della temperatura a cui il provino sta operando che in alcune condizioni può essere un parametro fondamentale che porta a ridurre drasticamente il limite inferiore di sollecitazione, oppure se il provino ha subito dei trattamenti termici di rafforzamento delle sue proprietà meccaniche. Nonostante siano delle curve ideali e non tengano conto di diversi aspetti riguardanti la storia del materiale sono state un primo e determinante strumento per la comprensione del fenomeno che ha permesso la spiegazione di molti fenomeni distruttivi che prima non trovavano risposta.

Per poter essere utilizzate in maniera adeguata vanno applicati dei fattori correttivi che tengano conto di tutte le differenze tra il caso ideale e il caso reale. Sono molti gli aspetti che possono giocare un ruolo significativo che possono portare addirittura fino ad un dimezzamento del limite di fatica calcolato con il caso ideale; è quindi necessario uno studio molto approfondito.

È importante notare come oltre un certo valore di ampiezza di oscillazione di carico non serve scendere per preservare il materiale perché tanto si è sempre sotto il limite di fatica.

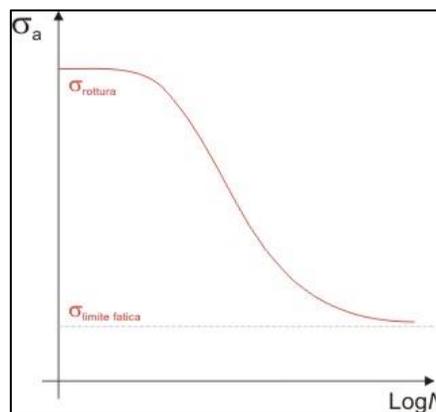


Figura 6: Andamento della sforzo di rottura in funzione del numero di cicli

Nelle immagini seguenti sono evidenti classici casi di componente sottoposto a flessione rotante. Le ruote vanno avanti e sull'albero che unisce le due ruote agisce un carico (nel caso studiato da Wöhler era il peso del contenuto del carrello). L'albero è quindi sottoposto a flessione con la parte superiore soggetta a compressione e la parte inferiore soggetta a trazione che variano ciclicamente come si può osservare nel diagramma.

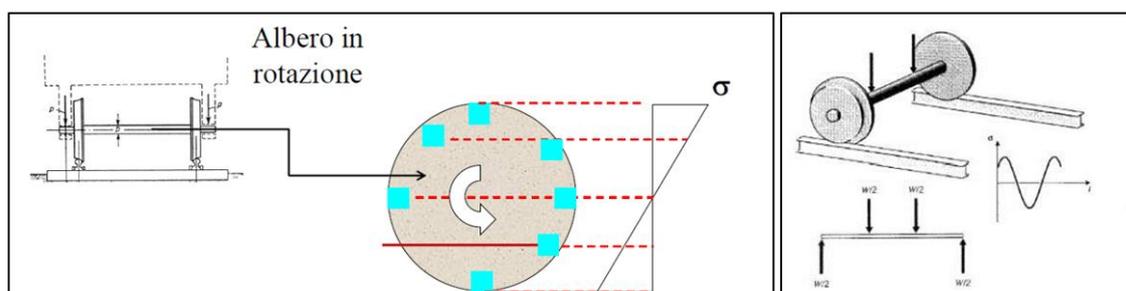


Figura 7: Componenti sottoposti a flessione rotante

Diagramma che rappresenta un tipo di grafico periodico, caratterizzato da una determinata frequenza. Raggiunge un massimo e un minimo in maniera ciclica.

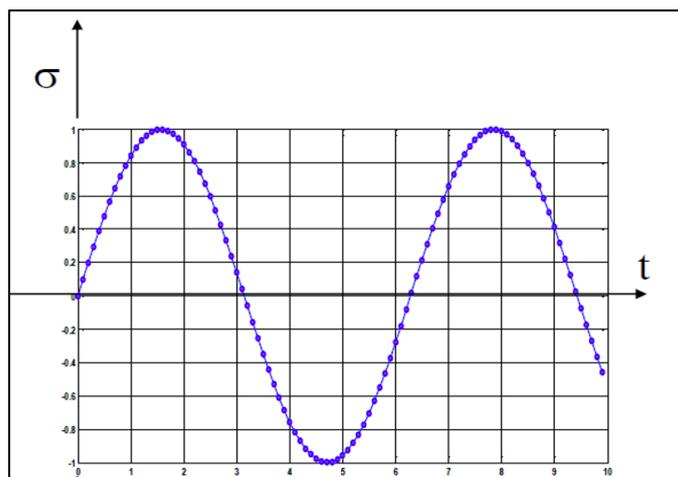


Figura 8: Andamento sinusoidale dello sforzo

Per descrivere il ciclo di carico a cui il componente è soggetto sono necessari:

1. parametro temporale: il numero dei cicli effettuati nel tempo considerato
2. parametri indipendenti relativi alla tensione o alla deformazione subita dal materiale

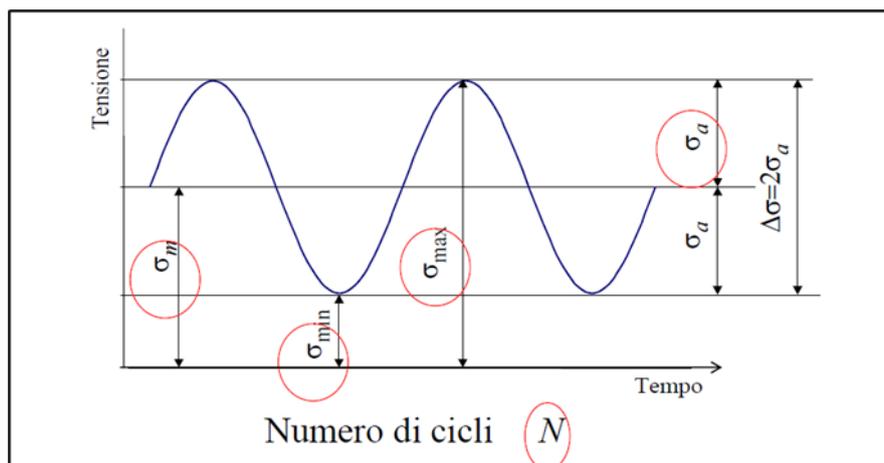


Figura 9: Parametri indipendenti

I due parametri corrispondono a una fra le seguenti scelte

1. σ_{\max} e σ_{\min} tensione massima e tensione minima
2. $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ tensione media e $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ tensione alternata

Come si vede dalle formule, posso scegliere entrambe le coppie di parametri essendo intercambiabili tra loro. Nella letteratura tecnica alcune volte sono utilizzati in alternativa:

$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a$ campo di tensione

$R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ rapporto di tensione $R = \sigma_a/\sigma_m$ rapporto di ampiezza

Queste ultimi vengono utilizzate in campi scientifici specifici per una migliore descrizione o parametrizzazione. Su alcune macchine è difficile impostare i parametri diretti delle forze e si deve quindi parametrizzare la forza applicata tramite formulazione matematica.

2.2 Tipologie di carichi ciclici

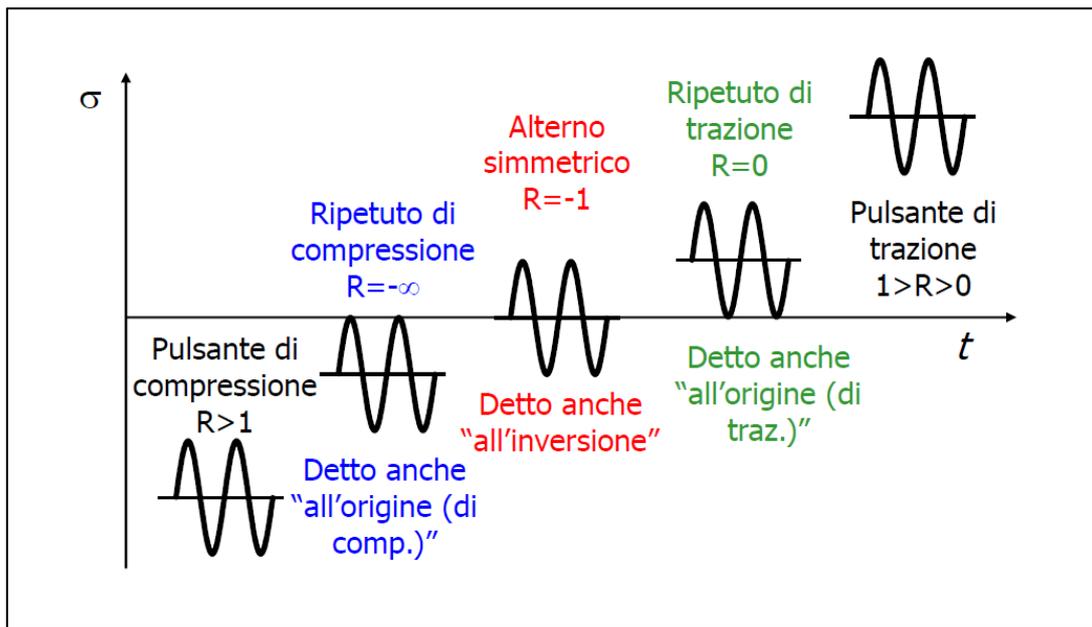


Figura 10: Tipologie di carichi ciclici

Come si vede dall'immagine e da quanto detto prima esistono vari tipi di carichi ciclici, in base al fatto che sia presente solo componente di compressione (primi due), solo componente di trazione (ultimi due) oppure si alternino trazione e compressione (centrale). In termini di fatica propagata a partire da una cricca superficiale il carico di trazione è deleterio e porta il componente alla rottura mentre quello di compressione tende a non far propagare la cricca. Solitamente i componenti sottoposti a carichi ciclici di trazione tendono ad avere una durata inferiore rispetto ai rispettivi sottoposti a carichi ciclici di compressione. La cricca tende ad aumentare progressivamente con il carico.

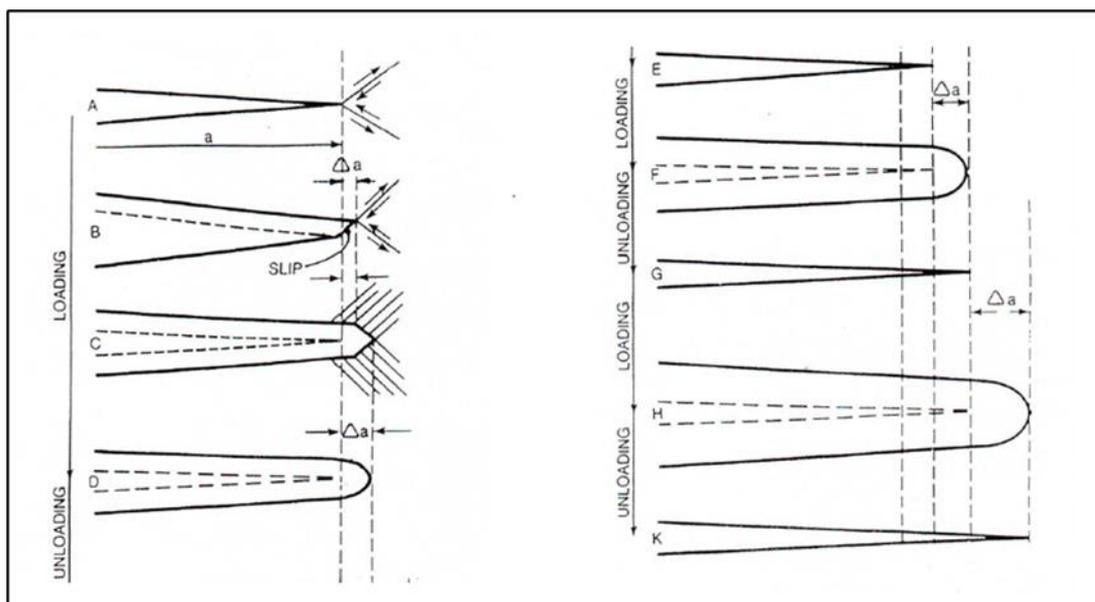


Figura 11: Propagazione del difetto

2.3 Danneggiamento per fatica

Per capire bene il meccanismo di fatica nei materiali metallici, bisogna considerare i fenomeni di micro-deformazioni plastiche locali provocate dal ciclo di sollecitazioni. Per effetto di intagli e discontinuità (bordi di grano, inclusioni non metalliche, rugosità superficiali e altre imperfezioni che sono presenti sulla superficie del componente) localmente si ha una concentrazione di tensioni che superano il limite elastico e provocano delle microdeformazioni plastiche che difficilmente possono essere rilevate dato che macroscopicamente il carico si mantiene al di sotto del limite elastico e tende a far stare tranquilli i progettisti.

Nel corso del tempo la trattazione e l'analisi scientifica del fenomeno della fatica ha suddiviso il danneggiamento nei seguenti stadi:

1. Nucleazione
2. Propagazione della cricca
3. Frattura finale

2.3.1 Nucleazione

Può succedere che durante la sollecitazione ciclica del componente alcuni grani favorevolmente orientati producano scorrimenti tra i piani cristallini delle dislocazioni. Sono fenomeni di natura plastica nonostante il provino stia operando macroscopicamente in campo elastico. Questi cambiamenti rendono la superficie propensa alla fessurazione.

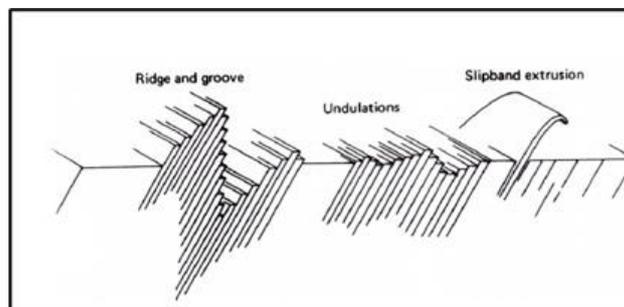


Figura 12: Superficie propensa alla fessurazione

2.3.2 Propagazione della cricca

Il primo tratto di propagazione della cricca avviene lungo una direzione di 45° dei difetti, in seguito il cammino di propagazione è ortogonale alla direzione del massimo stress principale, in caso di carico monoassiale. Dopo la nucleazione della cricca, la propagazione avviene in maniera transgranulare e in senso perpendicolare a quello di massimo sforzo; ad ogni ciclo di sforzo la cricca avanza di un “passo” e lascia tracce caratteristiche dette “Striature”. L'intensificazione degli sforzi si ha all'apice della cricca. Si ha deformazione plastica e propagazione della cricca come nella frattura duttile; aumenta il raggio di plasticizzazione all'apice della cricca e di conseguenza σ_{max} diminuisce, arrestando la cricca stessa.

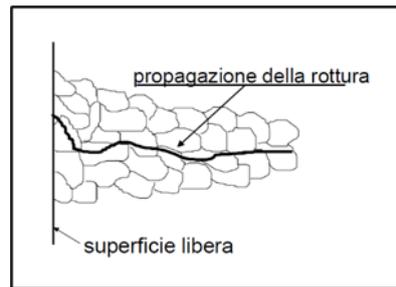


Figura 13: Propagazione della rottura

2.3.3 Frattura finale

Man mano che la cricca propaga, la sezione resistente della cricca si riduce e quando l'area è troppo bassa per sopportare il carico si arriva al cedimento per frattura macroscopicamente fragile. La zona di propagazione è piuttosto liscia per il fenomeno del martellamento mentre la frattura finale è ruvida caratterizzata da asperità tipiche della rottura per sovraccarico.

2.4 Propagazione della frattura

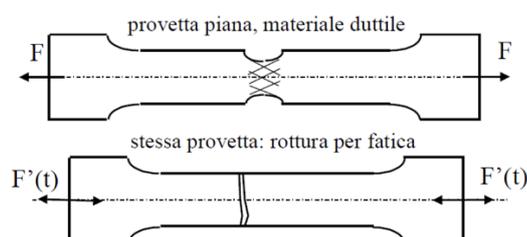


Figura 14: Rottura a trazione semplice e rottura a fatica

In una rottura per fatica abbiamo l'aspetto di una rottura macroscopicamente fragile con decoesione frontale delle parti anziché mostrare tipico scorrimento ruotato di 45° rispetto alla direzione del carico

Un oggetto che subisce una rottura per fatica si può riconoscere facilmente anche ad occhio. Presenta due superfici diverse in corrispondenza della sezione di rottura:

Superficie criccata: superficie rotta perfettamente liscia, vellutata e lucida alla vista

Superficie di rottura per schianto: superficie rugosa discontinua e piena di piccoli crateri ed opaca alla vista, questa parte della rottura è avvenuta per sovraccarico e può presentare la strizione

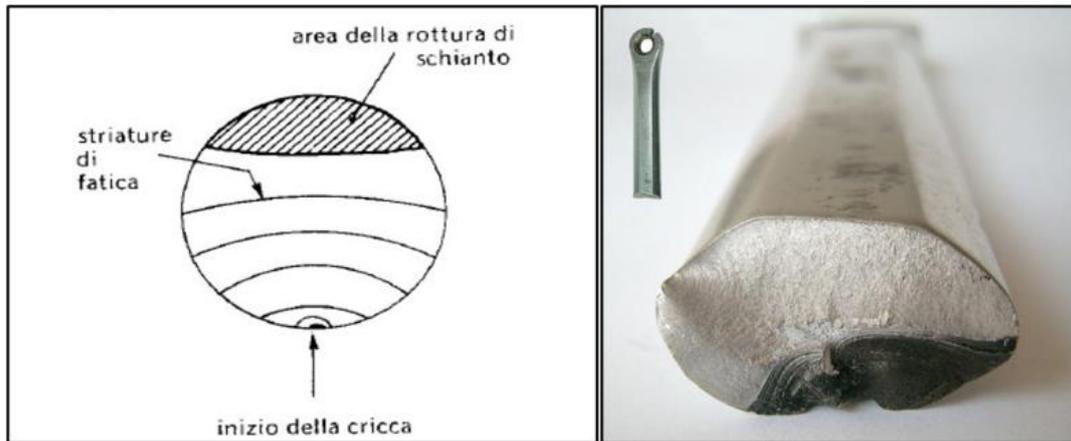


Figura 15: Superficie rottura a fatica

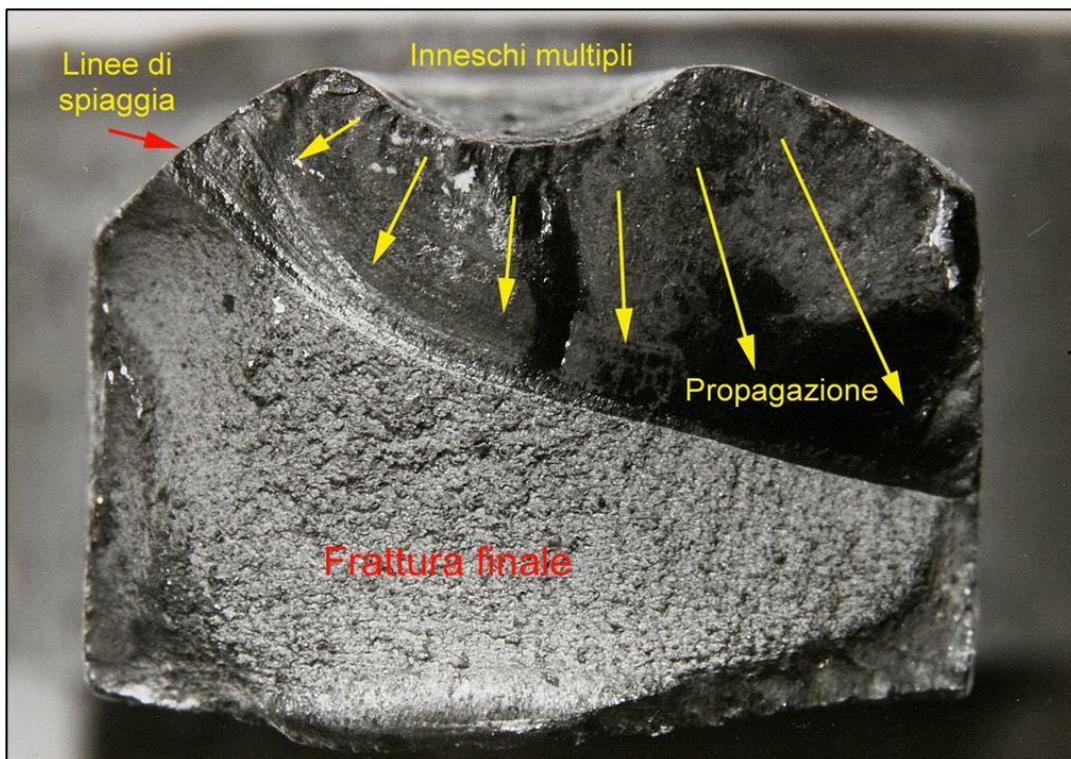


Figura 16: Superficie rottura a fatica

Cap 3: Storia della lega AlSi9Cu3(Fe)

3.1 Leghe Al-Si

Il principale alligante utilizzato nelle leghe di alluminio da fonderia è il silicio, i suoi principali vantaggi sono:

- riduzione della temperatura di fusione
- riduzione del ritiro
- aumento della colabilità
- maggior durezza
- maggior resistenza all'usura
- rende possibile effettuare trattamenti termici quando è presente anche il Mg
- riduce la densità
- riduce il coefficiente di dilatazione termica

Nel grafico seguente è riportato l'effetto del tenore di silicio sulle seguenti caratteristiche della lega:

- Allungamento % (E)
- Limite elastico (YS)
- Resistenza a trazione (UTS)
- Durezza Vickers (HV)

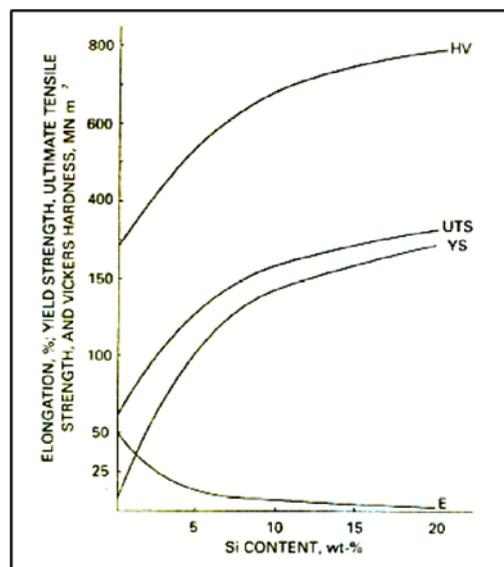


Figura 17: Effetto del silicio sulle principali caratteristiche della lega

L'alluminio forma un eutettico con l'11,7% di silicio avente punto di solidificazione 577°C. La massima solubilità del Si nell' Al corrisponde ad una concentrazione di 1,65 % a 577°C. Se la temperatura scende sotto i 300°C la solubilità del Si precipita fino allo 0,05% e la soluzione solida con 1.65% di Si a 577°C, durante il raffreddamento lento, separa del Si in cristalli più o meno piccoli a seconda della temperatura alla quale si formano, seguendo la linea di equilibrio DE. L'eutettico in questa lega sarà formato da cristalli sovrapposti di alluminio e silicio, ed ha una struttura molto grossolana.

