



**POLITECNICO
DI TORINO**

Corso di Laurea in Mechanical Engineering

Tesi di Laurea Specialistica

Studio dell'effetto di trattamenti chimici superficiali sulle proprietà meccaniche di una lega di alluminio

Relatore

Prof.ssa Ing. Raffaella Sesana

Candidato

Marco Porfido

Aprile 2019



Indice

1 Introduzione	5
2 Obiettivo del lavoro	7
3 Green Etching®	8
4 Studio dei parametri influenti.....	11
4.1 Lega 7075 – T6	11
4.2 Condizioni di Green Etching®	14
4.3 Geometria dei provini	15
5 Misure da verificare	16
5.1 Analisi metallografica 7075-T6.....	17
5.1.1 Attrezzatura utilizzata	17
5.1.2 Procedura utilizzata	20
5.1.3 Risultati	22
5.2 Rugosità 7075-T6.....	29
5.2.1 Attrezzatura utilizzata	29
5.2.2 Procedura utilizzata	30
5.2.3 Risultati	31
5.3 Microdurezza 7075-T6	37
5.3.1 Attrezzatura utilizzata	38
5.3.2 Procedura utilizzata	38
5.3.3 Risultati	39
5.4 Prove di fatica 7075-T6.....	40
5.4.1 Attrezzatura utilizzata	42
5.4.2 Procedura utilizzata	43
5.4.3 Risultati	44



5.5 Prove di trazione 5754-H111 e 6014-T4	55
5.5.1 Attrezzatura utilizzata	56
5.5.2 Procedura utilizzata	57
5.5.3 Risultati	58
6 Discussione	63
7 Conclusione	67
8 Appendice Rugosità.....	69
9 Bibliografia	74
10 Sitografia	75

1. Introduzione

“La nazione che distrugge il proprio suolo distrugge sé stessa”

Franklin Delano Roosevelt

L'impatto ambientale dell'industria europea è migliorato negli ultimi decenni grazie alla regolamentazione ambientale, limitando gli effetti negativi dell'inquinamento dovuti alle attività industriali sulla salute umana e sull'ambiente.

L'intervento è avvenuto tramite: regolamentazioni più severe in materia ambientale, progressi nell'efficienza energetica, una tendenza generale dell'industria europea all'abbandono della produzione pesante, maggiormente inquinante, e la partecipazione delle imprese a schemi volontari allo scopo di ridurre il proprio impatto ambientale.

Nonostante tali miglioramenti, il comparto industriale grava ancora sull'ambiente contribuendo per una quota significativa alle emissioni totali dei principali inquinanti atmosferici e gas a effetto serra, nonché ad altri importanti effetti ambientali, fra cui il rilascio di inquinanti nell'acqua e nel suolo, la produzione di rifiuti ed il consumo di energia.

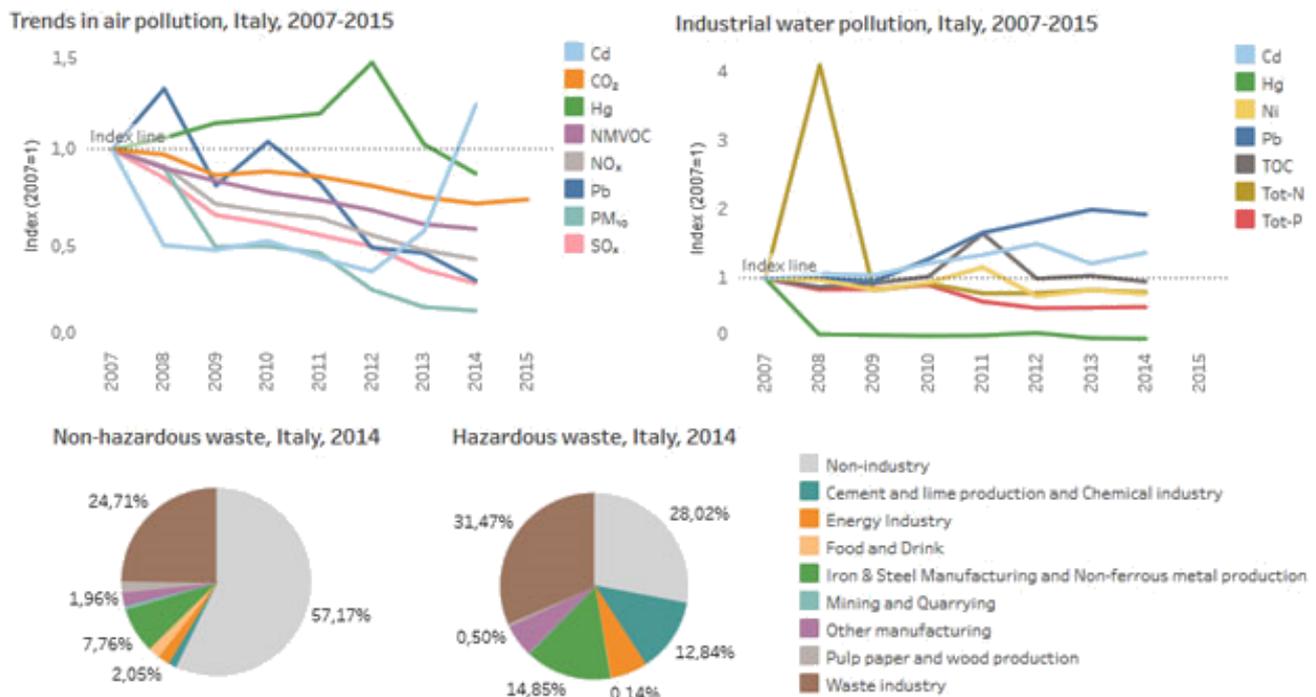


Figura 1: Emissioni industriali (2007-2015), rifiuti industriali pericolosi e non (2014), Italia

La realizzazione e la valutazione delle politiche dell'UE in materia di inquinamento industriale è supportata dall'Agenzia europea dell'ambiente (AEA). L'AEA si occupa inoltre di sostenere lo sviluppo di strategie a lungo termine volte a limitare le ripercussioni del settore sull'ambiente e sulla salute.

Il futuro passaggio verso un settore industriale europeo più ecologico richiede un approccio integrato, che rafforzi il controllo dell'inquinamento alla fonte e fornisca incentivi per cambiare le prassi operative e investire in tecnologie innovative [1].

Quella dell'introduzione di nuove tecnologie è una realtà molto vicina a noi. Nel campo della produzione metalmeccanica un'azienda torinese, la Simet S.r.l., ha sviluppato una nuova tipologia di fresatura chimica nel totale rispetto dell'ambiente.



Figura 2: Logo Simet S.r.l.

Simet S.r.l. propone un nuovo ed innovativo procedimento per il trattamento di componenti in metallo, principalmente in alluminio: il Green Etching®.

La fresatura chimica Green Etching® rappresenta una forma di fresatura che utilizza una metodologia di asportazione non di natura corrosiva ma levigante. Il trattamento, che si realizza mediante bagni chimici basici, non solo non dovrebbe alterare le caratteristiche strutturali dei semilavorati ma, ripulendoli dalle impurità superficiali, ne dovrebbe migliorare anche la resistenza a fatica. La nuova fresatura ideata da Simet rimuove il materiale in modo efficace senza incorrere in rischi di probabili cricche, insiti nelle tecnologie di asportazioni convenzionali. Il risultato è un assottigliamento con conseguente alleggerimento del componente attraverso una riduzione di spessore uniforme ed omogenea. L'effetto estetico, conseguito con il trattamento, Green Etching® non si può ottenere mediante processi di asportazione convenzionali.

Il processo di fresatura chimica Green Etching® è realizzabile su alluminio e acciaio e può essere utilizzato su componenti di qualsiasi dimensione e forma. Consente di raggiungere considerevoli risultati anche in termini economici; i vantaggi si calcolano anche in ragione dell'estetica del componente lavorato, che non necessita di ulteriori lavorazioni di pulitura e levigatura.