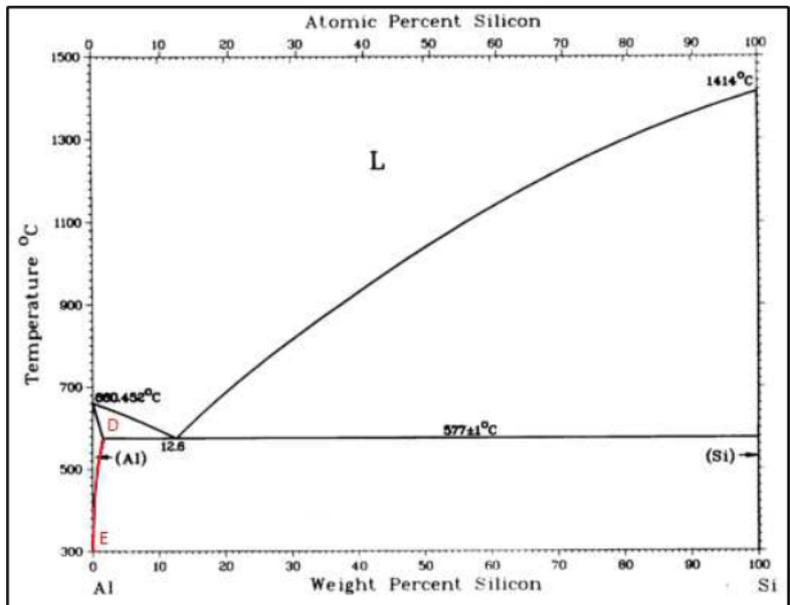


Figura 18: Diagramma di stato Al-Si

Le microstrutture delle leghe Al-Si da fonderia sono influenzate dal tenore di Si presente. Le leghe ipoeutettiche (Si al massimo al 12,7%) presentano delle dendriti di fase alfa contornate dalla struttura eutettica Al-Si, invece nelle ipereutettiche abbiamo la formazione del Si primario, cristallo che conferisce alla lega delle caratteristiche di estrema durezza e grande resistenza all'usura, successivamente si forma la struttura eutettica intorno ad esso. Il Si di questo tipo di leghe ha una percentuale compresa tra il 12,7% e 20%.

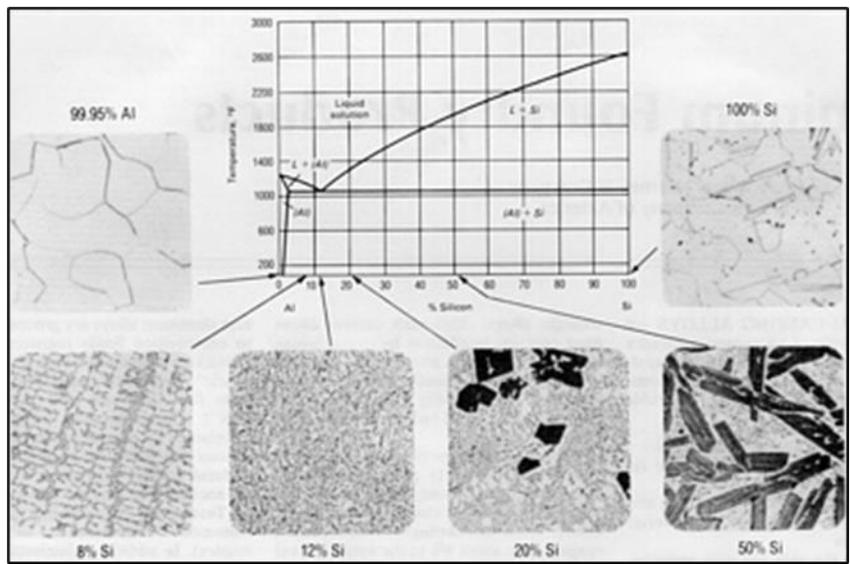


Figura 19: Microstrutture del diagramma Al-Si

Come analizzato nel capitolo 1 le leghe di alluminio si suddividono in due categorie: leghe da deformazione plastica e leghe per getti. È possibile dividere il processo di fonderia in due macrocategorie:

- *Colata in forma transitoria*: la forma per creare il pezzo viene distrutta al termine del processo.
- *Colata in forma permanente*: la forma per creare il pezzo viene riutilizzata in un elevato numero di cicli produttivi.

I provini della lega in questione sono stati realizzati con la tecnica della pressocolata o Die Casting che rientra nella macrocategoria della fonderia con colata in forma permanente. Un'importante distinzione dalla fonderia in terra (colata in forma transitoria) sta nel fatto che il metallo fuso viene iniettato nella forma a pressioni elevate. I vantaggi della pressocolata sono innumerevoli. Si ha un'elevata automatizzazione del processo con tempi ciclo molto brevi che permettono un'elevata produttività. La fonderia in terra non garantisce dei componenti con una finitura superficiale di ottima qualità come quelli che si ottengono con la pressocolata che farà aderire meglio il materiale alla forma.

Anche nella pressocolata abbiamo una sostanziale divisione in due categorie in base al processo produttivo:

- *Pressocolata a camera calda*: se il serbatoio del metallo fuso è inserito in un forno.
- *Pressocolata a camera fredda*: se il serbatoio del metallo è una semplice cavità non a temperatura controllata.

Lo stampo è costituito da due semi-stampi in acciaio, ghisa o materiali a temperature di fusione alte. I metalli utilizzati in questo processo sono materiali che hanno temperature di fusione inferiori a quelle dell'acciaio come appunto le leghe di alluminio. La pressione di iniezione del metallo ha un range molto ampio che va dai 2 Mpa ai 150 Mpa a seconda di quali siano i componenti da produrre. È importante che la pressione sia mantenuta costante durante tutto il processo per garantire una corretta solidificazione della lega aiutata da un sistema di circolazione di liquido all'interno dello stampo al fine di evitare cavità di ritiro e zone disomogenee. Il processo a camera calda, grazie alla presenza di un forno, garantisce un controllo migliore della temperatura di esercizio ed elevati ritmi produttivi dovuti al prelievo diretto dal serbatoio. La lega sarà più uniforme come temperatura e composizione rispetto alla pressocolata in camera fredda portando ad avere un componente con una struttura più omogenea. Il principale svantaggio della pressocolata a camera calda è che la temperatura del processo non potrà essere troppo elevata per non influenzare in maniera negativa la produttività, cercando di evitare lunghi tempi di raffreddamento, per questo motivo il processo viene utilizzato per metalli a basso punto di fusione. La principale distinzione tra i due processi di pressocolata è la pressione di mantenimento: nella pressocolata a camera calda la pressione di mantenimento va dai 2 Mpa ai 15 Mpa mentre nella pressocolata a camera fredda la pressione di mantenimento va dai 15 Mpa ai 150 Mpa.

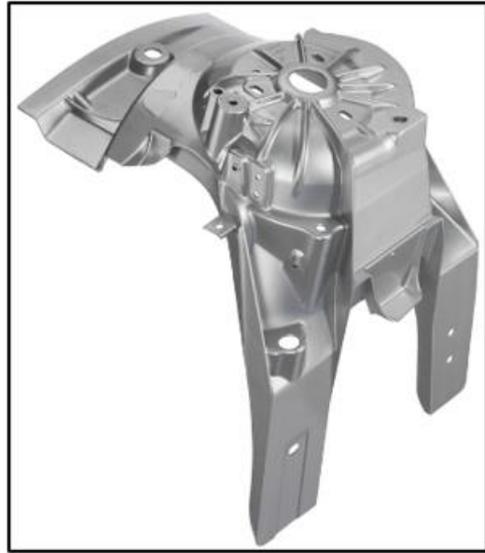


Figura 20: Colata in sabbia e pressolata

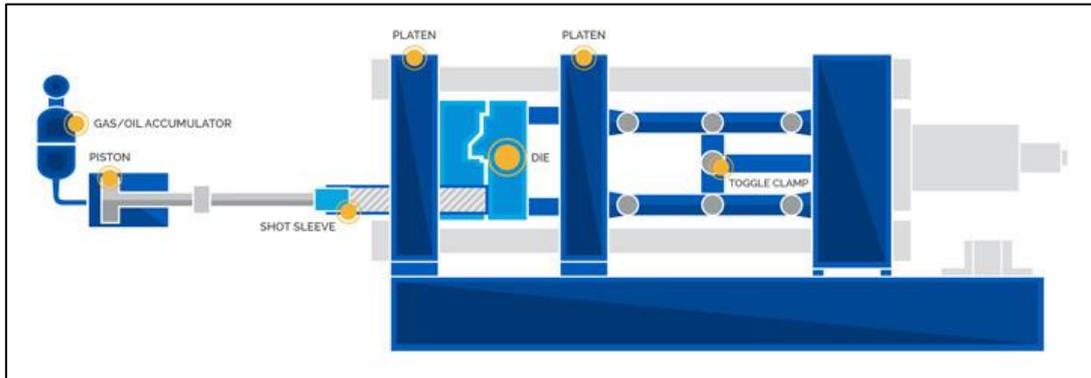


Figura 21: Pressocolata in camera fredda

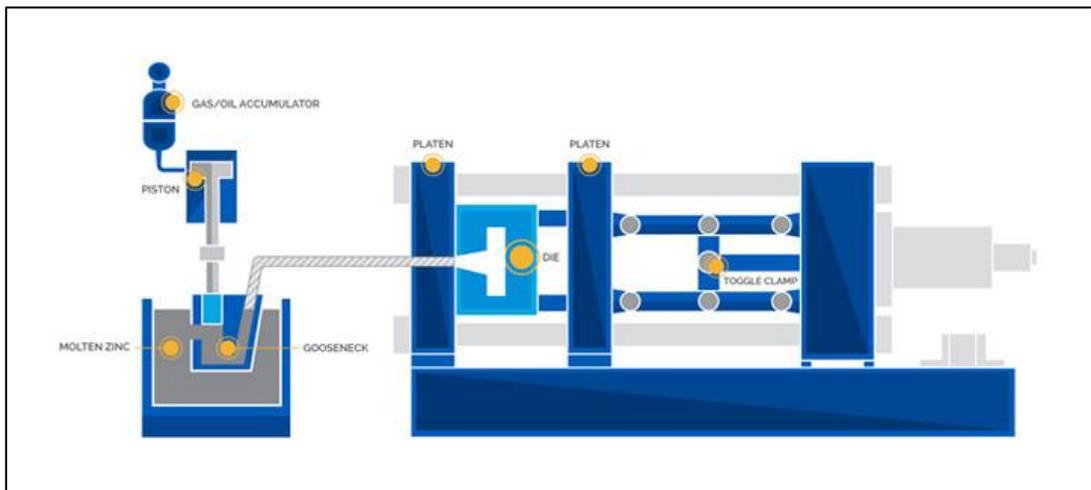


Figura 22: Pressocolata in camera calda

I provini della lega $AlSi9Cu3(Fe)$ sono stati realizzati con la tecnica della colata in pressione in camera fredda dalla Fonderia SL specializzata nelle soluzioni per getti pressocolati in leghe leggere in particolare leghe di alluminio. La fonderia si trova nei pressi di Manerbio in provincia di Brescia. La produzione deriva da rottami (alluminio secondario) la cui composizione non è definita e proprio per questo ci può essere la presenza di elementi dannosi per la qualità del getto. Per risolvere questo problema si è deciso di ricorrere a due soluzioni che portassero migliorie alla mescolanza del bagno:

- Addizione di materiale (elementi o leghe);
- Purificazione del bagno.

La prima permette di raggiungere la composizione chimica desiderata e necessità di ulteriori analisi sul getto per valutare al meglio la dissoluzione degli elementi aggiunti.

La seconda presuppone un'attenta selezione del materiale di partenza per permettere la rimozione dell'idrogeno che ha un'influenza molto negativa sui getti andando a creare delle porosità all'interno di essi. La principale fonte d'idrogeno è l'umidità atmosferica che, reagendo con l'alluminio della lega nel bagno, rilascia H nel liquido: $3H_2O + 2Al \rightarrow Al_2O_3$ (ossido superficiale) + 6H (dissolto nel liquido). Il processo porta notevoli benefici andando a salvare le caratteristiche meccaniche che per colpa delle porosità precipiterebbero, ma presenta dei costi importanti per l'azienda.



Figura 23: Fonderia SL

Per la produzione dei getti si è utilizzata una macchina di ITALPRESS, modello IP200 con le seguenti caratteristiche principali:

- Diametro del pistone: 50 mm
- Velocità del pistone: 3,5 m/s

I Colata

La prima colata presentava diverse problematiche dovute principalmente ad una non corretta progettazione del canale di colata e di sfoghi per la fuoriuscita di aria intrappolata (fagioli). Il risultato finale è stato che un elevato numero di provini con la presenza di porosità di grandi dimensioni e cavità nelle teste. Questi difetti portavano ad avere delle rotture non valide dei provini ai fini dello studio del comportamento a fatica.

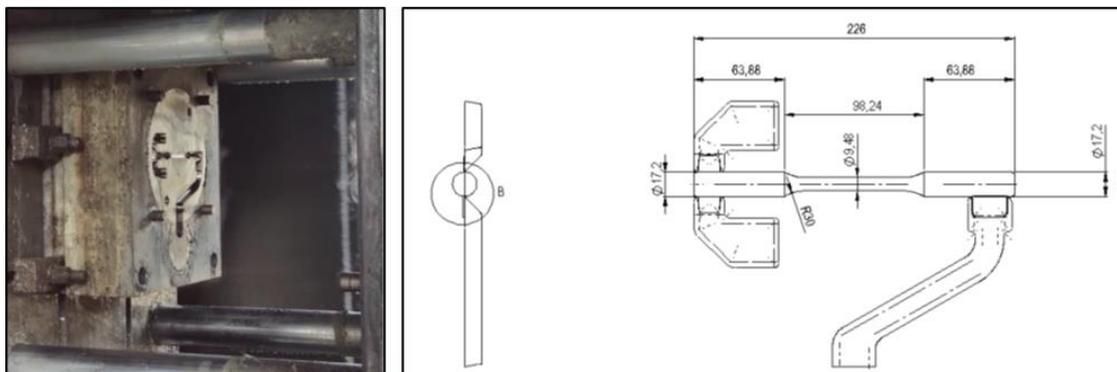


Figura 24: Stampo I colata

Ci si è rivolti al laboratorio certificato Accredia n° 1573 Tisco S.R.L (TO) per sapere la composizione chimica della colata in modo da trovare una soluzione per migliorare le caratteristiche del getto.

Nella seguente tabella i risultati ottenuti:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Al
8.93	0.87	2.39	0.22	0.15	0.08	0.05	0.86	bal.

Tabella 2: Composizione chimica (% in massa) della prima colata

II Colata

Si sono fatte delle modifiche allo stampo per migliorare la qualità dei provini:

- Stampo verticale con direzione del liquido dal basso verso l'alto anziché orizzontale. L'aria viene compressa e mandata verso l'alto dove troverà uno sfiato appositamente disposto
- Rallentare il flusso in ingresso e si realizza un canale conico vicino alla testa inferiore del provino. Questo permette di ridurre l'effetto spray
- Modifica della geometria dei fagioli: se ne utilizza uno solo più grande

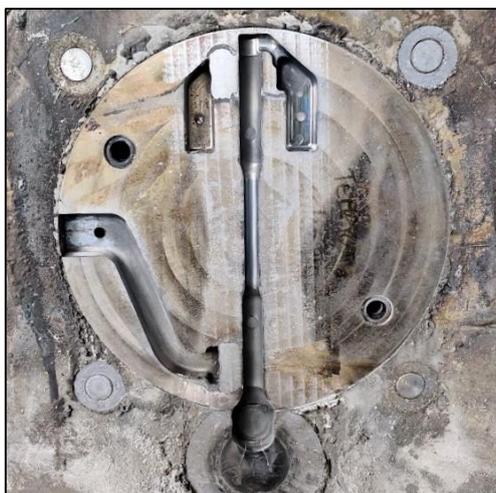


Figura 25: Stampo della seconda colata

Per sapere la composizione chimica ci si è rivolti sempre al laboratorio certificato Accredia n° 1573 Tisco S.R.L (TO).

Nella seguente tabella i risultati ottenuti:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Al
7.99	0.87	3.18	0.23	0.15	0.07	0.05	0.82	bal.

Tabella 3: Composizione chimica (% in massa) della seconda colata

Con questa seconda colata si sono risolti i problemi di porosità presenti nelle teste dei provini come si evidenzia dalle radiografie svolte sui campioni delle due colate nella seguente foto.

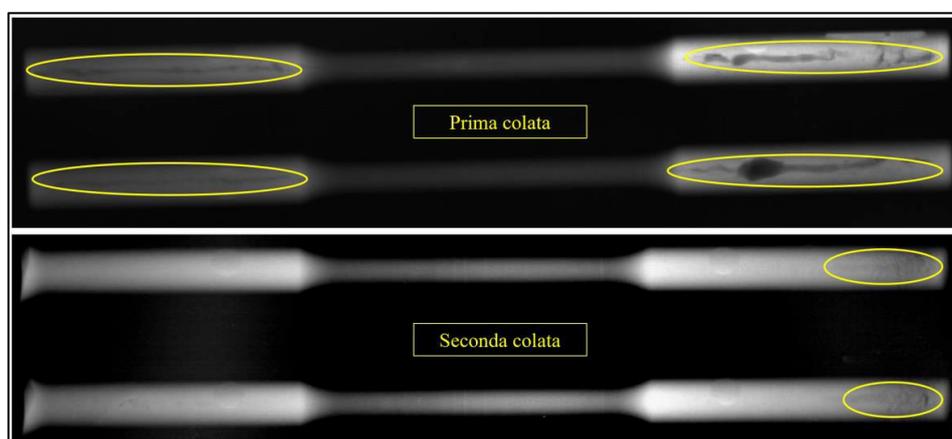


Figura 26: Radiografie provini della prima e della seconda colata

Cap 4: Trattamenti termici

4.1 Storia dei trattamenti termici

Quando si parla di trattamento termico ci si riferisce ad un ciclo termico di riscaldamento effettuato in predeterminate condizioni e temperature a cui devono seguire raffreddamenti, più o meno lenti, per far assumere ad un metallo o ad una lega metallica quelle strutture cristalline che gli conferiscono determinate caratteristiche meccaniche e tecnologiche. Per capire come un trattamento termico va ad influire sulla struttura di una lega metallica, è necessario conoscere il diagramma di stato della lega stessa. Tale conoscenza non è tuttavia sufficiente, difatti i diagrammi di stato definiscono le strutture di equilibrio di un metallo o una lega ad una determinata temperatura. Le curve si ricavano applicando riscaldamenti e raffreddamenti molto lenti (tali da consentire il raggiungimento dell'equilibrio ad ogni temperatura). Tenendo conto di quest'ultimo fattore, un ruolo fondamentale è svolto dalla velocità di raffreddamento o di riscaldamento della trasformazione. Questa velocità non influisce solamente sulle temperature di transizione (in genere diverse da quelle ricavate dai diagrammi di stato), ma anche sulla natura stessa della struttura ottenuta, con la possibilità di ottenere costituenti metastabili (quali ad esempio la martensite negli acciai) assenti nel diagramma di stato.

I forni industriali devono essere progettati per raggiungere i risultati voluti in condizione di massima sicurezza per l'operatore. I trattamenti più comunemente eseguiti sono quelli di ricottura, tempra e nitrurazione che possono portare ad avere notevoli incrementi delle proprietà meccaniche.



Figura 27: Forno industriale per i trattamenti termici

4.2 Trattamento di precipitazione delle leghe non ferrose

Per mettere in opera un efficace meccanismo d'indurimento per precipitazione vi sono tre condizioni, necessarie, ma non sufficienti (con l'eccezione del Cu nelle leghe ferrose):

1. Deve esserci una seconda fase molto solubile (di solito un minimo del 3% dell'incirca) nel metallo solvente alle alte temperature, tipicamente (ma non solo) all'eutettico; per esempio il Cu ha una solubilità del 5,65 % in massa nell' Al alla temperatura eutettica di 548°C.
2. La solubilità del soluto deve decrescere fortemente all'abbassarsi della temperatura, per essere piccola o quasi nulla alla temperatura ambiente; a 20°C la solubilità del Cu nell' Al è circa nulla.
3. Nei diagrammi di fase fra il solvente e il soluto vi deve essere un composto di equilibrio, spesso un composto intermetallico; un esempio in tal senso è il composto Al_2Cu , che induce una serie di precursori capaci d'indurire la matrice; un controesempio è quello del sistema Al-Si, che non contiene alcun composto ma solo Si puro o soluzione solida di Si in Al, quindi non è induribile per precipitazione.

4.3 Principali trattamenti termici delle leghe di alluminio

I principali trattamenti termici delle leghe di alluminio sono:

- T4- Solubilizzato e temprato (segue invecchiamento naturale)
- T5- invecchiato artificialmente
- T6 - solubilizzato, temprato ed invecchiato artificialmente
- T7 – solubilizzato, temprato e superinvecchiato
- T8: solubilizzato, temprato, incrudito e invecchiato artificialmente

I precipitati rafforzanti opportuni si ottengono con un trattamento termico ad hoc, definito come trattamento T6

4.3.1 Tempra di soluzione

La tempra di soluzione o solubilizzazione è un processo che si fa sulle leghe di alluminio da trattamento termico, prima di avviare il processo d' invecchiamento. Si porta la lega ad alta temperatura in modo da disciogliere tutta la seconda fase di equilibrio ($\theta=Al_2Cu$ nel sistema Al-Cu) nel solvente e formare possibilmente la sola soluzione solida α ; la temperatura è tenuta 10-20°C al di sotto di quella eutettica per evitare fenomeni di liquazione che deriverebbero da disomogeneità composizionali del solido, e che renderebbero irrecuperabili i pezzi.

4.3.2 Tempra in acqua

La tempra in acqua con approssimativo mantenimento in condizioni metastabili della soluzione α di alta temperatura; si ha una soluzione solida sovrassatura o SSSS (super saturated solid solution) del soluto nel solvente e, essendo questa termodinamicamente metastabile, ha forte tendenza ad evolvere con segregazione del soluto in eccesso; in effetti recenti studi al SEM ad alta risoluzione hanno mostrato che durante il raffreddamento in molti sistemi hanno già avuto luogo fenomeni di raggruppamento degli atomi estranei di soluto (clustering) per formare clusters di 20-50 unità atomiche

4.3.3 Invecchiamento

L'invecchiamento (age hardening) è un processo che si fa sulle leghe di alluminio da trattamento termico subito dopo la solubilizzazione e la tempra. È l'evoluzione nel tempo della microstruttura con decomposizione della SSSS e formazione di una soluzione solida piena di piccoli precipitati di una seconda fase, prima metastabile, poi stabile, con aumento delle caratteristiche meccaniche; l'invecchiamento è detto naturale se è condotto a temperatura ambiente, artificiale se è condotto in forno; alcune leghe di Al hanno notevoli capacità d'invecchiamento naturale, come la lega binaria 2219 Al-Cu, la ternaria 2024 Al-Cu-Mg, alcune leghe ternarie Al-Zn-Mg come le 7005, 7020 e 7039; infine, sottoponendo ad una moderata deformazione plastica (2-5%) la SSSS dopo tempra, ma prima dell'invecchiamento, s'introducono dislocazioni nel reticolo che, durante il successivo invecchiamento, stimolano una più copiosa nucleazione eterogenea dei precipitati rafforzanti e si ottengono caratteristiche meccaniche più alte; in questo caso il trattamento è designato come T8.

4.4 Sistemi attivi di rafforzamento per precipitazione

Nella seguente tabella vi è una sintesi dei sistemi attivi di rafforzamento per precipitazione nelle leghe di Al da fonderia. Come rafforzamento per dispersione s'intende in questo contesto il rafforzamento conferito dai precipitati di equilibrio, per loro natura ben più grandi dei precipitati metastabili che portano al massimo della resistenza meccanica del metallo. Il rafforzamento dovuto ai precipitati di equilibrio ha molte analogie a quello che si ottiene realizzando dispersioni di fasi insolubili nella matrice metallica utilizzando la tecnica della metallurgia delle polveri.

Sistema elementi	Fase dopo tempra	Precursore	Fase metastabile	Rafforzamento per precipitazione	Fase di equilibrio	Rafforzamento per dispersione
Al-Cu	SSSS	GP	θ' (Al ₂ Cu)	Massimo del picco d'invecchiamento	θ (Al ₂ Cu)	Decrescente nel super invecchiamento
Al-Cu-Mg	SSSS	GP	S'(Al ₂ CuMg)	Massimo del picco d'invecchiamento	S (Al ₂ CuMg)	Decrescente nel super invecchiamento
Al-Si	SSSS	nessuno	nessuna	Non applicabile	Si	Per dispersione
Al-Mg-Si	SSSS	GP	β' (Mg ₂ Si)	Massimo del picco d'invecchiamento	β (Mg ₂ Si)	Decrescente nel super invecchiamento

Tabella 4: Sistemi attivi di rafforzamento per precipitazione nelle leghe di alluminio

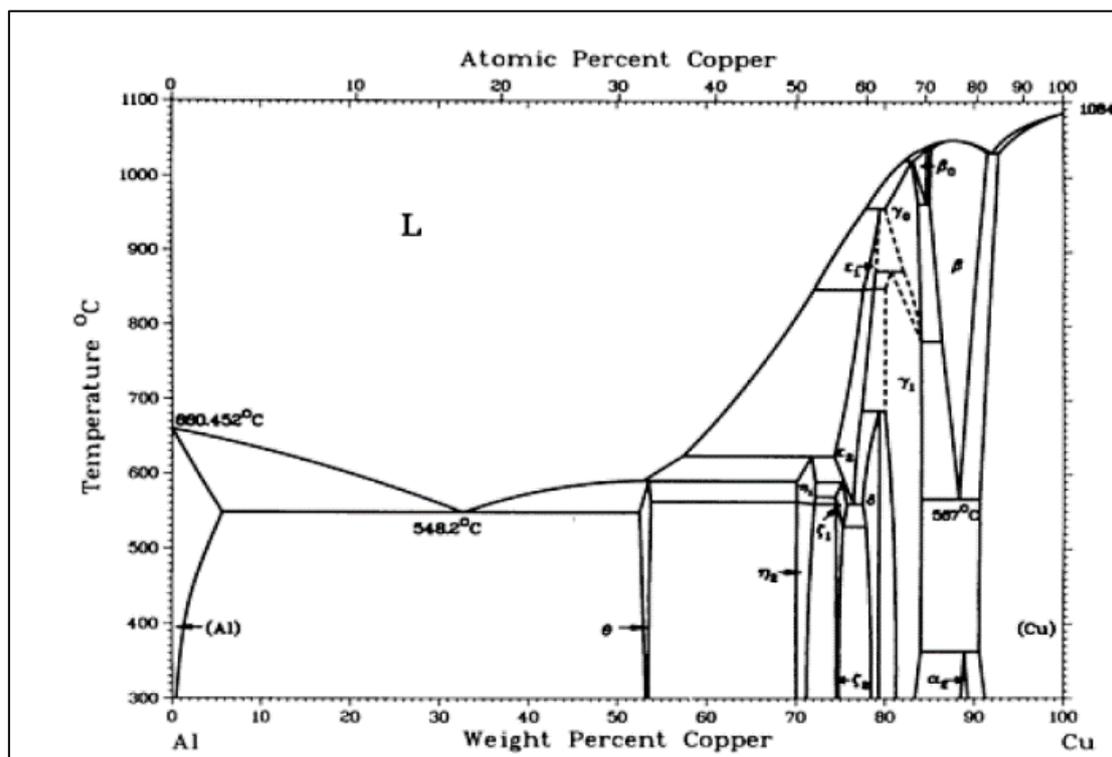


Figura 28: Diagramma di stato Al-Cu

4.5 Prove sul forno

I trattamenti termici sui provini sono stati svolti con un forno Nabertherm modello N 60/A del 1998 in foto nelle configurazioni chiuso e aperto (con dettaglio sugli agganci laterali).



Figura 29: Forno per i trattamenti termici

Caratteristiche principali del forno:

- Vano forno alto con riscaldamento da 5 lati per un'ottima uniformità della temperatura
- Elementi riscaldanti in tubi di conduzione per una rapida diffusione del calore e una lunga durata
- Controller montato sul lato della porta del forno e removibile per una comoda operatività
- Protezione del fondo riscaldato mediante una lastra in SiC sul fondo
- Ventola interna per uniformare la temperatura del forno

Voltaggio max	400 V
Corrente max	13 A
Frequenza di lavoro	50 Hz
Potenza max	9 kW
Temperatura max	850 °C
Capacità	60 L

Tabella 5: Caratteristiche tecniche del forno

Data l'elevata capacità del forno e non assumendone una temperatura uniforme all'interno, si è deciso di utilizzare una termocoppia, posta proprio nel centro dei provini e collegata all'esterno con un Data Logger per rilevare la temperatura al centro dei provini ed avere una misura più precisa sulle reali condizioni dei campioni.



Figura 30: Dettaglio della termocoppia all'interno del forno



Figura 31: Data logger all'esterno collegato con la termocoppia

Prima di procedere con i trattamenti termici sui provini si sono svolte due prove, la prima a 180 °C e la seconda a 460 °C, con all'interno la sola termocoppia per rilevare la temperatura al centro dei provini. Lo scopo era vedere di quanto si discostava la temperatura segnata dal monitor digitale montato sul lato del forno dalla temperatura segnata sul data logger nel cuore dei provini. Si è osservato che con il passare del tempo le temperature tendevano a convergere sullo stesso valore pur mantenendo qualche grado di differenza. Nei seguenti grafici sono mostrati gli andamenti delle due temperature (in blu le temperature rilevate dal monitor digitale del forno e in arancione le temperature rilevate dal data logger collegato alla termocoppia) e la differenza tra le due temperature che con il passare del tempo tende sempre più ad avvicinarsi allo zero.

4.5.1 Prove iniziali a 180°C

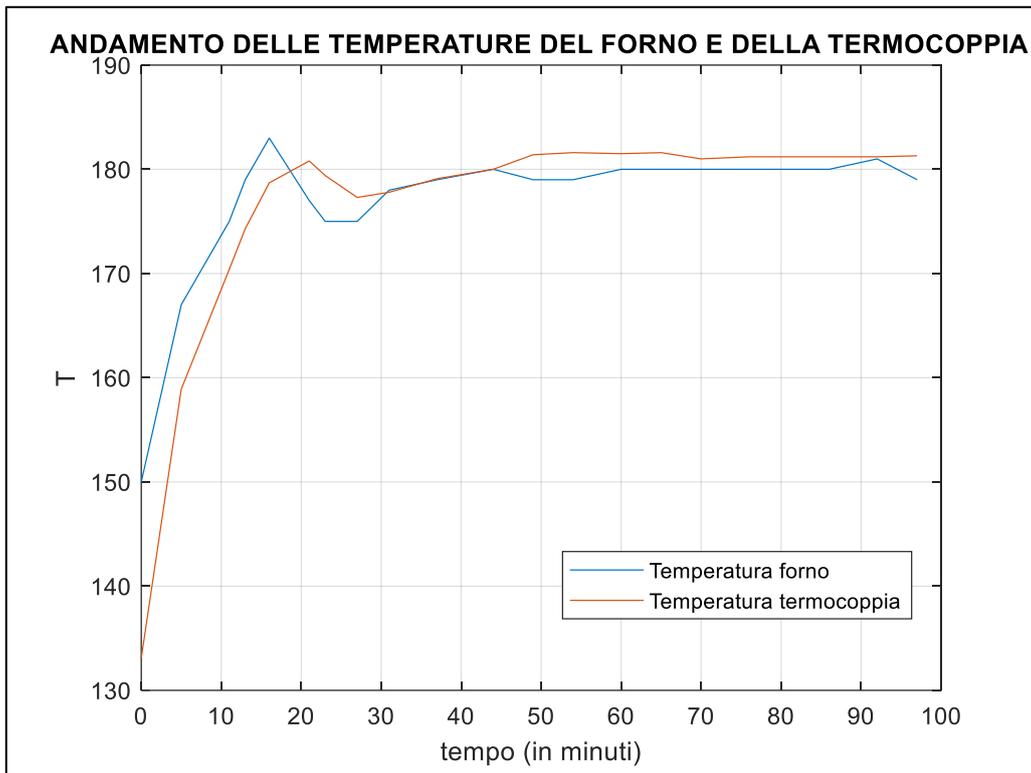


Figura 32: Andamento delle temperature del forno e della termocoppia a 180°C

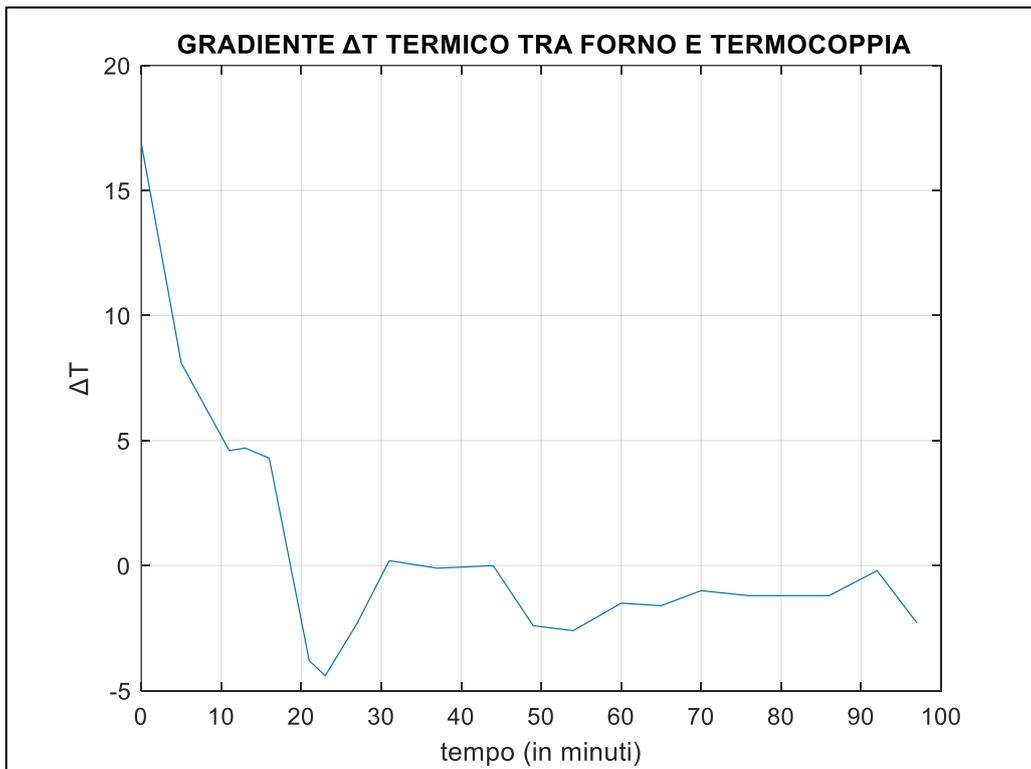


Figura 33: Andamento del gradiente termico tra temperatura del forno e temperatura della termocoppia a 180°C

4.5.2 Prove iniziali a 460°C

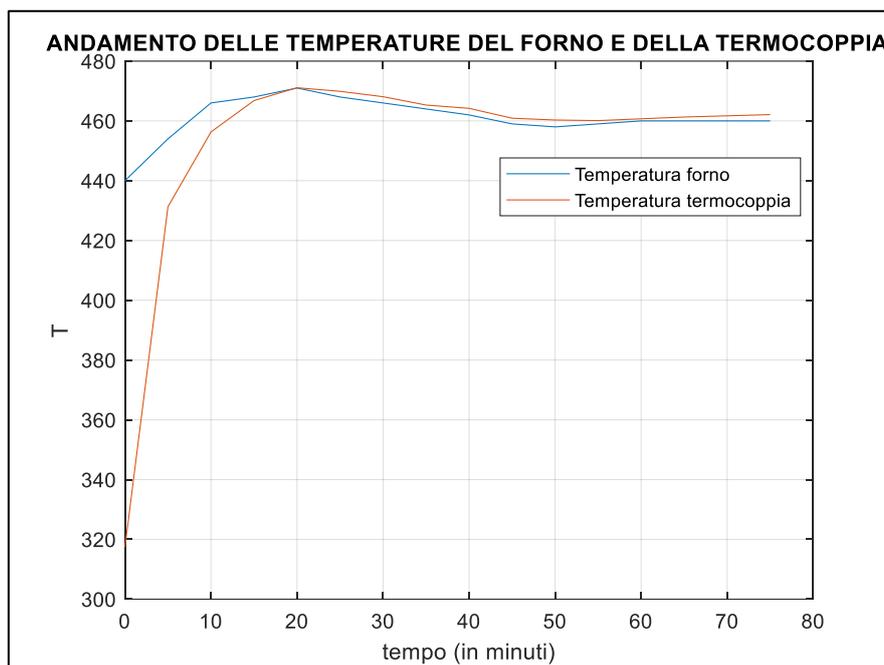


Figura 34: Andamento delle temperature del forno e della termocoppia a 460°C

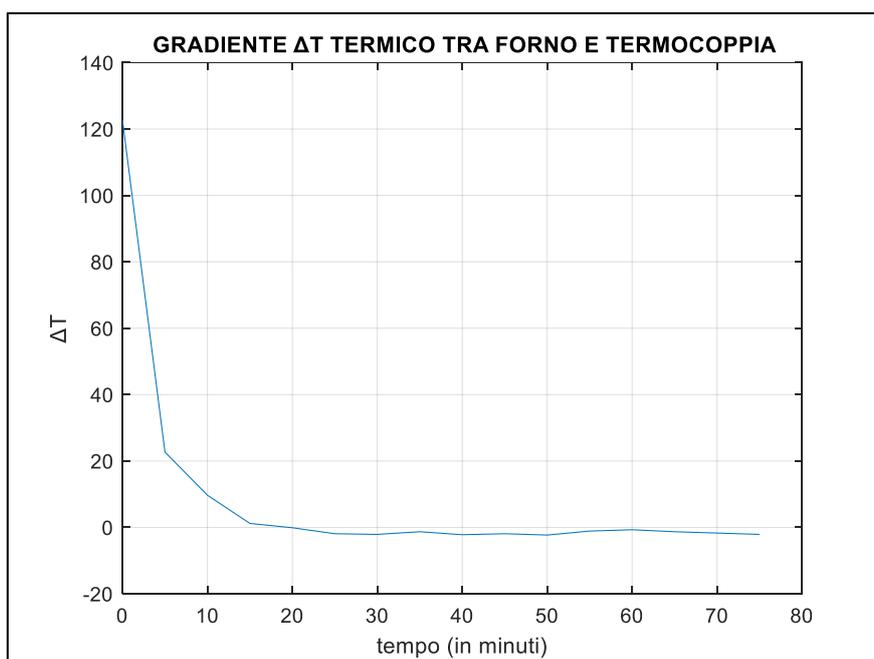


Figura 35: Andamento del gradiente termico tra temperatura del forno e temperatura della termocoppia a 460°C

Ai fini delle rilevazioni e dei trattamenti si è considerato accettabile una tolleranza di temperatura di $\pm 2^\circ\text{C}$ rispetto alla misura a cui sono stati effettuati i trattamenti. Qualora la temperatura avesse superato di molto questa tolleranza il trattamento era considerato non valido. Se la temperatura del data logger superava il $+2^\circ\text{C}$ per qualche decimo di grado si procedeva ad una parziale e molto rapida apertura del forno per aiutare la stabilizzazione della temperatura al valore desiderato. Quest'ultima soluzione si è applicata al trattamento di solubilizzazione dove le T sono più difficili da controllare essendo più alte.

4.5.3 Prove finali a 180°C

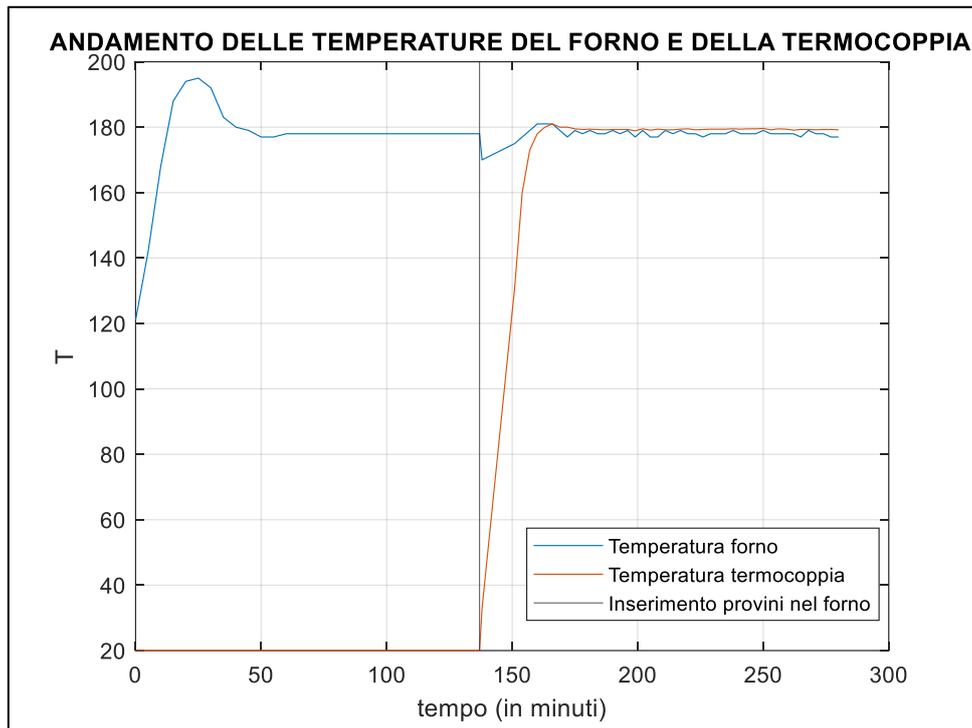


Figura 36: Andamento delle temperature del forno e della termocoppia a 180°C

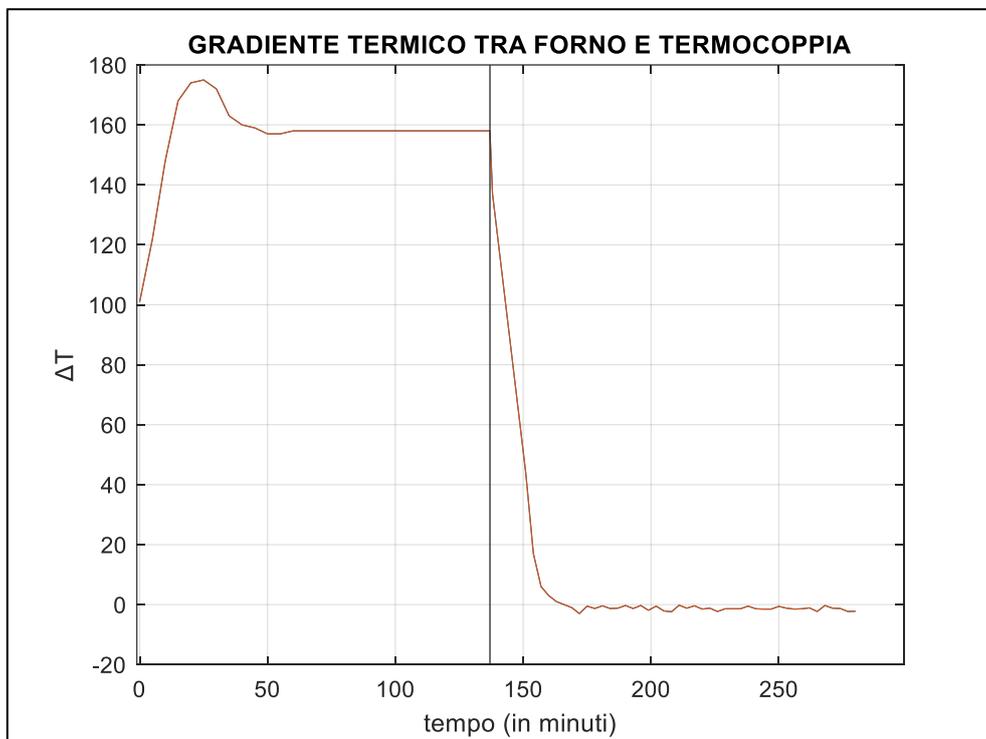


Figura 37: Andamento del gradiente termico tra temperatura del forno e temperatura della termocoppia a 180°C

4.5.4 Prove finali a 460°C

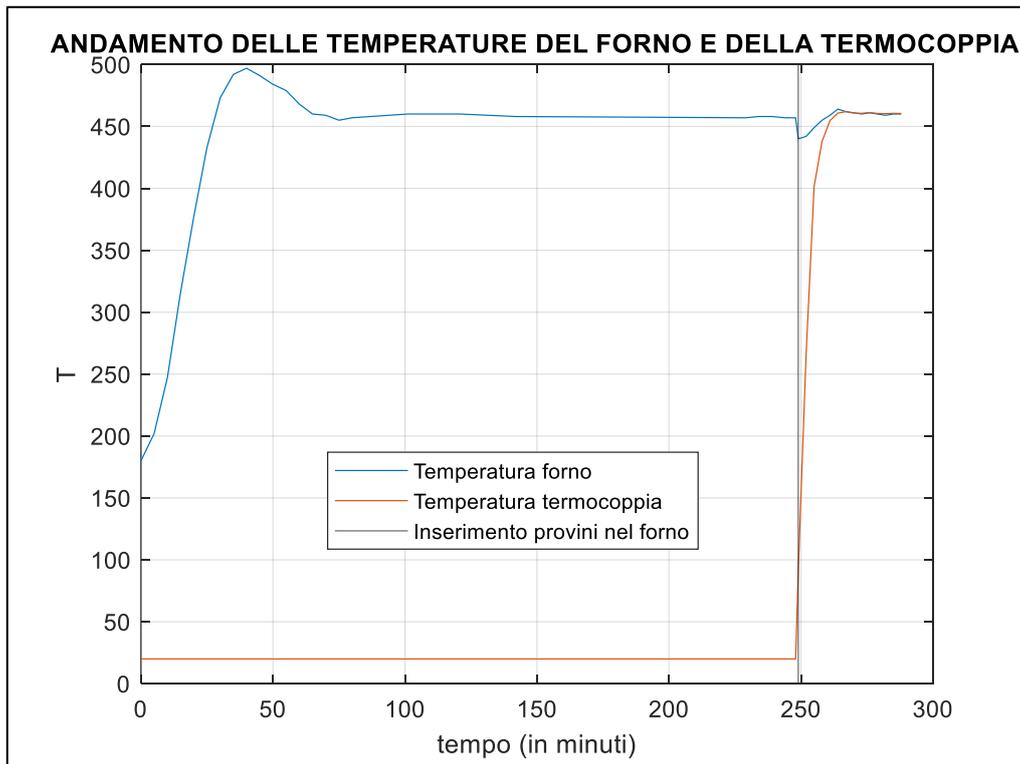


Figura 38: Andamento delle temperature del forno e della termocoppia a 460°C

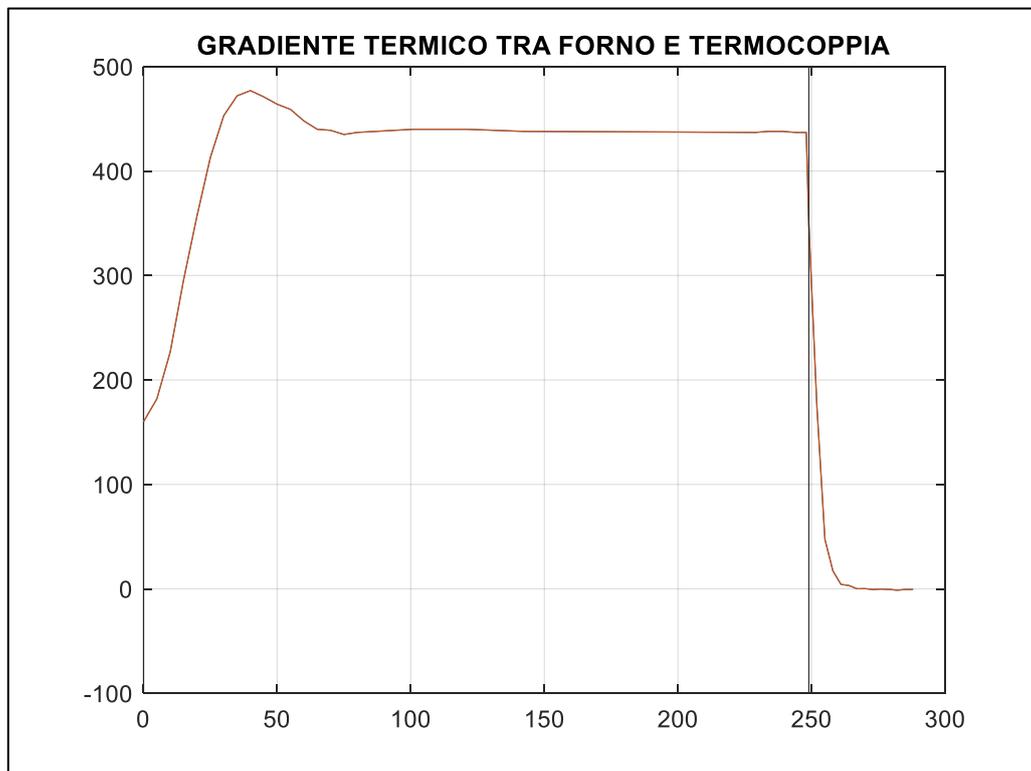


Figura 39: Andamento del gradiente termico tra temperatura del forno e temperatura della termocoppia a 460°C

4.6 Bagno di tempra

L'ultima parte della solubilizzazione che prevede un rapido raffreddamento è stata svolta immergendo la struttura in un secchio pieno d'acqua per il congelamento della microstruttura. Durante questa fase è necessario porre attenzione alla corretta entrata di tutti i provini in acqua. Un mancato trattamento su uno dei provini che involontariamente resta fuori dal bagno di tempra ne causa l'invalidità e quindi lo scarto dal resto dei campioni dato che ormai la sua microstruttura è stata modificata e non si può più riutilizzare.