Questa nuova lavorazione rappresenta un'alternativa all'utilizzo di materiali "leggeri" quali titanio e fibra di carbonio e trova ideale applicazione nei settori aerospaziale, automotive e ferroviario. Oltre a garantire migliori risultati di asportazione, è più economica ed il processo di lavorazione è ecologico: occorre infatti sottolineare che il Green Etching® opera con un occhio di riguardo all'ambiente sia per quel che concerne lo svolgimento dell'attività lavorativa sia per il risultato che ottiene:

- componenti più sottili quindi veicoli più leggeri e minor consumo di carburante
- minori emissioni inquinanti [2]

In questa tesi è riportata solo una piccola parte del lavoro effettuato nel corso di un progetto durato anni. Un progetto basato sulla collaborazione tra Simet S.r.l. e il Politecnico di Torino, che mette in comunicazione il settore produttivo dell'azienda con il settore di ricerca dell'università torinese. Una collaborazione finalizzata allo sviluppo e al miglioramento della produzione green.

2. Obiettivo del lavoro

Lo scopo di questa ricerca è quello di studiare l'effetto di trattamenti chimici superficiali sulle proprietà meccaniche di una lega di alluminio sottoponendo i campioni forniti dall'azienda a un'analisi approfondita tramite una serie di prove distruttive e non effettuate all'interno del laboratorio Dimeas (dipartimento di ingegneria meccanica e aerospaziale) e Disat (dipartimento di scienza applicata e tecnologia) del Politecnico di Torino.

Il materiale analizzato nella ricerca è la lega di alluminio 7075-T6, in particolare provini a “osso di cane” secondo la normativa ASTM E466-07. Parte di questi provini sono stati sottoposti a Green Etching[®] con due differenti temperature (50°C e 80°C).

Inizialmente si effettua un'analisi superficiale dei provini tramite microscopio ottico Leica Z16 AP0A (115x) e analisi metallografica tramite microscopio ottico Reichert-Jung MeF3 (1000x). Tramite rugosimetro RTP 80 Metrology System e microduremetro Remet HX1000 saranno misurati i valori di rugosità e microdurezza Vickers. Questa analisi iniziale è necessaria per capire quanto il processo di Green Etching[®] va a modificare la superficie del provino.

Successivamente si effettuano le prove di fatica uniassiale ad alto numero di cicli a temperatura ambiente tramite il vibroforo Amsler 10 HFP 422.

Tramite uno studio approfondito della superficie dei provini sarà possibile pronosticare un possibile comportamento a fatica dei diversi provini considerando che la rugosità della superficie influisce sensibilmente sulle caratteristiche meccaniche del provino.

Inoltre, sarà analizzato il comportamento statico di due differenti leghe di alluminio, 5754-H111 e 6014-T4, sottoponendo i provini trattati e non trattati a una serie di prove di trazione tramite il sistema servoidraulico di prova Instron 8801. Dalle prove di trazione saranno estratti i valori di tensione massima e limite elastico.

Infine, i dati ricavati saranno forniti alla Simet S.r.l. per comprendere meglio le variazioni delle proprietà della lega di alluminio 7075-T6, in modo tale da apportare modifiche sul trattamento di Green Etching[®] che permettano di annullare i difetti generati durante il processo e amplificarne i miglioramenti. Proprio questa collaborazione tra il Politecnico di Torino e la Simet S.r.l. permetterà di ottenere un prodotto competitivo dal punto di vista qualitativo, economico ed ecologico.

3. Green Etching[®]

In condizioni normali la corrosione danneggia gravemente il materiale ma può essere utilizzata come un efficiente metodo di modellazione dei materiali chiamato etching o fresatura. Il processo è chiamato anche con nomi differenti come chemical etching o fresatura chimica, chemical machining, chemical milling e wet etching (ASM, 1989; Drozda e Wick, 1989; Cakir, 2001).

La fresatura chimica è un processo di lavorazione non tradizionale nel quale il materiale viene rimosso tramite l'utilizzo di una forte soluzione chimica, chiamata etchant o bagno chimico. Questo è semplicemente un processo di corrosione accelerato e controllato.