Figura 40: Tempra in acqua dei provini

Cap 5: Fatica a flessione rotante

5.1 Descrizione della prova

La prova di fatica a flessione rotante è una prova di flessione a 4 punti. Il provino viene posizionato su due supporti e caricato centralmente tramite punzone di prova con due punti di contatto. Il provino viene posto in rotazione da un motore collegato ad un contagiri per tener memoria del numero di cicli che il provino ha svolto.

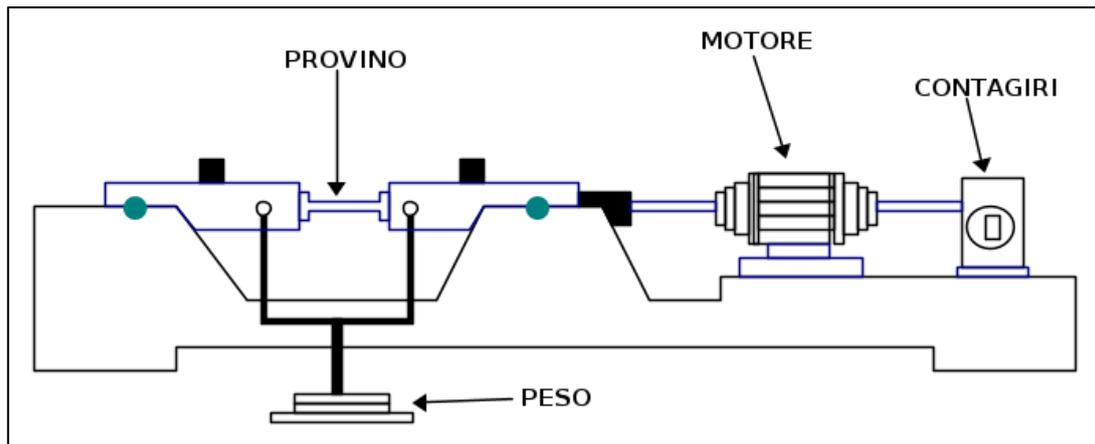


Figura 41: Modello macchina per le prove a flessione rotante

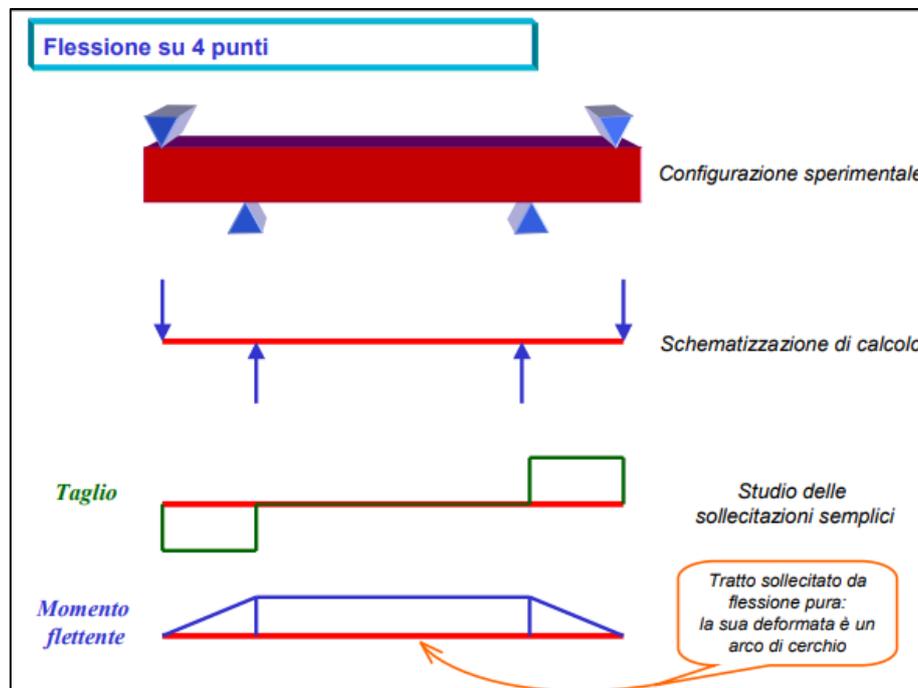


Figura 42: Diagramma sollecitazioni

Il vantaggio della configurazione per le prove di flessione a 4 punti è l'assenza di forze di taglio nella parte centrale dei supporti.

5.2 Descrizione della macchina

In figura è presentata la macchina a flessione rotante a quattro punti per le prove sperimentali. Durante le prove di fatica l'andamento delle tensioni presenta un rapporto di tensione pari a -1 con una tensione media nulla.

La macchina per le prove risale al 1937 ed è stata prodotta dalla ditta Schenck Maschinenfabrik oggi appartenente alla Carl Schenck AG un'azienda tedesca specializzata sulla diagnosi e sulla tecnologia di bilanciamento. Alla sua fondazione, nel 1881 ad opera di Carl Schenck, l'azienda si occupava della costruzione di bilance per poi espandersi nel campo delle macchine equilibratrici.



Figura 43: Macchina per le prove a flessione rotante

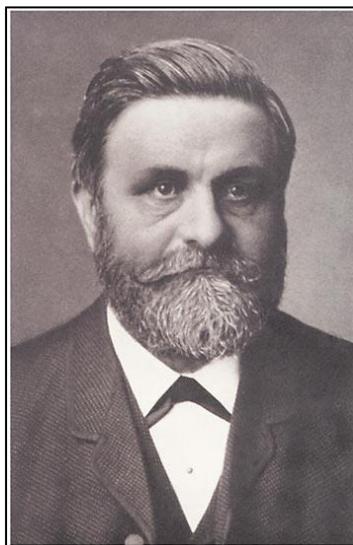


Figura 44: Carl Schenck

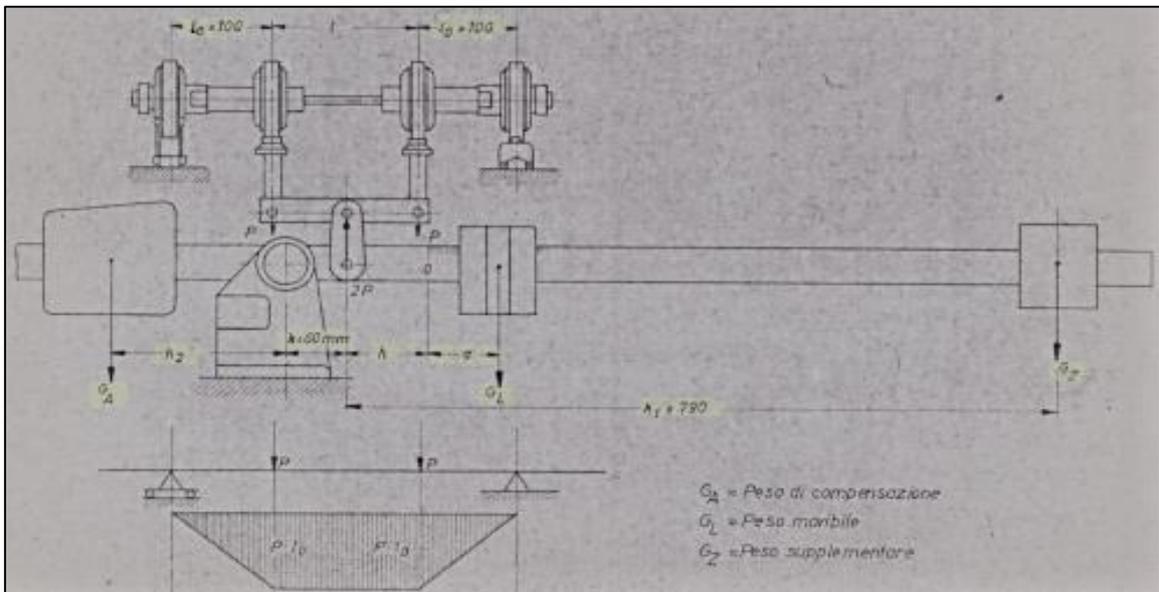


Figura 45: Schema funzionale

Dallo schema funzionale della macchina si ricavano le seguenti grandezze:

$l_0=100 \text{ mm}$ distanza tra i centri dei supporti fissi e dei supporti di carico;

$l=150 \text{ mm}$ distanza tra i supporti di carico;

$k=60 \text{ mm}$ distanza del punto di applicazione del tirante sulla traversa dal perno del giogo della bilancia;

a distanza del baricentro del cursore dalla marca di zero della scala;

b deviazione dell'indice della scala dal punto di zero, in cm. Vale la relazione $b=12a$;

h distanza della marca di zero della scala dal punto di applicazione del tirante sulla traversa;

$k_f=790 \text{ mm}$ distanza del peso ausiliario G_Z dal punto di applicazione del tirante sulla traversa;

k_2 distanza del contrappeso G_A dal perno del giogo della bilancia;

$G_L=2,5 \text{ kg}$ peso del cursore;

G_Z peso ausiliario, può avere due masse diverse:

$$G_{Z1}=1,768 \text{ kg} \quad G_{Z2}=3,536 \text{ kg}$$

G_A contrappeso per la leva, gli elementi di trasmissione ed il cursore GL posto sullo zero.

Da tutti questi dati si ottengono due parametri fondamentali per le prove

P il carico applicato

$$P = \frac{G_L a}{2k}$$

M_f momento flettente agente tra le sezioni caricate risultante

$$M_f = P l_0 = \frac{G_L a}{k} l_0 = \frac{G_L l_0}{2k} b$$

Da quest'ultima relazione si osserva una diretta proporzionalità tra il momento flettente e l'indice di scala b .

Per impostare il momento flettente agente sulla macchina utilizzo il volantino di manovra nella parte inferiore. Attraverso un sistema vite-madrevite sposterà il cursore variando il momento flettente che agisce sul provino.



Figura 46: Volantino di manovra per la regolazione del carico



Figura 47: Cabina di avvio prova e dettaglio sulla manopola di regolazione velocità motore



Figura 48: Motore (in verde) contagiri (in bianco) e sistema di arresto macchina (in nero)

Una volta inserito e serrato il provino nelle pinze elastiche si procede alla regolazione del carico tramite volantino di manovra. Dopo aver settato il carico si gira la manopola a sinistra affinché il blocco del carico sia rimosso e il componente sia soggetto al carico settato. Prima di avviare la macchina dalla cabina elettrica si verifica che il contagiri sia azzerato e che il sistema di arresto macchina che si attiva quando avviene la rottura del pezzo sia disattivato (leva nera su 1). È molto importante seguire queste procedure poiché la mancata esecuzione può portare ad un'errata rilevazione dei dati nel primo caso, il contagiri non segna esattamente il numero di cicli che il campione ha effettuato, oppure alla non accensione della macchina nel secondo caso, poiché il circuito che collega il motore alla cabina di accensione è aperto e non permette il passaggio di corrente. Una corretta esecuzione dei passaggi è necessaria per la sicurezza dell'operatore.



Figura 49: A sinistra carico non applicato, a destra carico applicato

La posizione di carico non applicato è una posizione di equilibrio instabile, appena la manopola viene mossa per dare il carico al provino si sposta da quella posizione. È importante considerare questo fattore sia in fase di montaggio ma soprattutto in fase di smontaggio per agevolare l'entrata o l'uscita del provino dalla macchina.

5.3 Prove sperimentali

Per le prove sperimentali sui campioni di fatica a flessione rotante si sono prese in considerazione 3 tipologie di provini

1. Provini grezzi (F) II colata
2. Provini trattati con T6 II colata (solubilizzazione a 480°C per 20 minuti e invecchiamento a 180°C per 2 ore) II colata
3. Provini trattati con T6 (solubilizzazione a 460°C per 20 minuti e invecchiamento a 180°C per 2 ore) II colata

5.3.1 Procedura settaggio sforzo sulla macchina

1. Calcolo del diametro d_m del provino espresso in mm
2. Impostazione dello sforzo σ da applicare al provino espresso in MPa
3. Calcolo del RAP Φ con la seguente formula

$$\text{RAP } \Phi = \left(\frac{9,42}{d_m}\right)^3$$

4. Calcolo del braccio h_d con la seguente formula

$$h_d = h_{9,42} \text{ RAP } \Phi$$

Con la costante $h_{9,42}=4,6$

5. Calcolo del braccio in cm da applicare sulla taratura della macchina con la seguente formula:

$$h = \frac{\sigma}{h_d}$$

Una volta impostato sul volantino di regolazione la misura h ottenuta, si avrà che il componente lavorerà a fatica a flessione rotante ad uno sforzo σ pari a quello impostato nel passaggio 2).

La non corretta esecuzione di questi passaggi o del settaggio sul volantino di regolazione può portare il provino a lavorare a flessione rotante ad un carico diverso da quello desiderato e ad avere errori di analisi a fatica.

Qualora il provino abbia un centro di massa molto deviato rispetto alla linea teorica ideale dell'asse di simmetria a causa di una non corretta lavorazione per rendere il provino inseribile all'interno della macchina, è opportuno abbassare la frequenza di lavoro per evitare eccessive vibrazioni del pezzo che possono aumentare e velocizzare effetti distruttivi sul componente in lavorazione e portare ad errori di analisi a fatica. Il range di lavoro per la macchina va dai 20 Hz per provini che presentavano eccessive vibrazioni fino a 30 Hz per provini che non presentavano nessun effetto di questo genere. Questo problema dovuto all'eccentricità del provino si manifesta nelle prove di fatica a flessione rotante mentre nelle prove di fatica assiale il fenomeno è assente o quantomeno molto attenuato poiché i cicli di trazione/ compressione ripetuti tendono a portare il centro di massa in linea con l'asse di simmetria.

5.4 Risultati ottenuti

Provini II colata grezzi (F)															
Prove di fatica a flessione rotante R=-1 $\sigma_m=0$ N=10 M cicli	1=Rottura valida 0=Run Out 1= Rottura invalida														
	Campioni														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
σ_a (Mpa)															
138															
132															
126	1				1										
120		1		0		1		1		1					
114			0				0		0		1		1		1
108												0		0	
102															
96															

Tabella 6: Stair case provini II colata grezzi (F)

Provini II colata trattati termicamente T6 (480_20min + 180_2h)																
Prove di fatica a flessione rotante R=-1 $\sigma_m=0$ N=10 M cicli	1=Rottura valida 0=Run Out 1= Rottura invalida															
	Campioni															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
σ_a (Mpa)																
162																
156		1														
150	0		1													
144				1		1										
138					0		1								1	
132								1		1		1		0		0
126									0		0		0			
120																
114																

Tabella 7: Stair case provini II colata trattati termicamente T6 (480-20min + 180-2h)

Provini II colata trattati termicamente T6 (460_20min + 180_2h)												
Prove di fatica a flessione rotante R=-1 $\sigma_m=0$ N=10 M cicli	1=Rotta 0=Non Rotta 1= Rottura invalida											
	Campioni											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
σ_a (Mpa)												
156												
150												
144												0
138				1		1	1			1	0	
132	1		0		0			1	0			
126		0										
120												

Tabella 8: Stair case provini II colata trattati termicamente T6 (460-20min + 180-2h)



Figura 50: Tipologie di rotture

5.5 Conclusioni

Dai risultati si osserva un incremento della resistenza a fatica media a 10 milioni di cicli di sollecitazione tra i grezzi di colata e i provini trattati termicamente con trattamento T6. La resistenza a fatica dei provini grezzi resta sempre tra i 114 MPa e i 120 MPa con una media di 117 MPa, mentre nei provini trattati con il primo T6 (temperatura di solubilizzazione 480°C) la resistenza a fatica raggiunge valori anche superiori ai 150 MPa, con una media di 140 MPa. Si nota quindi l'effetto del rafforzamento per precipitazione dato dal Cu che forma θ' (Al_2Cu). Anche nei provini trattati con il secondo T6 (temperatura di solubilizzazione 460°C) si osserva un aumento della resistenza a fatica, a 139 MPa, sempre dovuta al rafforzamento per precipitazione ma leggermente meno marcata rispetto ai T6 a 480°C poiché la minor temperatura di solubilizzazione ha reso il processo di rafforzamento per precipitazione leggermente meno efficace. Resta comunque innegabile il beneficio che ha il trattamento T6 rispetto ai grezzi di colata. La differenza di 20°C tra le due temperature di solubilizzazioni non va ad influenzare notevolmente le prestazioni meccaniche ma permette un notevole risparmio energetico sui forni usati per fare i trattamenti termici che in produzioni corpose devono rimanere accessi per lunghi periodi.

Cap 6: Fatica assiale

Quando si parla di prova di trazione, in scienza dei materiali, si intende una prova di caratterizzazione che consiste nel sottoporre un provino di dimensioni standard (secondo apposita norma UNI) di un materiale da esaminare ad un carico F monoassiale inizialmente nullo che viene progressivamente aumentato fino ad un valore massimo a cui si ha la rottura del materiale e quindi del provino in esame. Il fine di questa prova è la determinazione di diverse caratteristiche del materiale da analizzare, tra cui la resistenza a trazione (R_m), il modulo di Young o modulo di elasticità (E), il limite elastico (Y_S , "yield strength"), l'allungamento percentuale ($A\%$, "elongation"), la strizione percentuale ($Z\%$, "reduction of area"). La si usa soprattutto per materiali metallici e polimeri.

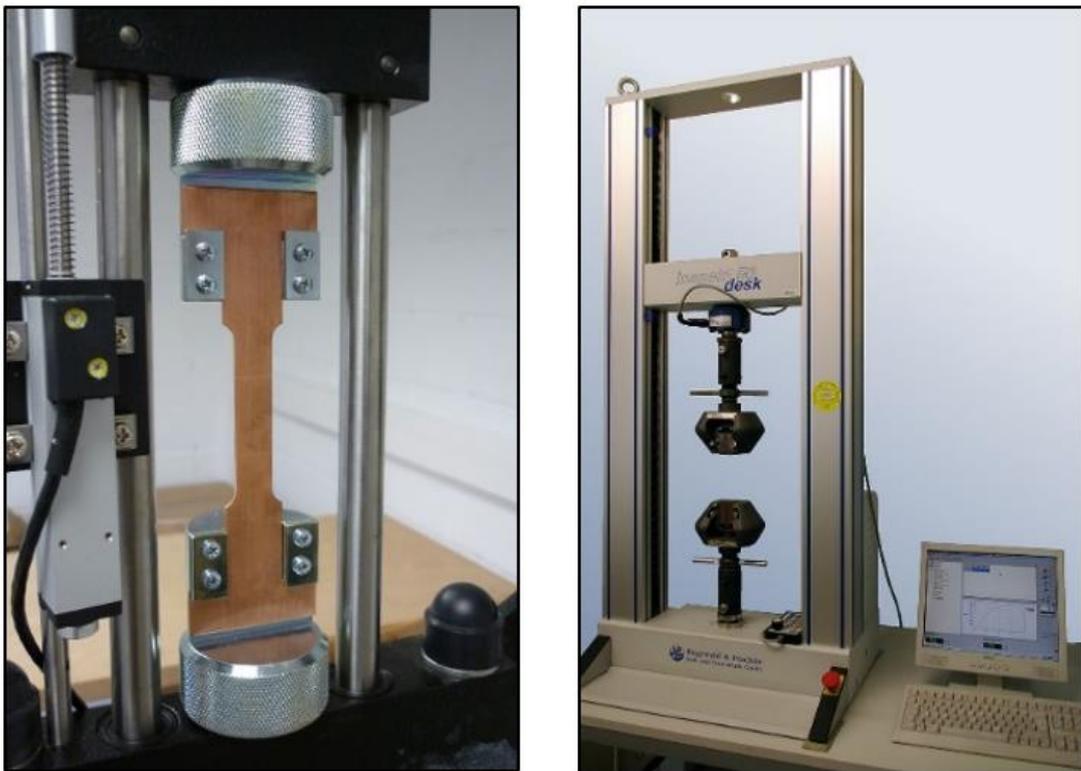


Figura 51: Provino di trazione e macchinario con hardware per rilevazione

La macchina che svolge la prova di trazione è collegata tramite celle di carico e altri sensori ad un software che analizza le informazioni e fornisce direttamente a monitor del computer una curva, detta *curva di trazione*, che ha per ogni punto in ascissa gli "allungamenti unitari" (ϵ) e in ordinata i valori di "carichi unitari" o sforzi (N_0 o σ_0).

Questa curva non è reale ma ideale perché considera la sezione del materiale in esame costante, mentre invece tende ad andare in conto a strizione (la sezione si riduce) e il provino si allunga.

Il carico unitario σ_0 è semplicemente il rapporto tra il carico e l'area iniziale del provino:

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0}$$

- F: carico applicato
- A_0 : area iniziale della sezione del provino

Il vero valore della tensione meccanica che agisce sul provino tiene conto della variazione della sezione effettiva, ridotta per effetto del carico di trazione

$$\sigma = \frac{F}{A(F)} \qquad \frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{A_0}{A(F)}$$

L'obiettivo finale della prova è la determinazione della curva di comportamento del materiale che indica le caratteristiche reali del materiale ed è determinata dalla curva di trazione mediante l'impiego di due semplici formule:

- una correzione dell'ascissa, con cui si deduce la deformazione a partire dall'allungamento del provino.
- una correzione dell'ordinata, con cui si deduce la tensione nella zona più sollecitata, a partire dallo sforzo globale sul provino.

Si ottengono così due risultati sperimentali

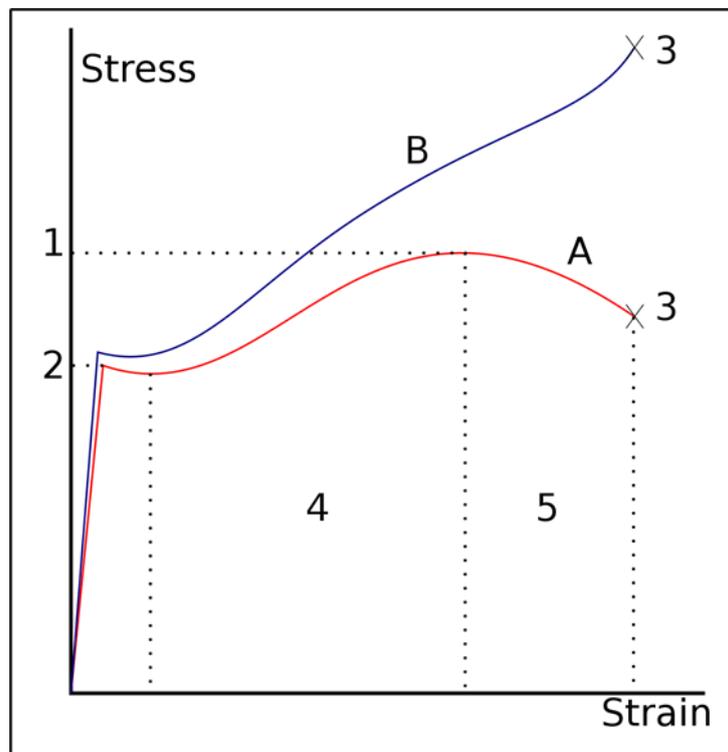


Figura 52: Curva prova di trazione (in rosso) e curva di comportamento reale del materiale (in blu)

Una curva di comportamento reale è sempre una funzione monotona crescente, la strizione provoca un calo della forza macroscopica applicata.

Calcolo della deformazione

Quando parliamo dell'allungamento unitario x si intende

$$x = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1$$

- L : lunghezza finale del provino dopo l'allungamento
- L_0 : lunghezza iniziale del provino

Per arrivare a calcolare la deformazione ε che si vuole calcolare si utilizza la funzione logaritmo sul rapporto tra le lunghezze

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(x + 1)$$

Analisi curva di trazione

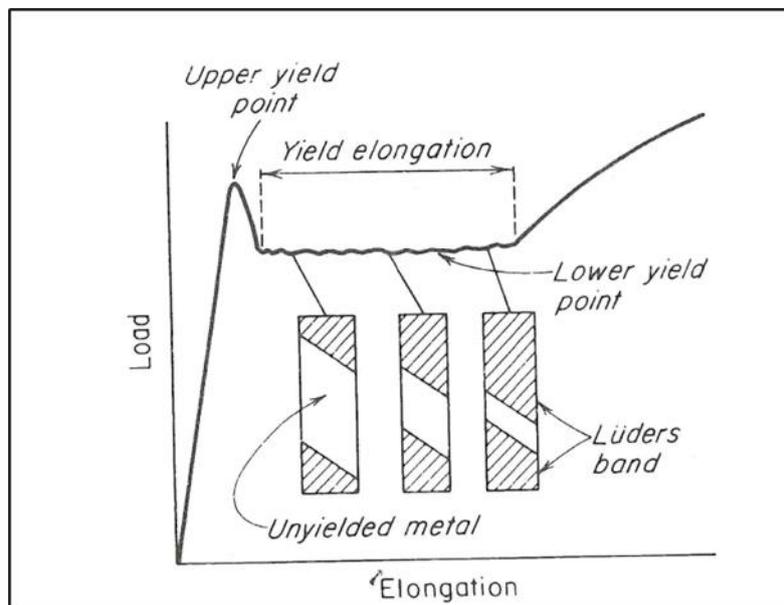


Figura 53: Snervamento

Durante la prova il materiale attraversa le seguenti fasi:

Comportamento elastico: le deformazioni in questo campo sono reversibili, fermando la prova e portando il carico a zero non osservo deformazioni residue e la lunghezza del pezzo rimane uguale a quella iniziale. In questo campo gli allungamenti sono direttamente proporzionali ai carichi e il rapporto tra i due è pari a una costante caratteristica di ogni materiale detta modulo di Young secondo la legge di Hooke.

$$\sigma = E\varepsilon$$

Comportamento elasto-plastico (snervamento): molti metalli mostrano una transizione fra regime elastico e quello plastico non delocalizzata. Durante la prova di trazione si assiste ad un primo improvviso crollo del carico applicato (snervamento superiore o upper yield point), seguito da fluttuazione, con il progredire della deformazione plastica, del carico attorno ad un valore più o meno costante (snervamento inferiore o lower yield point) di entità più piccola rispetto al valore del primo crollo. In questa fase, più o meno lunga, di ondeggiamento dello stress attorno allo snervamento inferiore si ha quello che si chiama allungamento di snervamento (yield-point elongation). La deformazione durante questa fase è fortemente

eterogenea. Allo snervamento superiore si formano delle bande discrete di deformazione plastica, talvolta visibili a occhio nudo, soprattutto localizzate in zone aventi concentrazione di stress, come i raccordi della parte centrale con le teste dei campioni di trazione. Tali bande sono comunemente note come Bande di Lüders. Durante l'allungamento di snervamento, ogni oscillazione di carico corrisponde approssimativamente alla formazione di una nuova banda plastica.

Comportamento plastico: le deformazioni in questo campo sono sia elastiche (reversibili) che plastiche (permanenti), quindi portando il carico a zero rimangono delle deformazioni residue dovute a deformazione plastica, per cui il provino avrà una lunghezza maggiore rispetto all'inizio della prova. La prima parte del tratto plastico è monotona crescente fino al carico di rottura dove si ha una deformazione su tutto il provino e il raggiungimento del massimo carico sopportabile. La seconda parte è monotona decrescente e si assiste ad una deformazione localizzata in una sezione specifica per cui una piccola parte del provino diminuisce velocemente l'area della sua sezione fino alla rottura del provino.

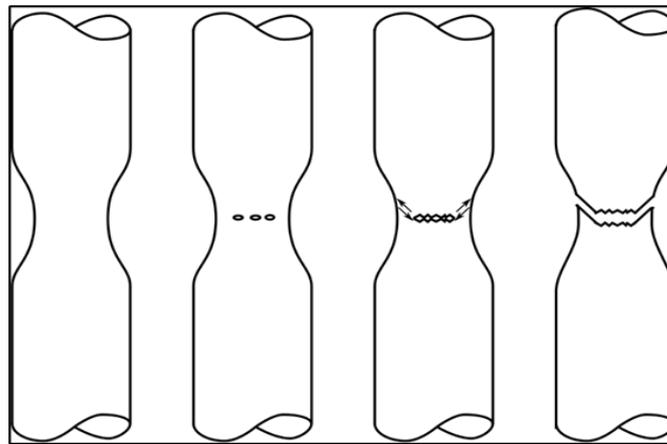


Figura 54: In successione: Strizione, formazione delle microcricche, coalescenza delle microcricche e rottura

Strizione

Il volume del provino resta invariato, quindi V_0 è uguale a V_f

$$V_0 = V_f = V$$

Il volume è il prodotto della sezione A per la lunghezza L

$$V = A_0 L_0 = A_f L_f$$

La sezione finale sarà:

$$A_f = \frac{V}{L_f}$$

La lunghezza finale è pari alla somma della lunghezza iniziale e dell'allungamento

$$L_f = L_0 + \Delta L$$

Si ricava la sezione finale:

$$A_f = \frac{V_0}{L_0 + \Delta L}$$

Quindi conoscendo il volume iniziale del provino, la lunghezza e l'allungamento è possibile ricavare l'area finale del materiale.

6.1 Descrizione della prova

La prova di fatica assiale utilizza la stessa macchina utilizzata per le semplici prove di trazione/compressione che hanno l'obiettivo di misurare il limite elastico ($R_{p0,2}$) e il carico di rottura (R_m) dei materiali. All'estremità del provino ci sono due morsetti di serraggio e una cella di carico che permette di avere il controllo sulle sollecitazioni a cui il provino è sottoposto. La differenza fondamentale tra una macchina che svolge semplici prove di trazione/compressione e tra una macchina che svolge prove di fatica è nel tipo di software che la macchina utilizza essendo questa prova molto più complessa in termini di controlli elettronici, i carichi non restano costanti nel tempo ma variano con una frequenza molto elevata oscillando simmetricamente intorno allo zero (nel caso di rapporto di carico $R=-1$). Le macchine che riescono a svolgere prove di fatica assiale sono sicuramente capaci di operare semplici prove di rottura a trazione e compressione, al contrario macchine che svolgono prove di trazione e compressione non è detto che siano capaci di svolgere prove di fatica proprio perché non dispongono di un'attrezzatura hardware e software capace di impostare parametri di ciclo e carico adeguati. Questa importante differenza ha impatto sui costi della macchina. In questa prova di fatica il provino è sottoposto solo a sforzi di trazione e compressione puri senza avere sforzi di taglio o sforzi dovuti a momento flettente.

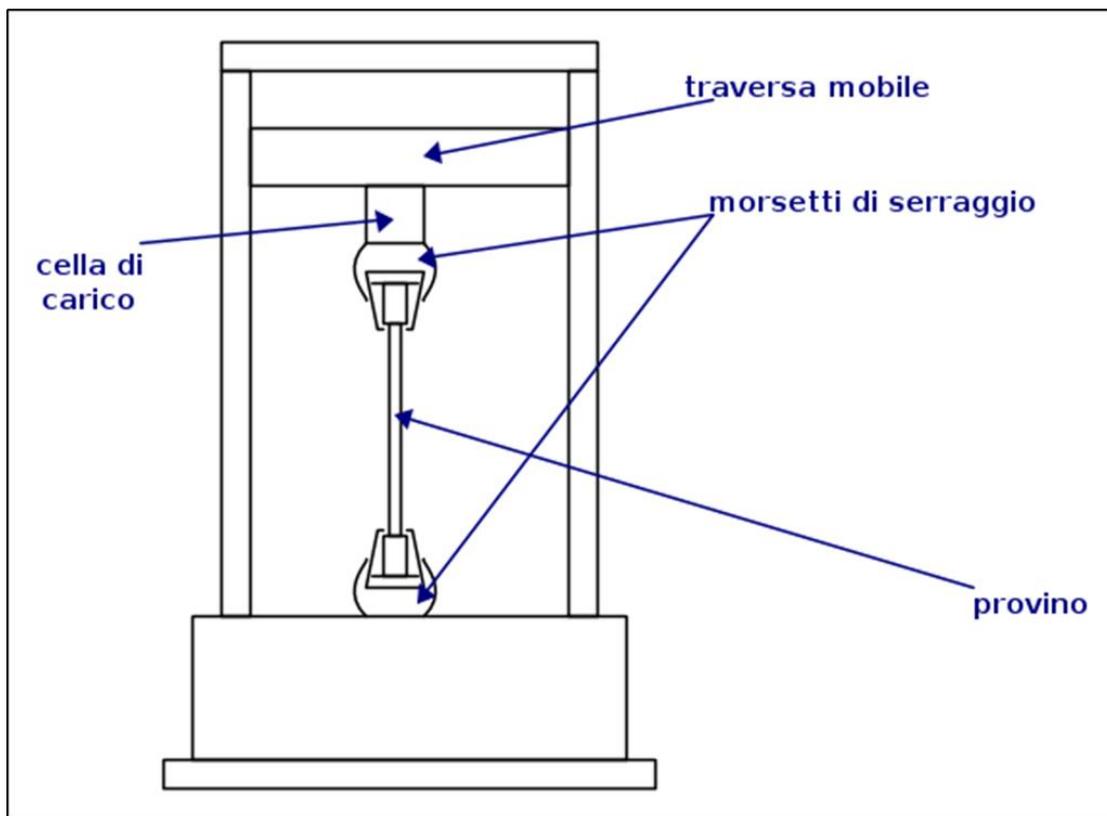


Figura 55: Modello macchina per le prove a fatica assiale

6.2 Descrizione della macchina

In figura è presentata la macchina a fatica assiale per le prove sperimentali. Durante le prove di fatica l'andamento delle tensioni presenta un rapporto di tensione pari a -1 con una tensione media nulla.



Figura 56: Macchina per le prove a fatica assiale

La macchina per le prove è stata realizzata dalla MTS Systems Corporation (Material-Testing-System) un'azienda americana di sistemi di test e sensori di posizione industriali. L'azienda fornisce prodotti di test e misurazione per determinare le prestazioni e l'affidabilità di veicoli, aeromobili, strutture civili, materiali e dispositivi biomedici e materie prime.



Figura 57: Logo azienda MTS

6.2.1 Parte hardware

Per la chiusura dei morsetti di afferraggio del provino e lo spostamento verticale della traversa mobile per avvicinare il morsetto inferiore al morsetto superiore al fine di avere un corretto afferraggio del pezzo, si utilizza un sistema idraulico ad olio in pressione. La stazione di pompaggio dell'olio si trova in una cabina all'esterno del laboratorio. Per evitare che l'olio in pressione raggiunga alte temperature, soprattutto nei mesi estivi, si utilizza un circuito di raffreddamento ad acqua per raffreddarlo. Lo spostamento relativo del morsetto inferiore in verticale è controllato dal software mentre la chiusura di serraggio del provino viene effettuato da due manopole idrauliche manuali.



Figura 58: Controller MTS flextest



Figura 59: Manopole per la chiusura idraulica dei morsetti



Figura 60: Morsetti per il blocco del provino

Il modello dei morsetti è il 647 Hydraulic Wedge Grip con le seguenti specifiche

Capacità di forza dinamica	100 kN / 22 kip
Capacità di forza statica	120 KN / 27 kip
Pressione massima	21 Mpa / 3,000 psi
Range di Temperatura	-40 °C +177 °C

Tabella 9: caratteristiche dei morsetti



Figura 61: tubi di alimentazione dell'olio e dell'acqua (raffreddamento)



Figura 62: Tasto d'arresto del circuito (a sinistra) e rubinetto del raffreddamento dell'acqua (a destra)



Figura 63: Cabina all'esterno del laboratorio contenente il circuito dell'olio

Nella seguente foto si osserva il circuito dell'olio: in basso in bianco c'è il serbatoio da cui l'olio viene prelevato quando la macchina sta lavorando e in cui viene mandato alla fine dei test. Il pezzo cilindrico in nero sopra il serbatoio è il compressore che si occupa di muovere l'olio nel circuito e in alto in bianco c'è la cabina elettrica di controllo del circuito. È importante una periodica pulizia del circuito dato che possono crearsi delle impurità sul fondo del serbatoio che se mandate in pressione nel circuito possono danneggiarlo irreparabilmente.



Tensione nominale	400 V a.c.
Frequenza nominale	50 Hz
Corrente a pieno carico	36 A
Potere di interruzione	15 kA
Grado di Protezione	IP54
Circuiti Ausiliari	24 V a.c.
Schema Elettrico	09043-SE
Anno di Costruzione	04/2010



Figura 64: Circuito dell'olio e caratteristiche principali

L'azienda che si è occupata della pulizia del serbatoio e del circuito idraulico della macchina è la B-Fluid S.r.l. di Moncalieri (TO)

6.2.2 Parte software

Per la parte software si utilizza un controller MTS series 793. Il vantaggio è che combina capacità di controllo servo-loop FlexTest superiori, un ambiente di progettazione di test completo e un set di strumenti applicativi collaudati nel settore per condurre uno spettro completo di test, che vanno dai test statici dei materiali uniassiali alla simulazione con veicoli stradali completi multiassiali altamente dinamici.

È un testware multiuso che può molte applicazioni tra cui le seguenti:

- Test statico
- Qualificazione dinamica
- Frattura e fatica
- Qualità
- Prestazione

All'accensione del computer collegato alla macchina di fatica assiale bisogna seguire delle fasi preliminari per impostare alcuni parametri e permettere un corretto avvio del software prima di arrivare alla vera e propria schermata di lavoro.

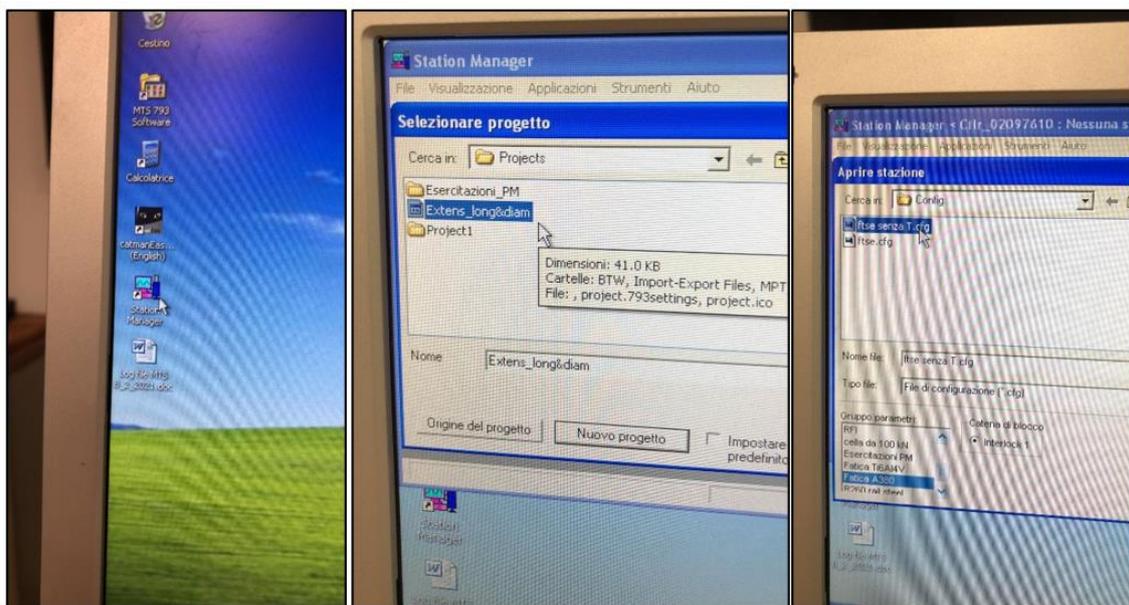


Figura 65: Avvio software

Una volta completata la procedura di avvio software si giunge alla schermata di lavoro, dove andremo ad inserire i parametri di lavoro del provino. Nella parte inferiore della schermata troviamo i limiti di partenza molto importanti perché permettono di controllare che il provino non si sfilì durante la prova.

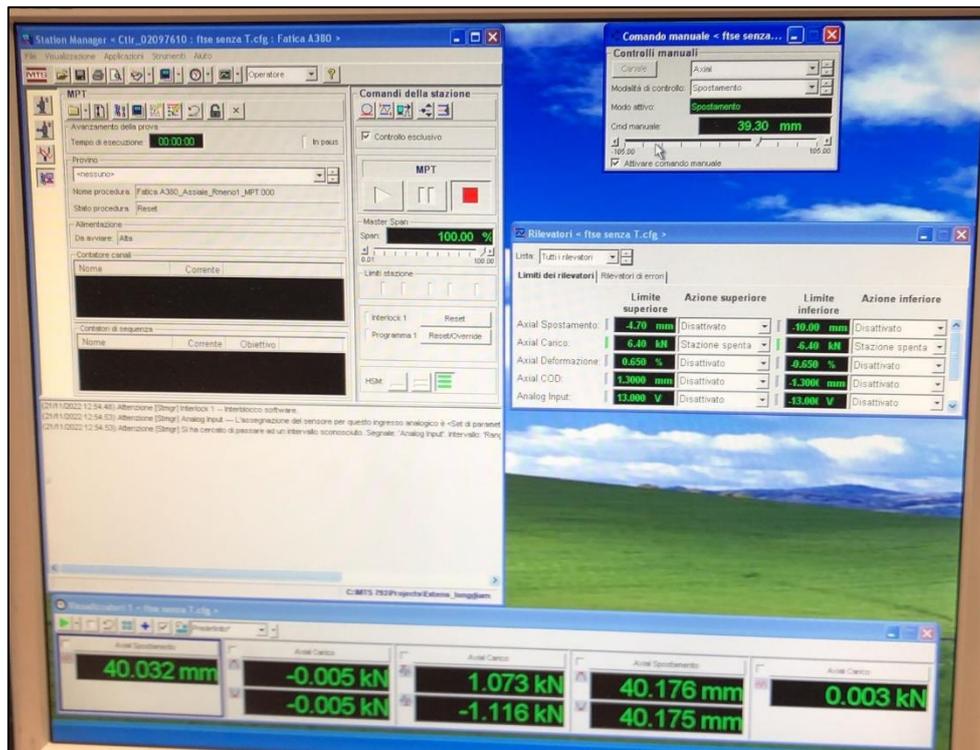


Figura 66: Schermata di lavoro

Aperta la schermata si va ad impostare il tipo di prova, gli estremi di forza F calcolati e la frequenza di lavoro cliccando sul riquadro indicato in figura.

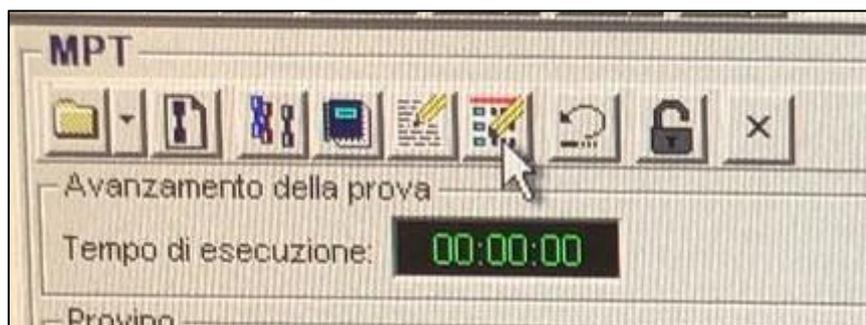


Figura 67: Dettaglio schermata di lavoro

Una volta premuto il riquadro si arriverà alla seguente schermata:

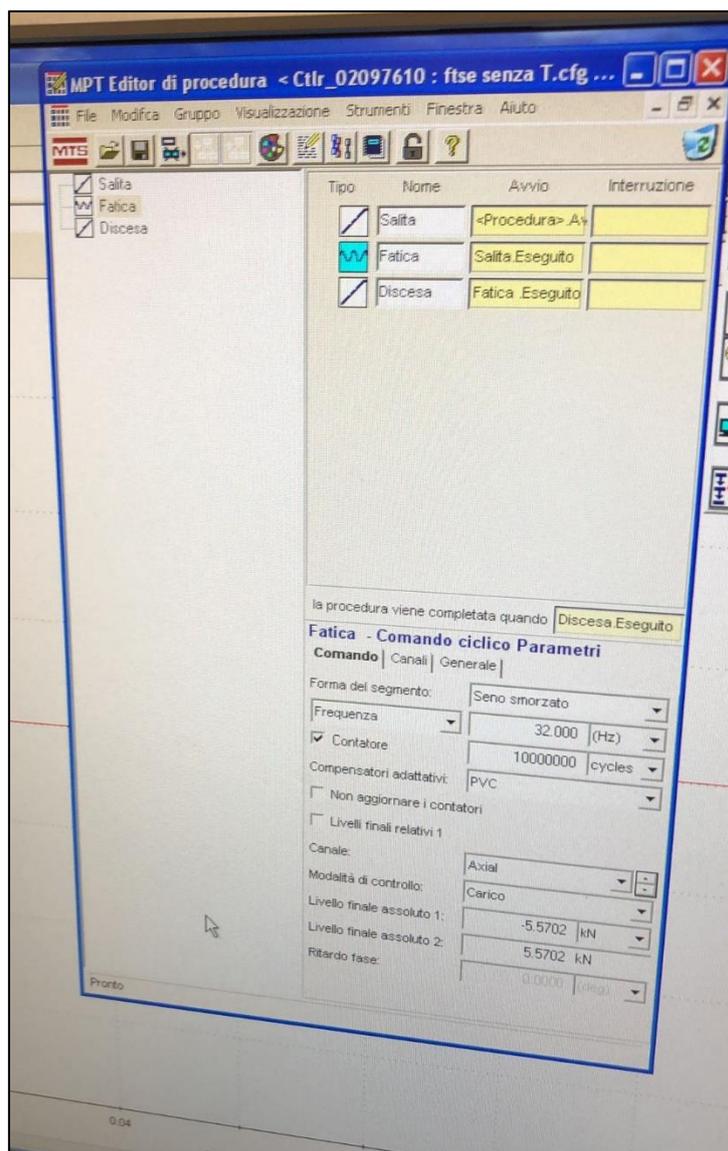


Figura 68: Dettaglio selezione tipologia di carico

In alto vado a selezionare il tipo di carico e in basso i limiti superiore e inferiore della forza F , rispettivamente F e $-F$, oltre che la frequenza di lavoro.