La fresatura chimica possiede una lunga storia risalente al 2500 A.C. quando veniva usata per la produzione di gioielli in rame tramite l'acido citrico (C₆H₈O₇) nell'Antico Egitto (Harris, 1976). Negli anni 50 la fresatura chimica è stata accettata come uno dei più importanti metodi di lavorazione non tradizionali. Fu completata industrialmente da M. C. Sanz della North Aviation Inc. nel 1956 quando prese la patente americana (Patente no.: 2,739,047) e chiamò il processo "chemical milling" o "chem-mill" (Sanz, 1956). Le successive applicazioni industriali sono state realizzate da altre aziende aeronautiche (Snyder and Rosenberg, 1961; Tershinand Howells, 1967; Ashcraft, 1969; Gross, 1986; Ranieri e Patel, 1996; Denms, 1996). Oggi questo processo di lavorazione è usato per lavorare lamiere sottili producendo componenti geometricamente complessi e dalle dimensioni accurate. È anche utilizzato per ridurre il peso di componenti come ali di velivoli (ASM, 1989; Drozda and Wick, 1989; Cakir, 2001; Harris, 1976; Dini, 1984; McCallion, 1987) [3].

Inoltre, mediante fresatura chimica si possono produrre piccole cavità, anche di forma complessa, su lamiere, pezzi forgiati o estrusi. La fresatura chimica è stata impiegata su una vasta gamma di metalli e fino a profondità di asportazione di 10-12 mm. Le zone del pezzo che non devono subire asportazione vengono protette mediante mascheratura della superficie o attraverso immersione parziale nel reagente.

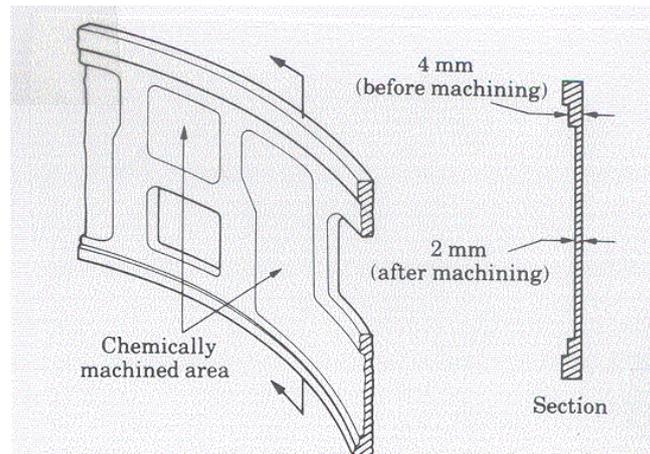


Figura 3: Esempio di campione fresato chimicamente

La sequenza di operazioni tipica della fresatura chimica è descritta di seguito:

- a. se la parte da lavorare è interessata da tensioni residue provocate da precedenti lavorazioni, tali tensioni devono essere rimosse, attraverso un opportuno trattamento termico, prima della fresatura chimica al fine di evitare successive deformazioni
- b. le superfici devono essere accuratamente pulite e sgrassate per assicurare una buona adesione della mascheratura (per la quale spesso si ricorre a materiali resistenti all'attacco chimico) ed una uniforme asportazione
- c. viene applicata la mascheratura. Si utilizzano comunemente nastri adesivi o vernici, ma molto spesso si preferiscono elastomeri (gomma e neoprene) e plastica (polivinile, polietilene, polistirene) per ottenere mascherature più precise ed efficaci
- d. si elimina la mascheratura, incidendola ed asportandola con una lama, nelle zone dove la superficie del pezzo verrà esposta all'attacco chimico.
- e. il pezzo viene immerso nel reagente. Le superfici da lavorare sono così esposte all'azione della soluzione di idrossido di sodio (per leghe di alluminio), acido nitrico o cloridrico (per gli acciai comuni) o cloruro di ferro (per gli acciai inossidabili)
- f. per ottenere una asportazione uniforme è importante controllare la temperatura della soluzione e mantenerla in movimento mediante l'azione di un agitatore
- g. dopo la lavorazione le parti devono essere risciacquate accuratamente per evitare che il reagente chimico residuo continui ad attaccarne la superficie
- h. viene rimossa la mascheratura ed il pezzo può essere ispezionato e controllato dimensionalmente
- i. ulteriori operazioni di finitura possono essere effettuate dove necessario