Prima di avviare la prova si blocca un'estremità del provino nella ganascia inferiore per tenere fermo il provino tramite la manopola idraulica apposita. In seguito si fa salire la ganascia inferiore con tutto il provino fino all'altezza della ganascia superiore. Nella parte superiore dello schermo a dx si passa dalla modalità di controllo in spostamento alla modalità in controllo di carico e simultaneamente si chiude manualmente la ganascia superiore sull'altra estremità del provino.

Una volta bloccato si fa salire, molto lentamente, la forza fino al valore calcolato teorico. È importante durante questa fase guardare il numero in basso all'estrema sx che rappresenta lo spostamento del pistone e vedere che non subisca grosse variazioni altrimenti la prova non è valida dato che sta avvenendo lo slittamento del provino. Qualora avvenga lo sfilamento si osserva una grossa variazione del numero in basso a sx anche dell'ordine dei mm che nei casi estremi può essere osservato anche visivamente.

Una volta verificato che il provino non è soggetto a slittamento si toglie il comando manuale sempre dalla schermata in alto a dx (tolgo da quadratino la spunta ✓) e si clicca sul simbolo del lucchetto.

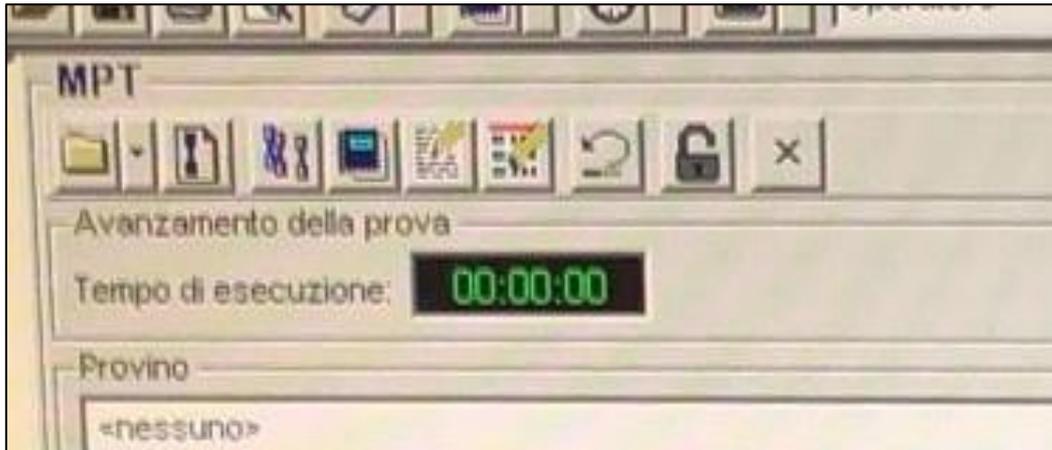


Figura 69: Sblocco lucchetto

A questo punto si procede al lancio della prova

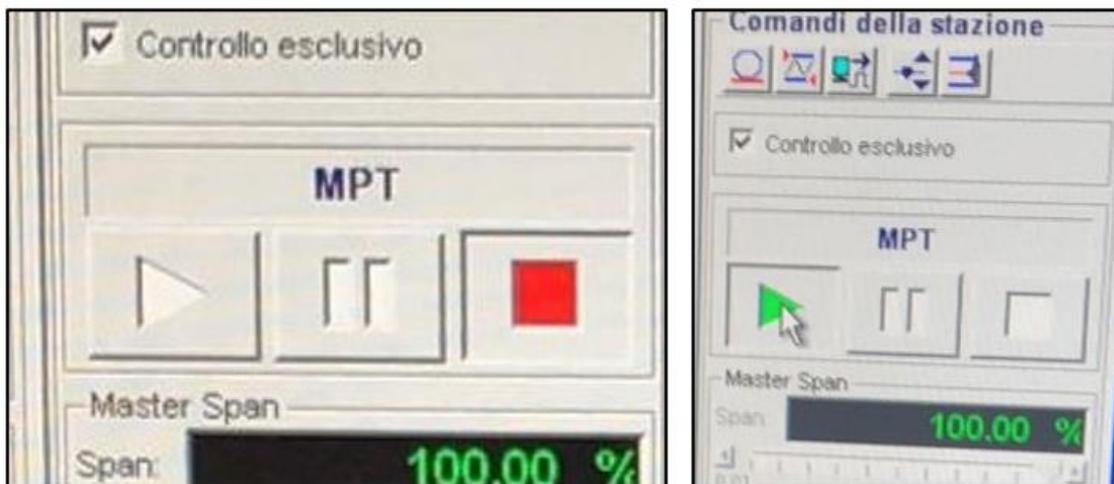


Figura 70: Dettaglio lancio prova

Appena avviata la prova la linea di carico va prima lentamente a zero e poi inizia il suo andamento sinusoidale tra F e $-F$ come nella seguente immagine aumentando progressivamente la frequenza fino ad arrivare il valore di frequenza impostato.

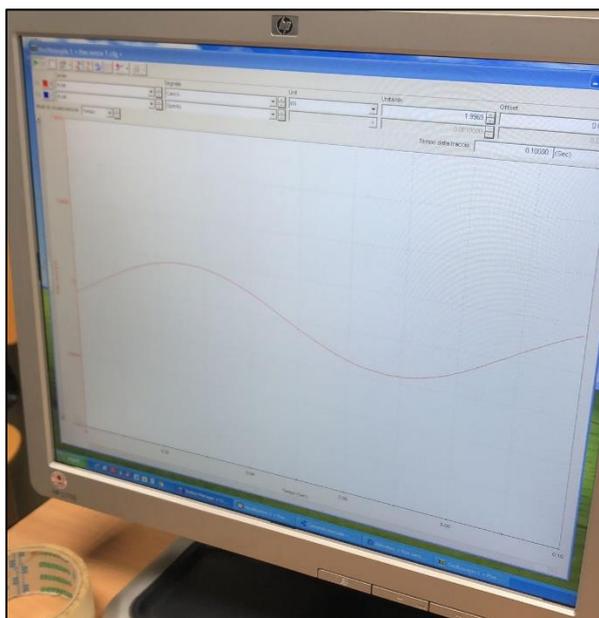


Figura 71: Visualizzazione della prova su monitor

6.2.3 Spegnimento automatico della macchina

Una volta avviata la prova, si procede ad impostare i limiti di carico e di spostamento che, se superati, porteranno ad un arresto immediato della macchina. I limiti di spostamento vengono superati se il provino slitta troppo oppure se avviene la sua rottura durante l'esercizio della prova. I limiti di carico servono per impedire che, a seguito di picchi di carico che possono essere anche dovuti a interferenze del segnale, il provino riceva delle botte che possono rendere invalida la prova o nei casi più gravi avere effetti distruttivi sul componente in esercizio.

Come limite superiore/inferiore di spegnimento dello spostamento assiale si è scelto rispettivamente $+2,5/-2,5$ mm rispetto allo spostamento max/min del provino all'avvio della prova.

Come limite superiore/inferiore di spegnimento del carico assiale si è scelto rispettivamente $+0,6/-0,6$ kN rispetto al carico max/min del provino all'avvio della prova.

	Limite superiore	Azione superiore	Limite inferiore	Azione inferiore
Axial Spostamento:	-4.70 mm	Disattivato	-10.00 mm	Disattivato
Axial Carico:	6.40 kN	Stazione spenta	-6.40 kN	Stazione spenta
Axial Deformazione:	0.650 %	Disattivato	-0.650 %	Disattivato
Axial COD:	1.3000 mm	Disattivato	-1.3000 mm	Disattivato
Analog Input:	13.000 V	Disattivato	-13.000 V	Disattivato

Figura 72: Parametri di spegnimento

6.3 Prove sperimentali

Per le prove sperimentali sui campioni di fatica a flessione rotante si sono prese in considerazione 3 tipologie di provini

1. Provini grezzi (F) II colata
2. Provini trattati con T6 II colata (solubilizzazione a 480°C per 20 minuti e invecchiamento a 180°C per 2 ore) II colata
3. Provini trattati con T6 (solubilizzazione a 460°C per 20 minuti e invecchiamento a 180°C per 2 ore) II colata

6.3.1 Procedura settaggio sforzo sulla macchina

1. Calcolo del diametro d_m del provino espresso in mm
2. Impostazione dello sforzo σ da applicare al provino espresso in MPa
3. Calcolo della forza F applicata sul provino

$$F = \sigma \pi \frac{(d_m)^2}{4}$$

Una volta impostato sul software di regolazione la misura della forza F , si avrà che il componente lavorerà a fatica assiale ad uno sforzo σ pari a quello impostato nel passaggio 2).

La non corretta esecuzione della formula o del settaggio al software può portare il provino a lavorare a fatica assiale ad un carico diverso da quello desiderato e ad avere errori di analisi a fatica.

A differenza dello studio a fatica a flessione rotante in cui un provino con una forte eccentricità poteva avere effetti distruttivi in prova molto accentuati, qui l'eccessiva eccentricità causata dalle lavorazioni meccaniche viene ad essere annullata o quantomeno attenuata dai carichi di trazione/ compressione che portano il centro di massa del provino ad allinearsi all'asse di simmetria ideale.

6.4 Risultati ottenuti

Provini II colata grezzi (F)												
Prove di fatica assiale R=-1 $\sigma_m=0$ N=10 M cicli	1=Rottura valida 0=Run Out 1= Rottura invalida											
	Campioni											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
σ_a (Mpa)												
124												
118						1		1				
112					0		0		1		1	
106				0						0		0
100	1		0									
94		0										
88												
82												

Tabella 10: Stair case provini II colata grezzi (F)

Provini II colata trattati termicamente T6 (480_20min + 180_2h)													
Prove di fatica assiale R=-1 $\sigma_m=0$ N=10 M cicli	1=Rottura valida 0=Run Out 1= Rottura invalida												
	Campioni												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
σ_a (Mpa)													
103													
95	1												
87		1		1									
79			0		1		1		1				
71						0		0		1		1	
63											0		0

Tabella 11: Stair case provini II colata trattati termicamente T6 (480-20min + 180-2h)

Provini II colata trattati termicamente T6 (460_20min + 180_2h)													
Prove di fatica assiale R=-1 $\sigma_m=0$ N=10 M cicli	1=Rotta 0=Non Rotta 1= Rottura invalida												
	Campioni												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
σ_a (Mpa)													
112													
106													
100	1												
94		1		1									
88			0		1						1		0
82						1				0		0	
76							1		0				
70								0					
64													

Tabella 12: Stair case provini II colata trattati termicamente T6 (460-20min + 180-2h)



Figura 73: Tipologie di rotture

6.5 Conclusioni

Dai risultati, contrariamente con quanto visto per la fatica a flessione rotante, si osserva un crollo della resistenza a fatica tra i grezzi di colata e i provini trattati termicamente con trattamento T6. La resistenza a fatica dei provini grezzi resta sempre tra i 100 MPa e i 118 MPa con una media di 112 MPa, mentre nei provini trattati con il primo T6 (temperatura di solubilizzazione 480°C) la resistenza a fatica precipita sotto i 90 MPa, con una media di 81 MPa, questo perché durante la solubilizzazione i vuoti della lega si espandono andando a formare zone critiche centrali da cui parte la rottura per fatica. Nei provini trattati con il secondo T6 (temperatura di solubilizzazione 460°C) l'effetto di crescita dei vuoti è meno evidente, perché il trattamento di solubilizzazione è meno efficace, così come la crescita dei vuoti, tuttavia la resistenza a fatica si mantiene sempre sotto i 90 MPa con una media di 87 MPa. Si conclude quindi che per carichi ciclici assiali di trazione il trattamento T6 non va a comportare nessuno beneficio anzi è fonte di criticità poiché diminuisce la sezione resistente del provino e inoltre favorisce la nucleazione e propagazione delle cricche di fatica a partire dalle cavità espanse alla temperatura di solubilizzazione. Una soluzione che potrebbe aiutare ad eliminare le porosità sarebbe quella di sviluppare un processo produttivo che tolga l'aria dallo stampo prima dell'iniezione del metallo liquido. Purtroppo questo processo richiederebbe dei costi aggiuntivi che sarebbe conveniente solo in caso di notevoli incrementi delle prestazioni meccaniche.

Cap 7: Analisi al microscopio ottico

A seguito delle prove svolte nel CAPITOLO 6 si è proceduto ad analizzare al microscopio ottico Stereo le sezioni dei provini sottoposti a fatica assiale e rotti a causa della presenza di difetti (vuoti). Con il microscopio si è calcolata la superficie del difetto per una stima delle sue dimensioni all'interno del provino.