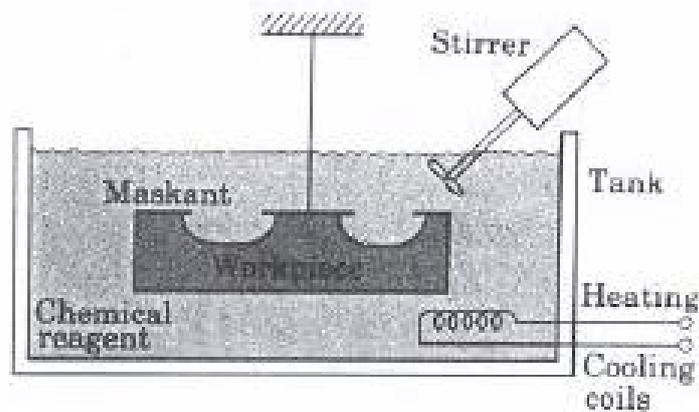


Figura 4: Sistema necessario per il processo di chemical etching

Le operazioni sopra descritte possono essere ripetute per produrre cavità o contorni a più livelli. Talvolta il materiale lavorato può presentare danni dovuti ad un attacco chimico preferenziale o intergranulare. Tali situazioni si verificano, ad esempio, nella lavorazione chimica di strutture saldate o nella lavorazione di getti da fusione. In entrambi i casi le differenze microstrutturali o la presenza di porosità della superficie possono provocare una asportazione non uniforme.

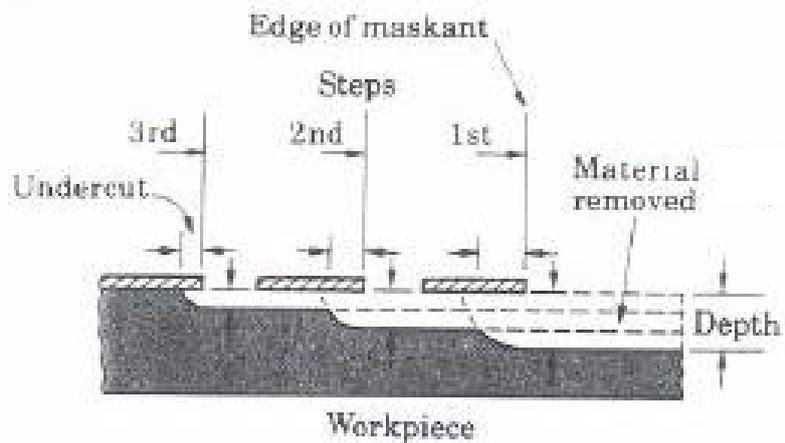


Figura 5: Processo utile alla produzione di contorni a più livelli

Altri processi sfruttano la capacità corrosiva di alcune soluzioni chimiche, un esempio è la tranciatura chimica. La tranciatura chimica differisce dalla tranciatura meccanica delle lamiere metalliche per la modalità di asportazione del materiale dovuta alla dissoluzione chimica invece che alla deformazione plastica. Tipiche applicazioni per questo processo si hanno nella realizzazione di circuiti stampati o nella tranciatura di lamierini sottili che risultano esenti da bave di lavorazione.