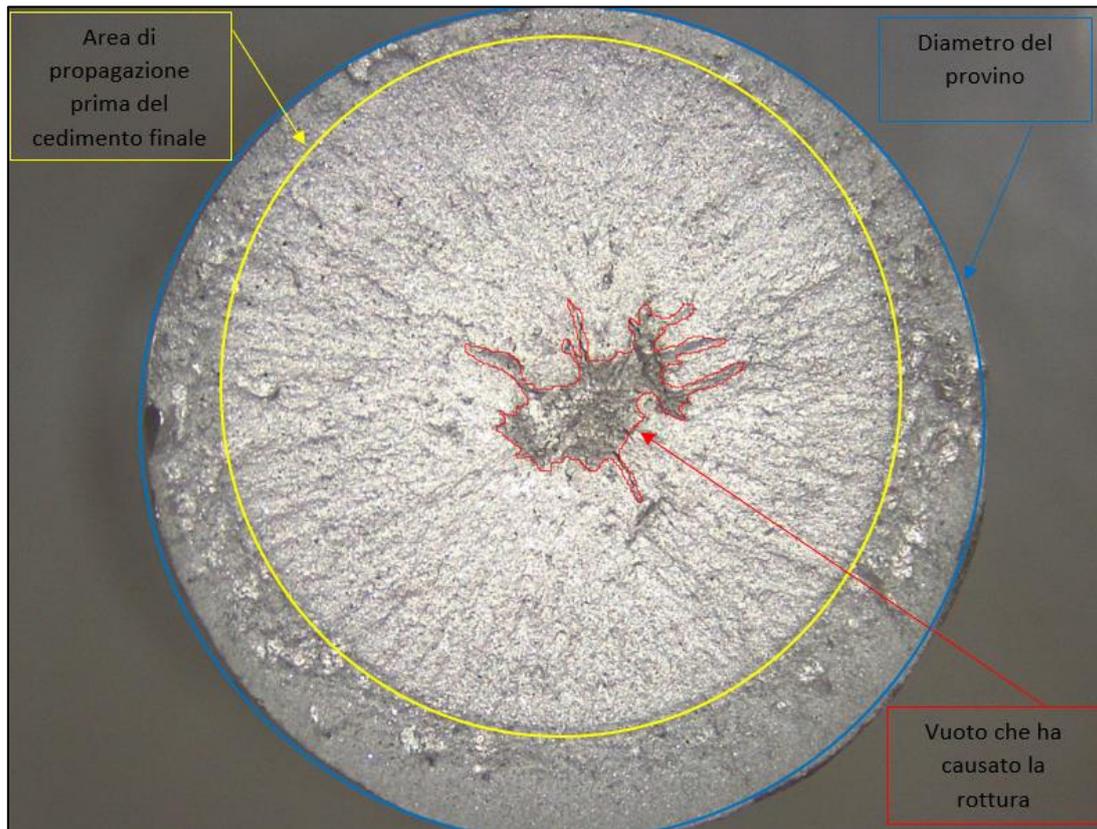


Figura 74: Sezione del provino con difetto

7.1 Dettagli dei difetti

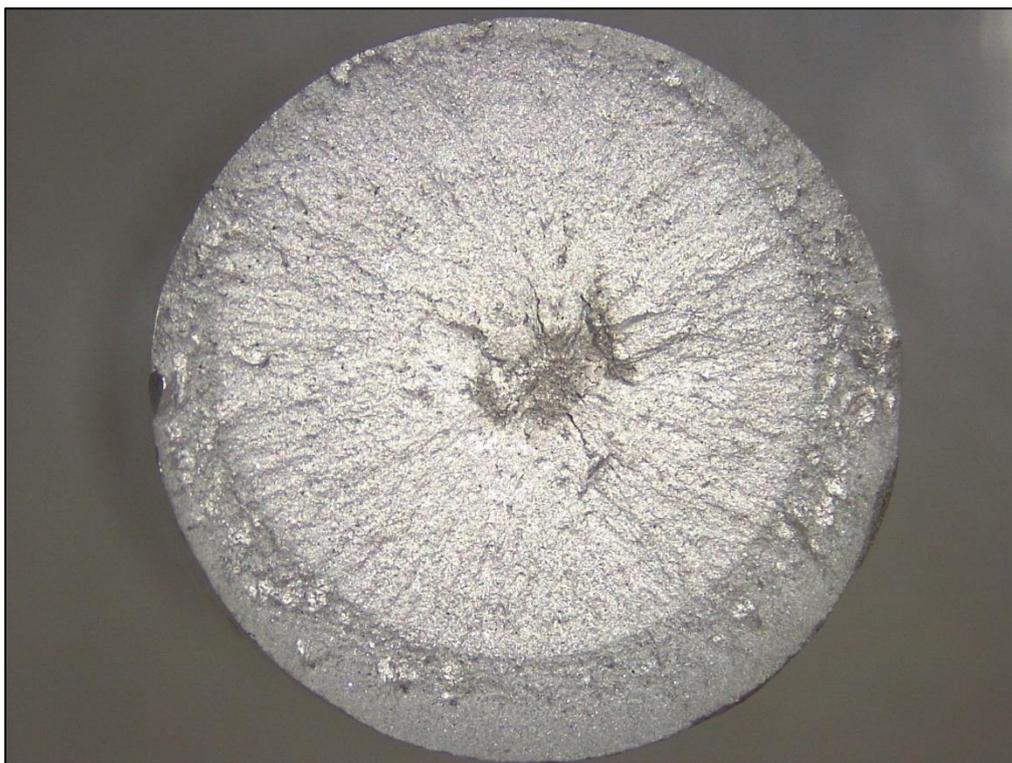


Figura 75: Provino T460NAX6

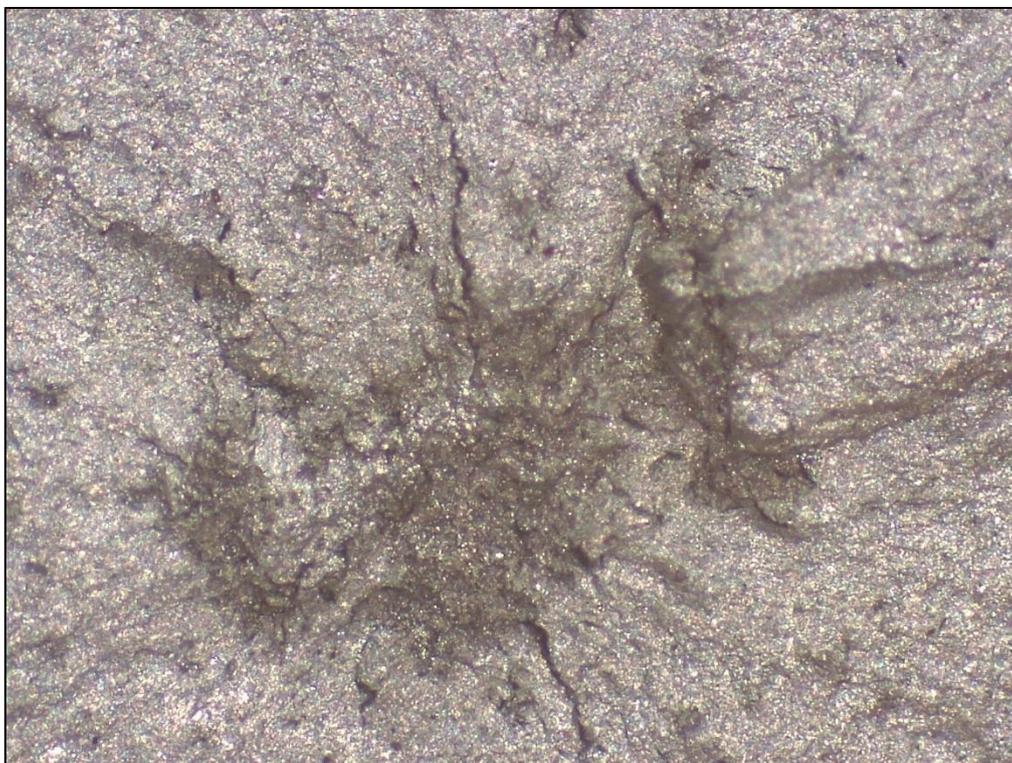


Figura 76: Dettaglio provino T460NAX6



Figura 77: Provino T460NAX11

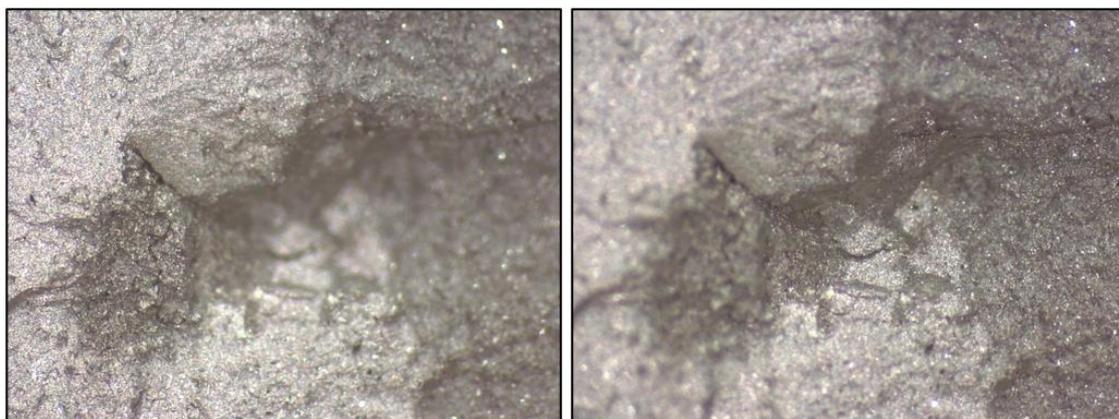


Figura 78: Dettaglio provino T460NAX11



Figura 79: Provino T460NAX7



Figura 80: Dettaglio provino T460NAX7

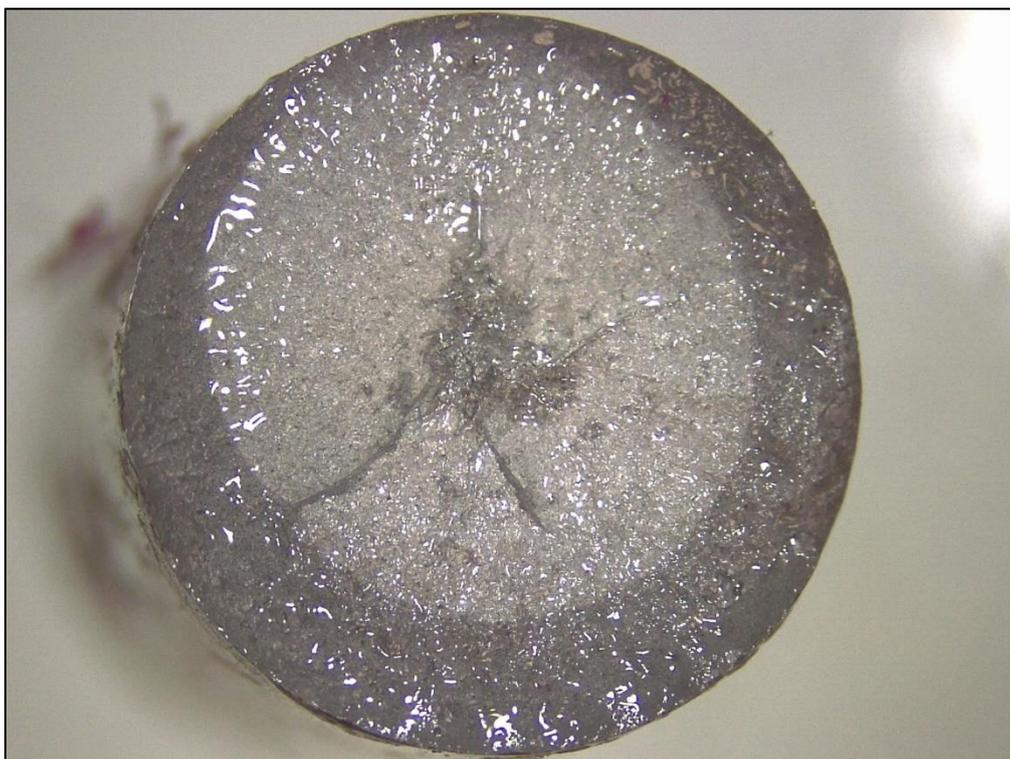


Figura 81: Provino T460NAX5

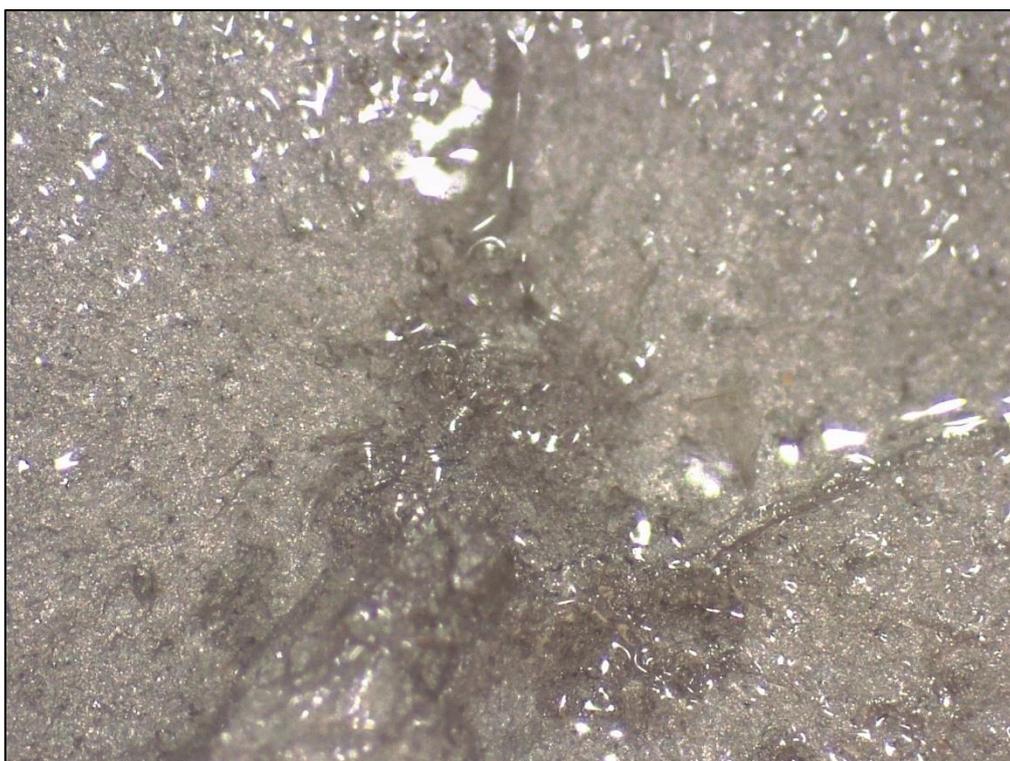


Figura 82: Dettaglio provino T460NAX5



Figura 83: Provino T460NAX4

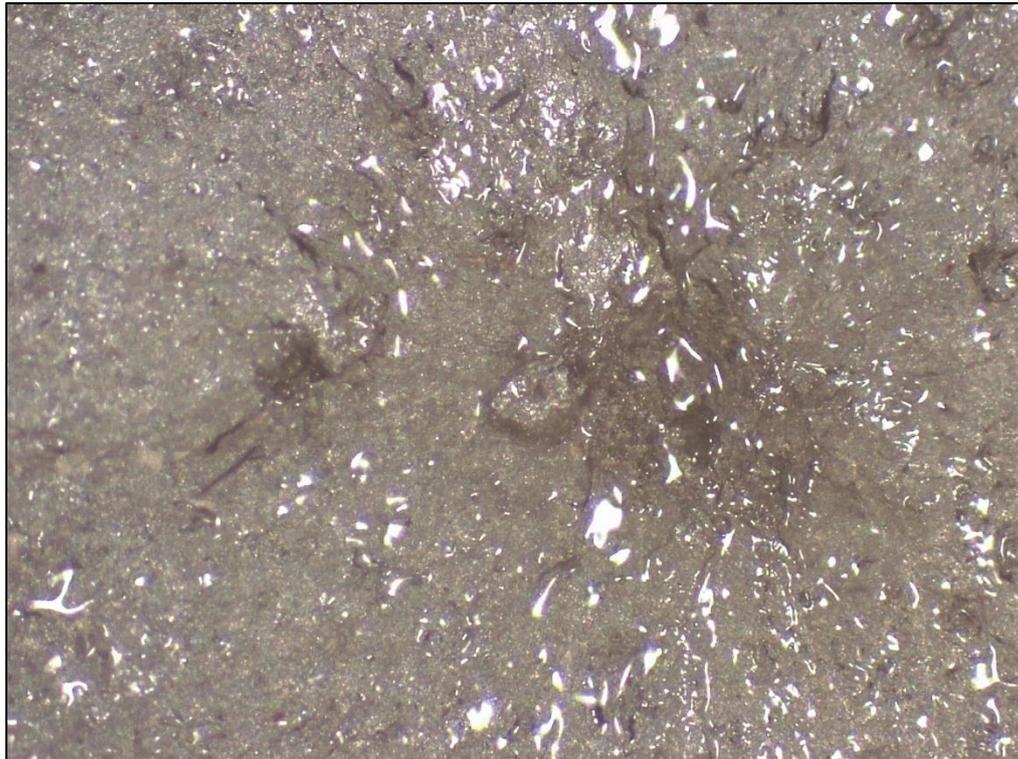


Figura 84: Dettaglio provino T460NAX4

7.2 Descrizione delle rilevazioni

Per le rilevazioni al microscopio ottico si è utilizzato il software Fiji, un pacchetto di elaborazione delle immagini open source basato su ImageJ2. Nella procedura seguentemente indicata, si fa riferimento al campione T460NAX6, primo dei provini analizzati al microscopio.



Figura 85: Logo software Fiji

Una volta aperto il software si procede partendo da misure note come il diametro della sezione di rottura calcolata tramite un calibro digitale. Si tracciano le linee sulla figura per sapere la loro lunghezza in pixel.

COMANDI: **ANALYZE**→**MEASURE**

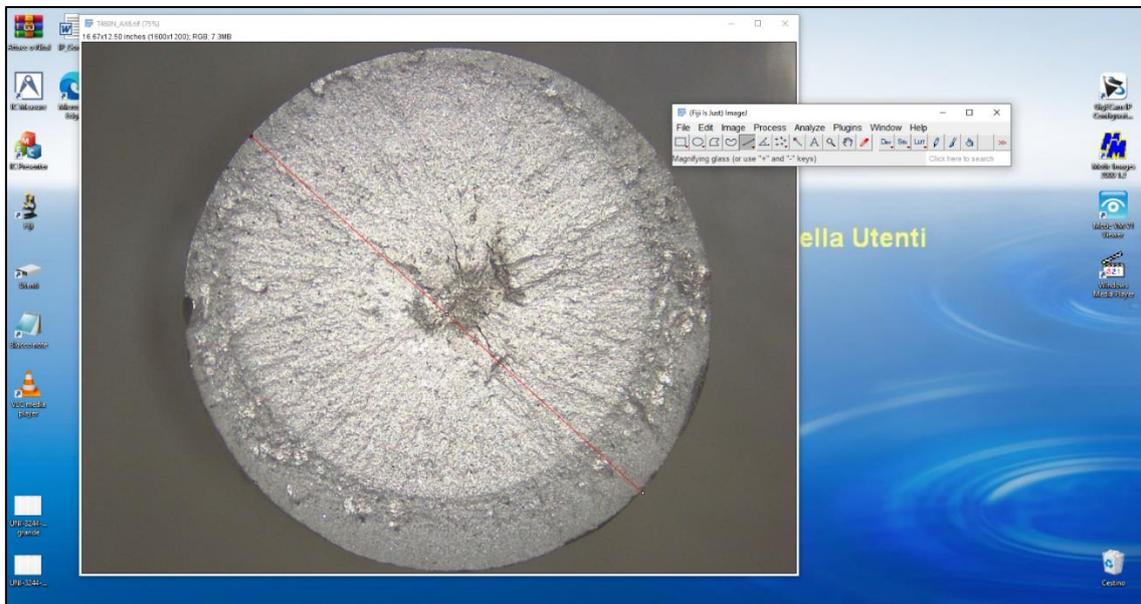


Figura 86: Schermata di lavoro 1

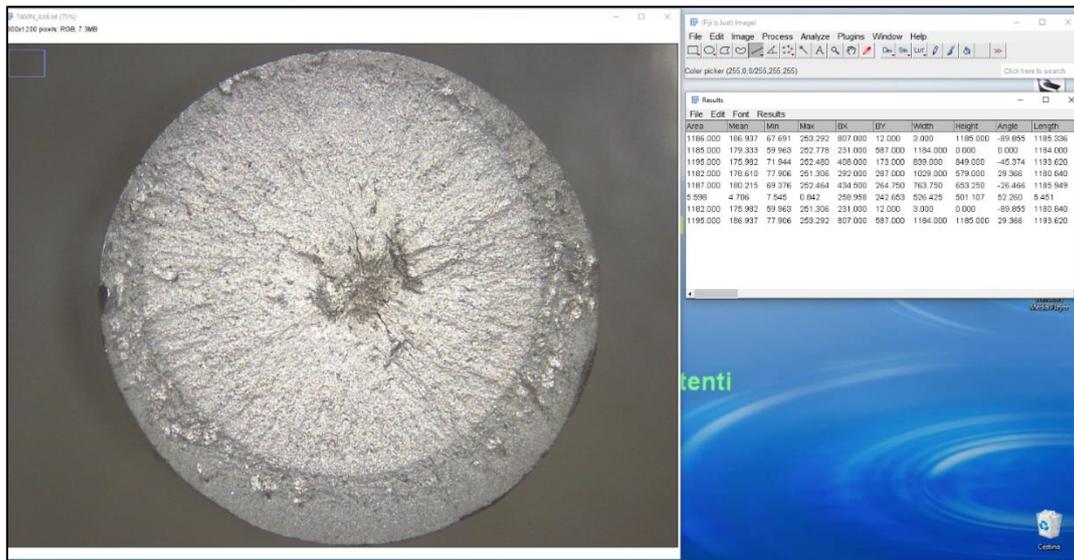


Figura 87: Campionamento dei dati

A questo punto conoscendo la misura in foto del diametro in pixel si procede al settaggio della scala

COMANDI: ANALYZE→SET SCALE

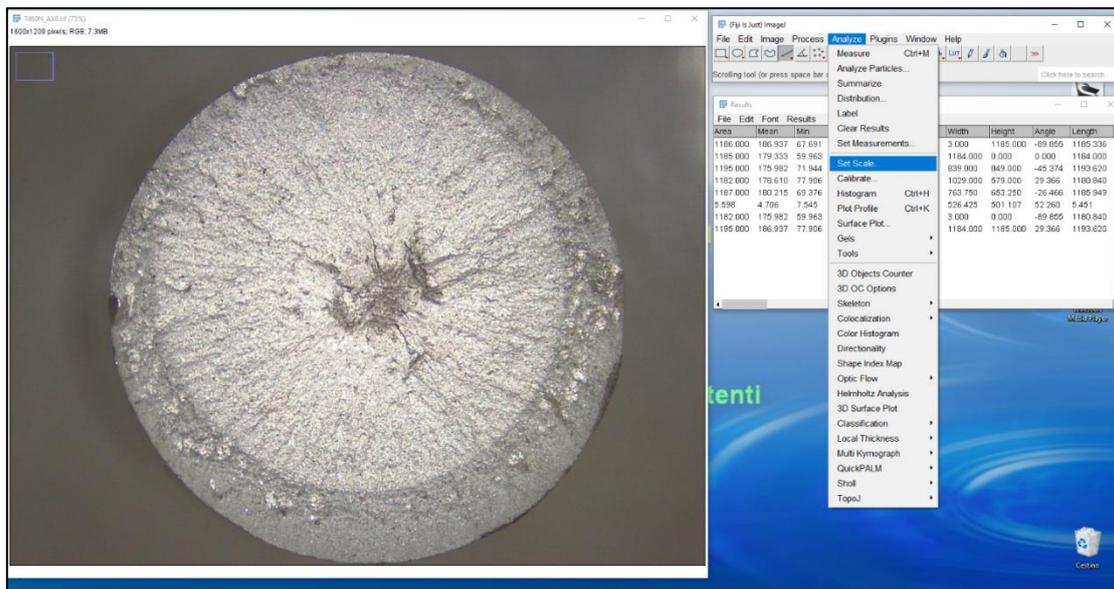


Figura 88: Settaggio scala

DISTANCE IN PIXEL: valore medio dei diametri in pixel

KNOW DISTANCE: valore del diametro calcolato con il calibro

UNIT OF LENGTH: mm

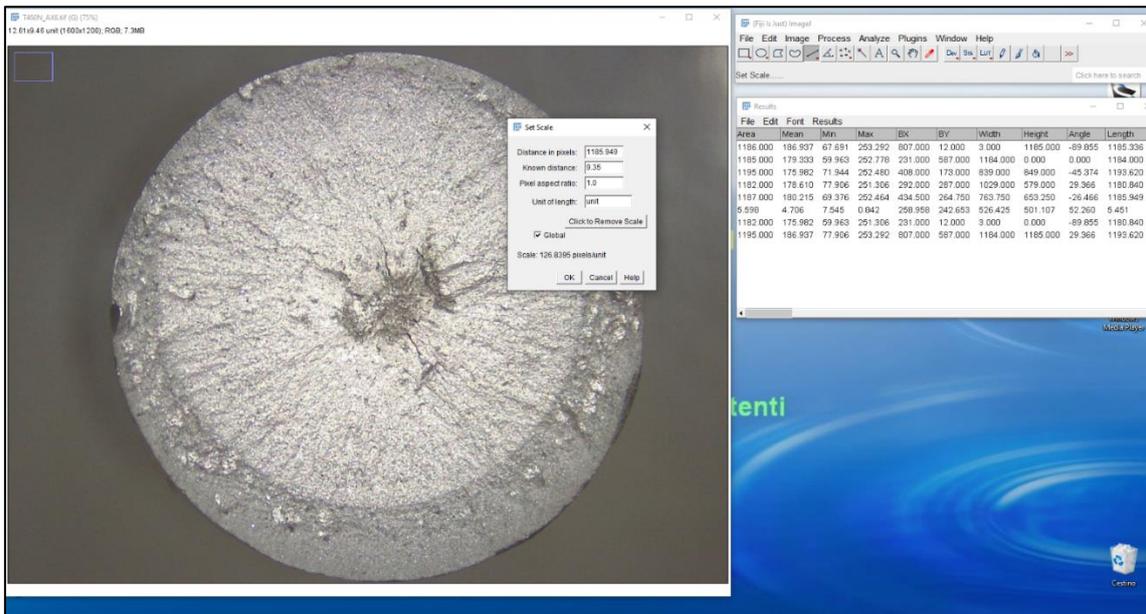


Figura 89: Parametri di settaggio scala

VERIFICA DELL'ERRORE SULLA SEZIONE DI ROTTURA

È molto importante, prima di procedere a calcolare l'area del difetto centrale, verificare che il settaggio della scala sia avvenuto correttamente. Si procede ad un calcolo della sezione totale dell'intero provino, con il software, e la si confronta con l'area teorica di un cerchio con diametro pari a quello calcolato con il calibro.

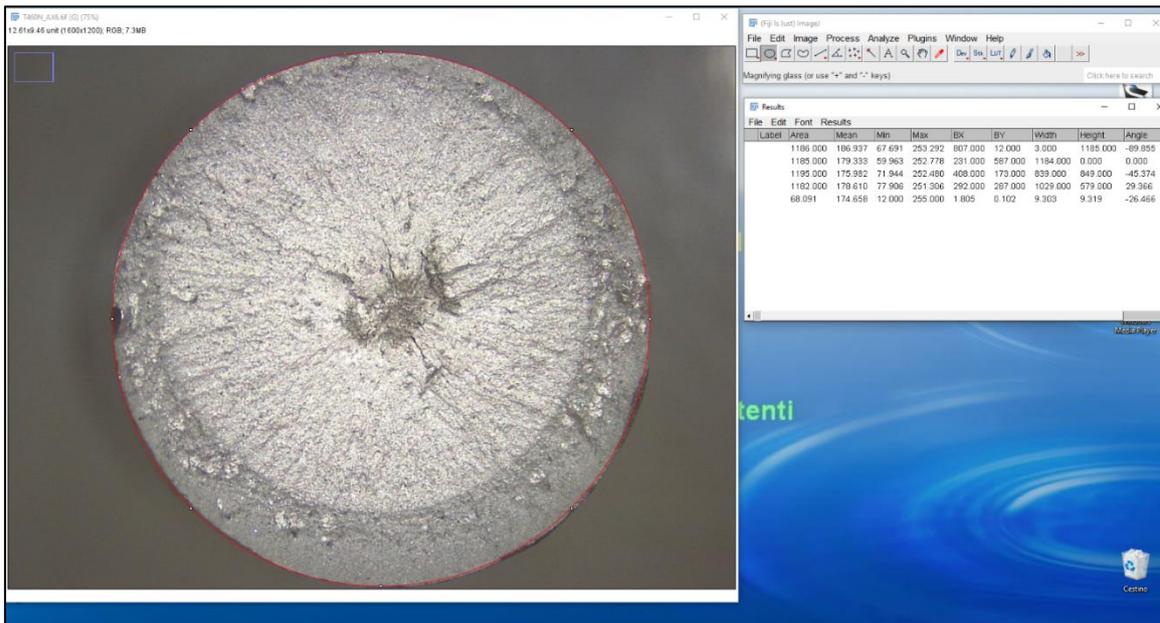


Figura 90: Verifica dell'errore sulla sezione

AREA CALCOLATA CON FIJI	68,09 mm ²
AREA TEORICA DEL CERCHIO	68,66 mm ²
ERRORE %	0,84 %

Come si osserva dai dati l'errore percentuale è molto basso, inferiore all' 1%. Questo vuol dire che il settaggio della scala è avvenuto correttamente.

7.3 Misurazione del difetto

Dopo aver settato correttamente la scala pixel/mm si procede alla misurazione della sezione del difetto partendo dalla barra dei comandi.

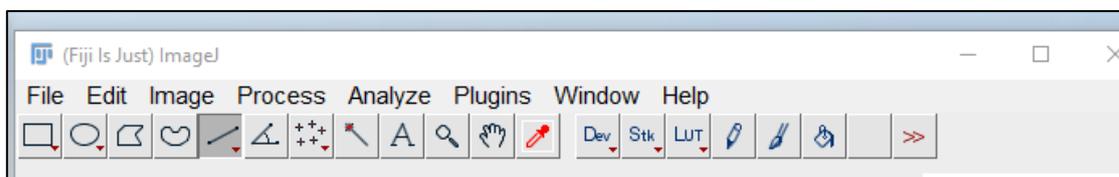


Figura 91: Barra dei comandi

Ci sono due strade:

1. **Polygon selections:** permette all'operatore di contornare il difetto tramite un poligono creato impostando i vertici

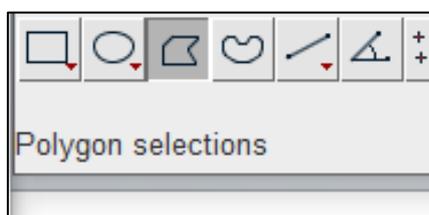


Figura 92: Dettaglio polygon selection

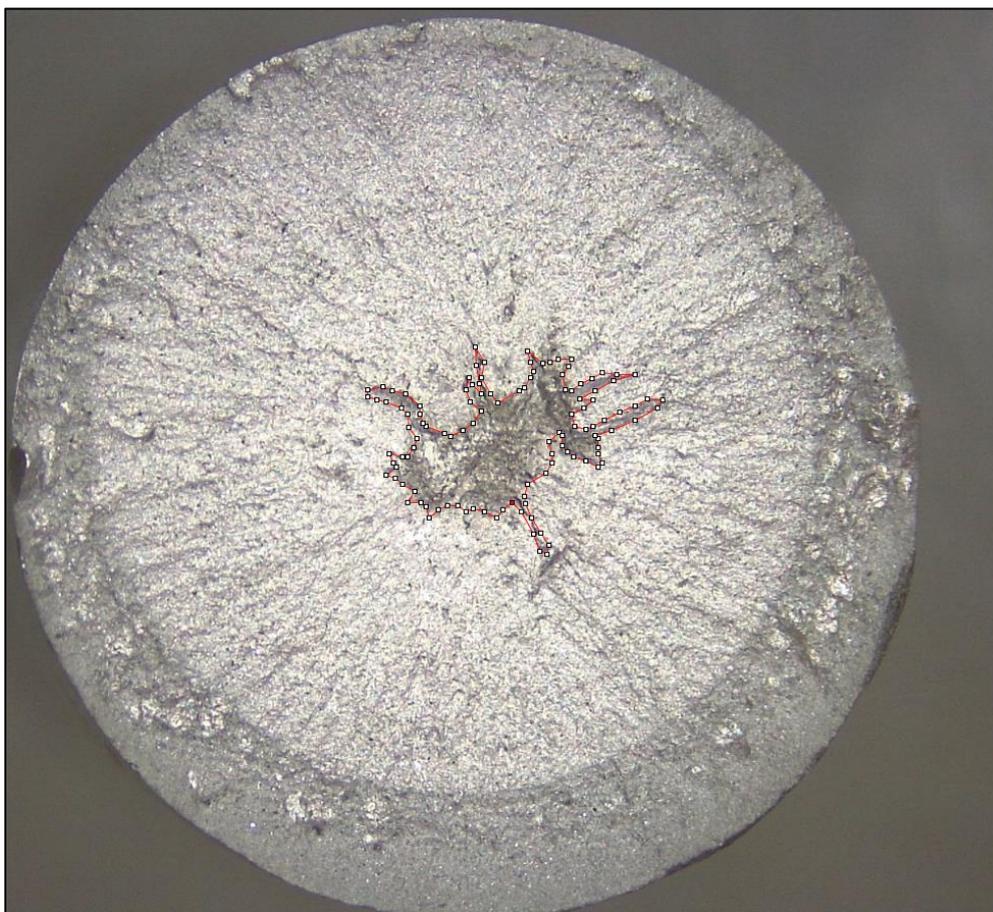


Figura 93: Calcolo del difetto con il metodo polygon selection

2. **Freehand selections:** permette all'operatore di contornare il difetto manualmente

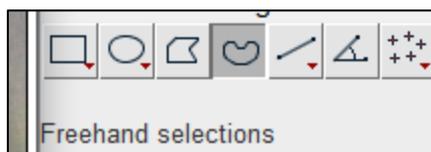


Figura 94: Dettaglio freehand selection

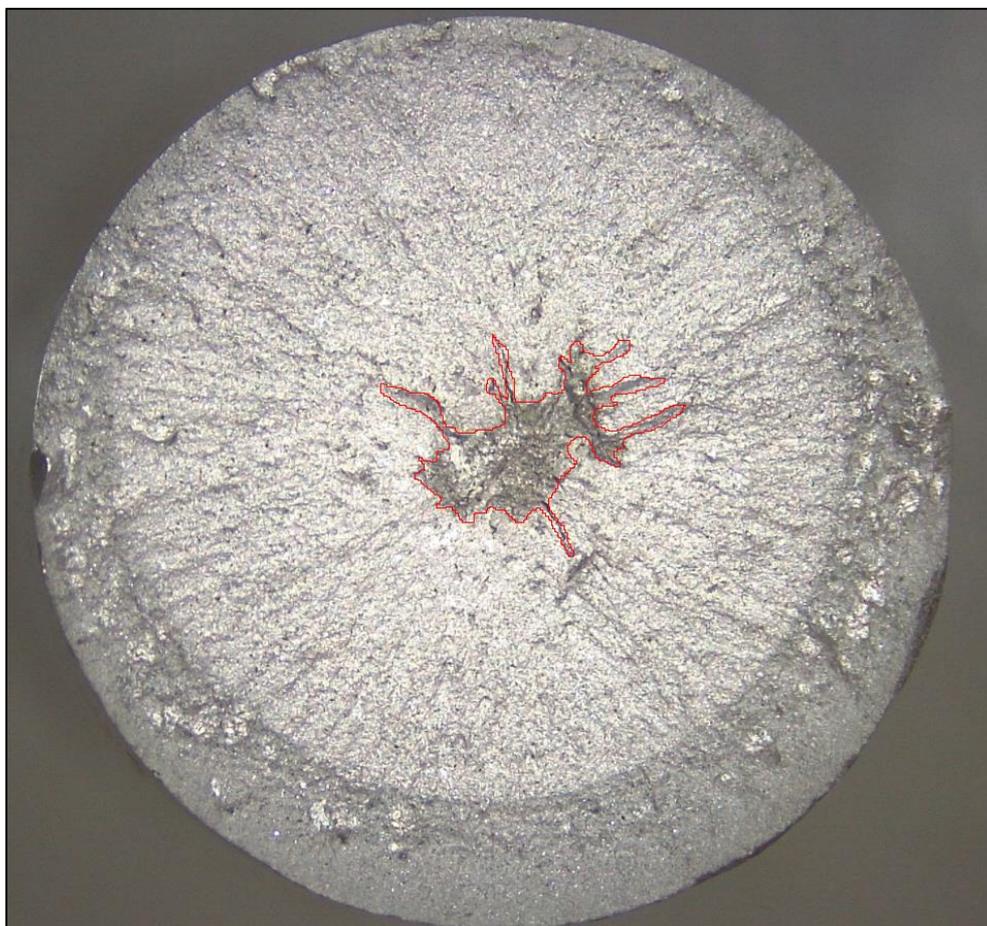


Figura 95: Calcolo del difetto con il metodo freehand selection

AREA CALCOLATA CON IL METODO POLYGON SELECTION	2,100 mm ²
AREA CALCOLATA CON IL METODO FREEHAND SELECTION	2,106 mm ²
DIFFERENZA %	0,28%

Come si osserva dai dati la differenza percentuale è quasi prossima allo zero. Nei difetti che presentano una forma complessa è preferibile utilizzare la polygon selection perché permette all'operatore di contornare la figura con una maggiore precisione. Queste differenze si osservano in caso di immagini ad ingrandimento maggiore e portano a preferire il primo metodo al secondo.