In fine è necessario fare alcune considerazioni tecnologiche e progettuali sul processo di chemical etching:

- a causa delle modalità di lavorazione, ed in particolare per l'attacco generalizzato del reagente a tutte le superfici esposte, devono essere evitate geometrie che prevedono angoli molto acuti, rilievi molto pronunciati, cavità profonde e sottili, conicità molto precise
- presentano difficoltà di lavorazione pezzi dalla superficie porosa o fortemente irregolare
- si deve inoltre tenere presente che il reagente attacca il materiale sia in direzione orizzontale che in verticale asportando materiale anche sotto la zona protetta
- questi processi sono caratterizzati da un tasso di rimozione (MRR - Material Removal Rate) piuttosto basso. Per tale motivo vengono spesso utilizzati a completamento di lavorazioni effettuate con processi, tradizionali o innovativi, a più elevata produttività [4]

Come detto in precedenza il trattamento utilizzato sui provini analizzati all'interno di questa ricerca è una particolare tipologia di fresatura chimica sviluppata e brevettata dalla Simet S.r.l. di Torino, il Green Etching®. Come si può constatare dal nome stesso il processo rispetta l'ambiente e permette di ottenere risulti tecnologici e progettuali significativi a costi competitivi.

4. Studio dei parametri influenti

All'interno di questa ricerca i parametri influenti sono principalmente due:

- Caratteristiche della lega di alluminio 7075 - T6
- Condizioni del trattamento di Green Etching®

4.1 Lega AA 7075 – T6

La lega analizzata all'interno di questa ricerca è una lega di alluminio 7075 sottoposta ad un trattamento T6.

La lega di alluminio 7075 è una lega Al-Zn-Mg-Cu della serie 7000.

Zn	Mg	Cu	Mn	Ti	Cr	Si	Fe	Al
5.23	2.1	1.45	0.3	0.16	0.23	0.22	0.22	Bal.

Tabella 1: Composizione chimica della lega di Alluminio 7075 (frazione in massa, %)

La serie 7xxx delle leghe di alluminio permette un vasto utilizzo come materiale strutturale grazie alle sue interessanti proprietà, come ad esempio una bassa densità, elevata resistenza meccanica, duttilità, durezza superficiale e resistenza a fatica. La lega di alluminio 7075 è una delle più importanti leghe usate nel campo ingegneristico.

La lega 7075 è stata sviluppata più di 70 anni fa. Tuttavia, sono state effettuate molte ricerche nell'ultimo decennio. Le sue notevoli proprietà come l'elevata resistenza meccanica e il ridotto peso permettono l'utilizzo di questa lega all'interno del settore dei trasporti per combattere il serio problema del surriscaldamento globale.

È tipicamente prodotta tramite un processo di deformazione plastica che attribuisce una elevata resistenza meccanica. Tuttavia, il costo di questo processo è molto alto comparato al processo alternativo di colata. Ciò nonostante, gli svantaggi di un processo di colata convenzionale sono visibili nella struttura della lega con la presenza di difetti come porosità e cavità, che provocano una riduzione della resistenza meccanica.

La lega 7075 analizzata in questa ricerca è una lega ottenuta per deformazione plastica.

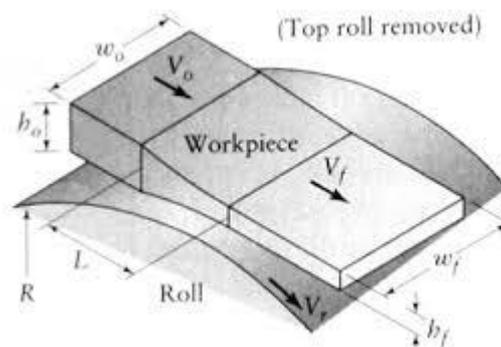


Figura 6: Processo di laminazione

Dal processo di laminazione si ottengono due lamiere di spessore 4 e 3 mm successivamente sottoposte a trattamento T6.

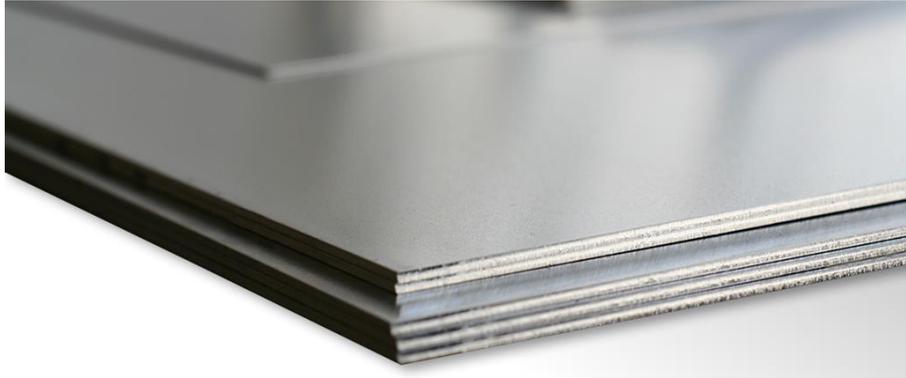


Figura 7: Lamiera in AA 7075

Tramite taglio laser dalle lamiere si ottengono provini di spessore 4 e 3 mm.