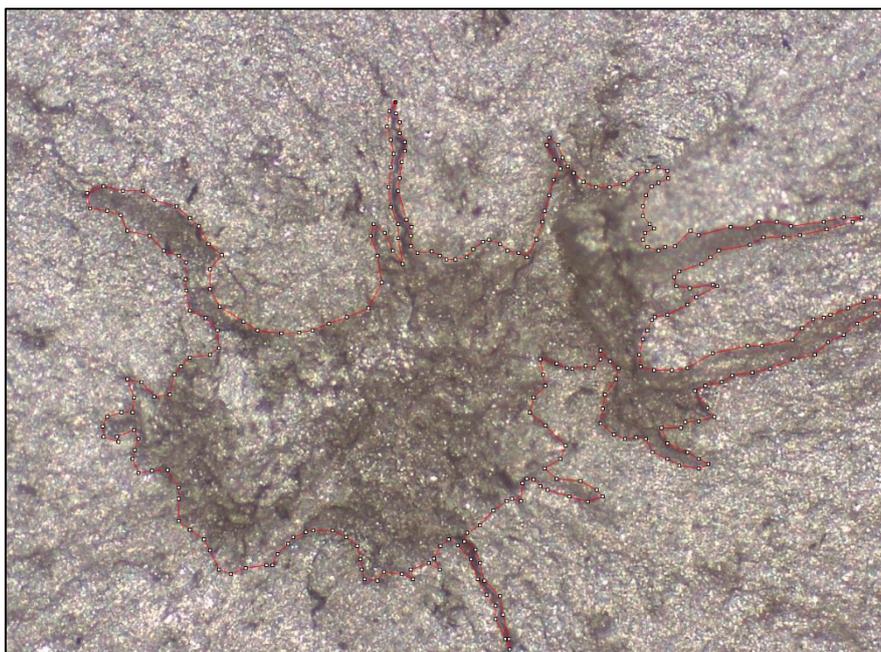


Figura 96: Dettaglio difetto T460NAX6 metodo polygon selection



Figura 97: Dettaglio difetto T460NAX6 metodo freehand selection

AREA CALCOLATA CON IL METODO POLYGON SELECTION	2,004 mm ²
AREA CALCOLATA CON IL METODO FREEHAND SELECTION	2,098 mm ²
DIFFERENZA %	4,48%

Si vede quindi che con immagini a maggiore ingrandimento la variazione della sezione del difetto cambia di qualche decimo di mm².

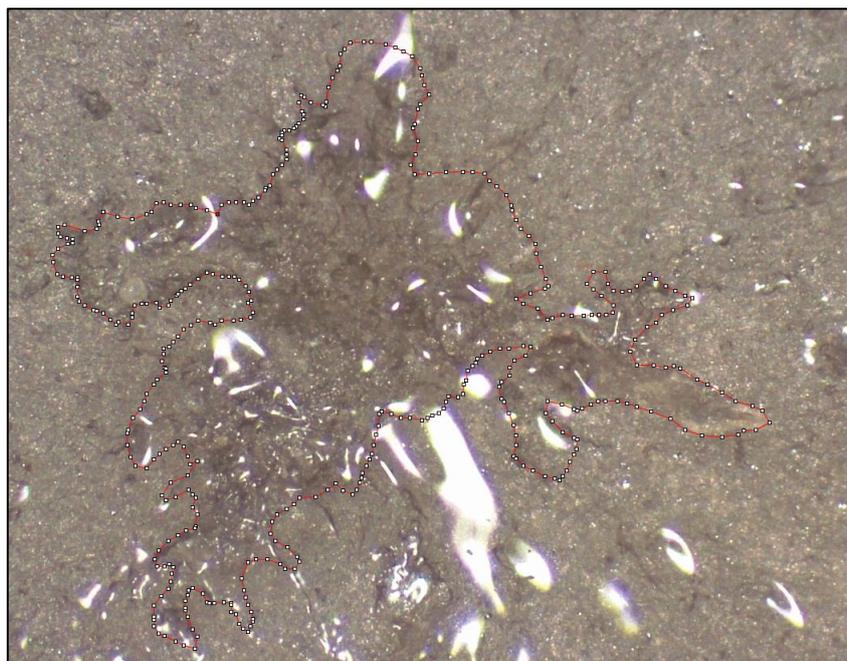


Figura 98: Dettaglio difetto T460NAX2 metodo polygon selection

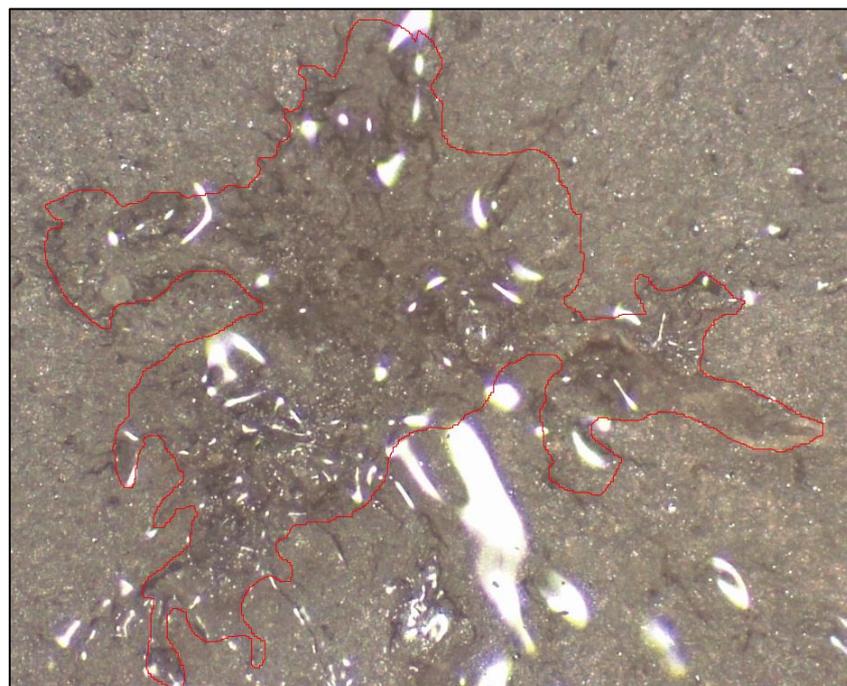


Figura 99: Dettaglio difetto T460NAX2 metodo freehand selection

PROVINO	POLYGON SELECTION (mm ²)	FREEHAND SELECTION (mm ²)	DIFFERENZA %	σ_a (Mpa)
T460NAX6	2,004	2,098	4,48	82
T460NAX11	2,865	2,845	0,7	88
T460NAX5	0,962	0,967	0,52	88
T460NAX2	1,725	1,712	0,75	94

7.4 Durezza Vickers

L'ultima analisi effettuata con il microscopio ottico è stata il calcolo della durezza tramite la scala Vickers su un provino grezzo (F) appartenente alla II colata.

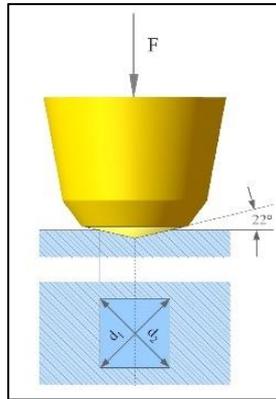


Figura 100: Dettaglio prova di durezza Vickers

Nella prova Vickers il penetratore di diamante è costituito da una piramide retta a base quadrata con un angolo di $\theta=136^\circ$. Quello che si misura è il rapporto fra il carico applicato e la superficie dell'impronta. La formula per il calcolo della durezza Vickers è la seguente:

$$HV = 1,854 \frac{F}{D}$$

Con:

HV: durezza Vickers

F: carico applicato (Kg)

D: area dell'impronta (mm²)



Figura 101: Indente utilizzato per misurare la durezza

Per una corretta misurazione dell'area dell'impronta sono state fatte tre indentazioni sul campione di riferimento utilizzando un peso di 20 kg e come dato per calcolare la durezza è stata scelta la media delle tre misurazioni.

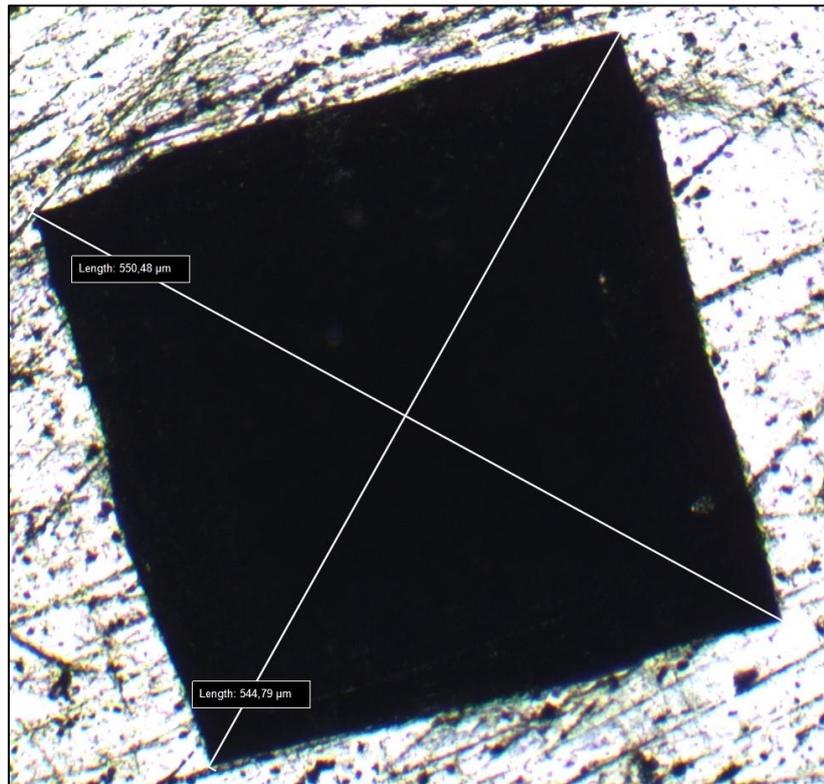


Figura 102: I indentazione

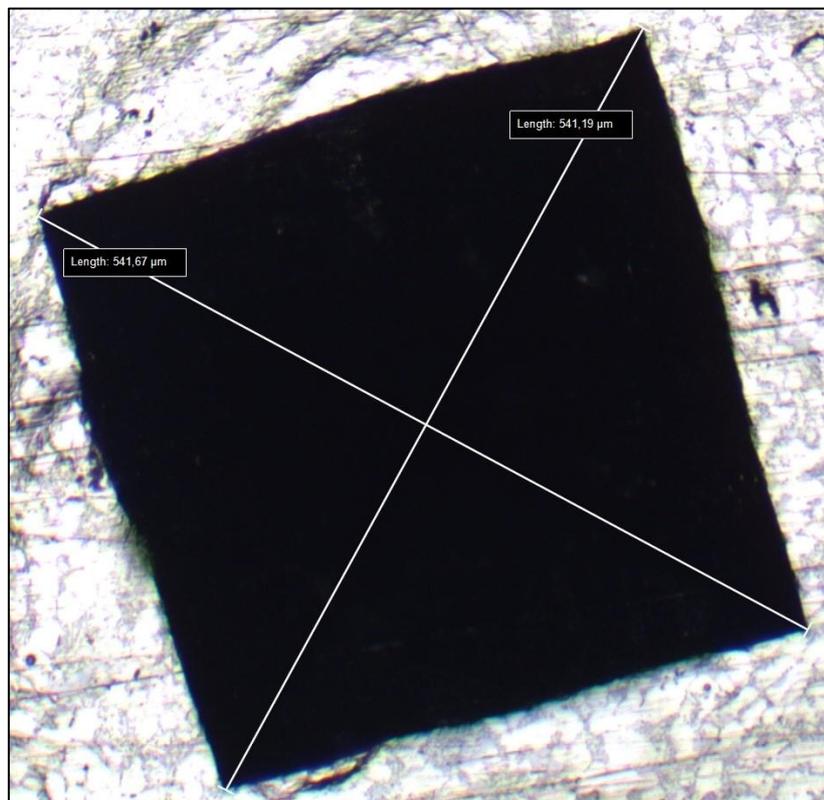


Figura 103: II indentazione

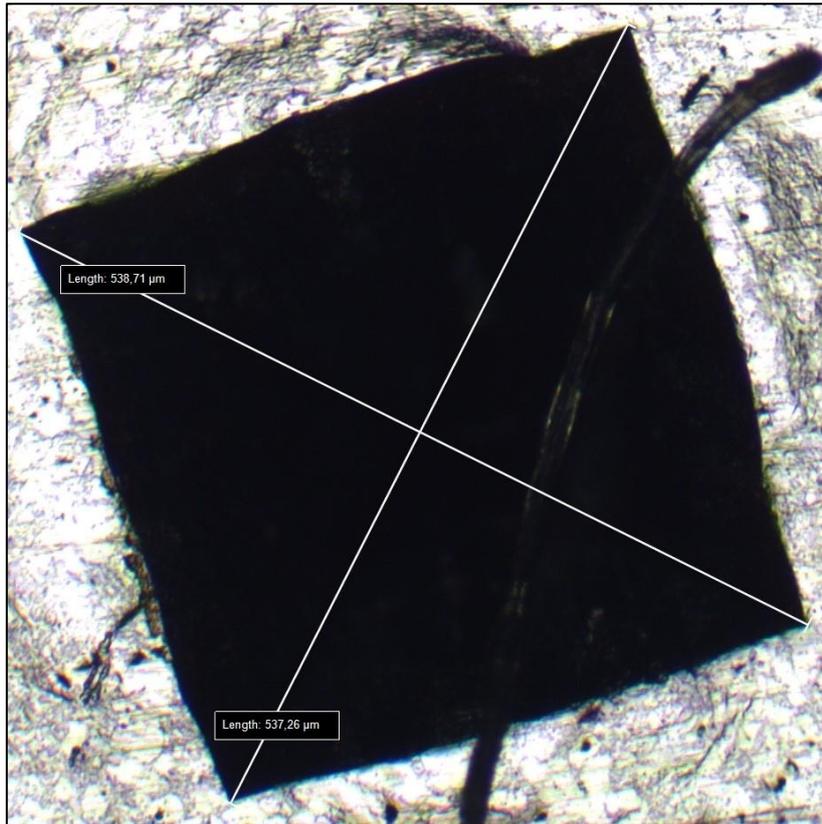


Figura 104: III indentazione

AREA I INDENTAZIONE	0,150 mm ²
AREA II INDENTAZIONE	0,146 mm ²
AREA III INDENTAZIONE	0,145 mm ²
MEDIA DELLE AREE	0,147 mm ²

Tabella 13: Aree delle impronte di indentazione

I seguenti dati calcolati con il microscopio ottico portano ad avere un valore di durezza Vickers HV pari a 252,24.

Cap 8: Conclusioni

I dati sperimentali relativi al trattamento T6 hanno evidenziato risultati ottimali per quanto riguarda la fatica a flessione rotante portando ad un significativo incremento della resistenza a fatica media a 10 milioni di cicli. Il Cu dà il suo contributo al rafforzamento per precipitazione andando a formare θ' (Al₂Cu). Tuttavia questo trattamento che, osservando soltanto i risultati della fatica a flessione rotante, presenta notevoli benefici, se studiato insieme al comportamento a fatica assiale presenta anche delle criticità.

Durante il trattamento T6 oltre ad avere il rafforzamento del Cu si ha anche la crescita dei vuoti, andando a diminuire la sezione trasversale utile del provino e conseguentemente al crollo della resistenza a fatica a 10 milioni di cicli. Infatti, nelle sezioni rotte per fatica assiale si osservano grandi vuoti centrali con dimensioni che arrivano anche fino a 2,8 mm² nel caso più grave.

Nella tabella che segue viene riportata una sintesi dei risultati ottenuti nella sperimentazione sviluppata.

Provini	Resistenza a fatica media a 10 milioni di cicli (MPa)
Provini grezzi (F) II colata a fatica a flessione rotante	117
Provini T6 II colata (solubilizzazione a 480°C) a fatica a flessione rotante	140
Provini T6 II colata (solubilizzazione a 460°C) a fatica a flessione rotante	139
Provini grezzi (F) II colata a fatica assiale	112
Provini T6 II colata (solubilizzazione a 480°C) a fatica a assiale	81
Provini T6 II colata (solubilizzazione a 460°C) a fatica assiale	87

Tabella 14: Resistenza a fatica media a 10 milioni di cicli delle varie tipologie di provini

Alla luce dei risultati conseguiti la differenza tra i due tipi di trattamento T6 (solubilizzazione a 480°C e a 460°C) non è molto significativo in termini di variazione della resistenza a fatica, ma ha benefici sul risparmio energetico dei forni che svolgono i trattamenti termici i quali non possono essere spenti a comando ma devono rimanere accesi anche per lunghi periodi. Una differenza di 20°C può dare contributi di economia energetica rilevanti.

Per i carichi ciclici assiali di trazione, il trattamento T6 non porta nessun beneficio rilevante ed è invece causa di criticità poiché diminuisce la sezione resistente efficace del provino e inoltre favorisce la nucleazione e propagazione delle cricche di fatica a partire dalle cavità espanse alla temperatura di solubilizzazione. Una soluzione che potrebbe aiutare ad eliminare le porosità sarebbe quella di sviluppare un processo produttivo che tolga l'aria dallo stampo prima dell'iniezione del metallo liquido. Purtroppo, questo processo richiederebbe dei costi aggiuntivi che sarebbe conveniente solo in caso di notevoli incrementi delle prestazioni meccaniche.

Bibliografia

- Roberto Doglione, «Rafforzamento per precipitazione, Corso di Materiali per l'industria meccanica A.A.2019/2020».
- Roberto Doglione, «Alluminio da fonderia, Corso di Materiali per l'industria meccanica A.A. 2019/2020».
- Eugenio Brusa, «FATICA NEI MATERIALI, fenomeno e modelli predittivi, Corso di Elementi di Costruzione e Disegno di Macchine 2017/2018».
- ISO 12107, «Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data». 2012.
- ASTM E466, «Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials1». 2015.
- ASTM E468, «Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials1». 2018.
- Roberto Doglione, Paolo Di Geronimo «Effetto sulle caratteristiche tensili e sulla resistenza a fatica di un trattamento T6 innovativo sulla lega AlSi9Cu3(Fe) per pressocolata». 2021.
- Roberto Doglione, Angelo Morano «Trattamenti termici innovativi da svolgere su leghe da fonderia Al-Si-Cu per aumentare la resistenza a fatica e diminuire gli scarti di produzione». 2021
- BS EN 1706-2020, Aluminium and aluminium alloys. Castings. Chemical composition and mechanical properties. 2021.
- ISO 12107, «Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data». 2012.
- S. Viswanathan et al., ASM Handbook, Volume 15: Casting, 2008th edition. Materials Park, Ohio: ASM International, 2008.
- J. Campbell, Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design, 1st ed. Oxford, UK; Waltham, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2011.

- A. S. M. International, *Asm Handbook: Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials (Asm Handbook) VOL. 2*, 10th edition. Materials Park, Ohio: ASM International, 1990.
- R. N. Lumley, R. G. O'Donnell, D. R. Gunasegaram, e M. Givord, «Heat Treatment of High-Pressure Die Castings», *Metall and Mat Trans A*, vol. 38, n. 10, pagg. 2564–2574, set. 2007, doi: 10.1007/s11661-007-9285-4.
- S. Cecchel, A. Panvini, e G. Cornacchia, «Low Solution Temperature Heat Treatment of AlSi9Cu3(Fe) High-Pressure Die-Casting Actual Automotive Components», *J. of Materi Eng and Perform*, vol. 27, n. 8, pagg. 3791–3802, ago. 2018
- R. Doglione, P. Di Geronimo, e A. Morano, «Application of T6 Heat Treatment on the AlSi9Cu3 (Fe) Casting Alloy and the Effect of Copper Content», *American Journal of Applied Sciences*, vol. 12, Issue 1-2021, pag. 7.
- R. N. Lumley et al., «The role of alloy composition in the heat treatment of aluminium high pressure die castings», vol. 26, pag. 10, 2008.
- R. Lumley, I. Polmear, e P. Curtis, «Rapid Heat Treatment of Aluminum High-Pressure Diecastings», *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, vol. 40, pagg. 1716–1726, lug. 2009, doi: 10.1007/s11661-009-9836-y.
- Schenck Maschinenfabrik, «Manuale macchina flessione rotante Schenck».