Figura 8: Taglio tramite laser di lamiera

I provini di 4 mm saranno successivamente sottoposti al trattamento di Green Etching[®] per una riduzione di spessore di 1 mm.

La lega 7075 è utilizzata nella costruzione di velivoli grazie al suo elevato rapporto resistenza meccanica – densità. È estremamente utile per ridurre il peso e il costo nelle applicazioni strutturali. Inoltre, la sua ottima duttilità è necessaria per la formabilità della lega. Tuttavia, il miglioramento della resistenza meccanica del materiale mantenendo una ragionevole duttilità è una sfida costante [5].

La lega di alluminio 7075 è una lega Al-Zn-Mg-Cu trattabile termicamente. Infatti, a causa dei precipitati per invecchiamento, il trattamento termico T6 è un processo alquanto comune per migliorare le proprietà meccaniche della lega. Il trattamento termico in soluzione influenza la composizione, morfologia e distribuzione della seconda fase, generando un cambiamento nelle proprietà meccaniche della lega. Ciò nonostante, la distribuzione e la grandezza del precipitato dipende significativamente dalla tipologia di soluzione del trattamento termico. Dunque, scegliere le condizioni di processo più appropriate è molto importante per ottenere un significativo aumento delle proprietà meccaniche della lega. L'evoluzione della microstruttura ha un effetto diretto sulle proprietà meccaniche della lega durante il trattamento termico in soluzione.

Il trattamento termico T6 si effettua in un range di temperatura di 465-490 °C con successivo invecchiamento artificiale alla temperatura di 120 °C [6]. In aggiunta al trattamento T6 si dovrà

considerare un ulteriore invecchiamento naturale dovuto al fatto che è passato del tempo, a noi sconosciuto, tra la fine del processo di produzione e l'inizio del trattamento di Green Etching®.

Aging state	Process
T6	Solution-treatment at 470 °C for 1 h, quenching in cold water, and aging at 120 °C for 24 h

Tabella 2: Trattamento termico T6 applicato alla lega di alluminio 7075

Aging state	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa
T6	559.8	504.4

Tabella 3: Resistenza meccanica della lega di alluminio 7075 sottoposta a trattamento termico T6 [7]

4.2 Condizioni di Green Etching[®]

Le condizioni che caratterizzano il processo di Green Etching[®] sono:

- soluzione chimica
- durata di bagno
- temperatura di bagno

All'interno della ricerca non sarà menzionata la composizione della soluzione chimica utilizzata nel trattamento chimico in quanto protetta da segreto aziendale.

La temperatura di bagno è nota. Il Green Etching[®] è stato effettuato a due differenti temperature, 50 °C e 80 °C.

La durata di bagno invece non è misurata in quanto il processo viene terminato nel momento in cui lo spessore del provino si è ridotto di 1 mm passando da 4 a 3 mm. Comunque, alla temperatura di 50 °C il trattamento di riduzione di spessore ha una durata maggiore rispetto alla temperatura di 80 °C. L'asportazione di materiale è più efficace a temperature più elevate in quanto si facilita il processo corrosivo.

Considerando le precedenti condizioni è possibile denominare i provini nel seguente modo.

Lega di alluminio 7075-T6		
Non trattati	Trattati con GE 50°C	Trattati con GE 80°C
7075_NT	7075_GE50	7075_GE80

Tabella 4: Denominazione provini

4.3 Geometria dei provini

I provini utilizzati nelle prove di fatica uniassiale sono a “osso di cane” secondo la normativa ASTM E466-07.

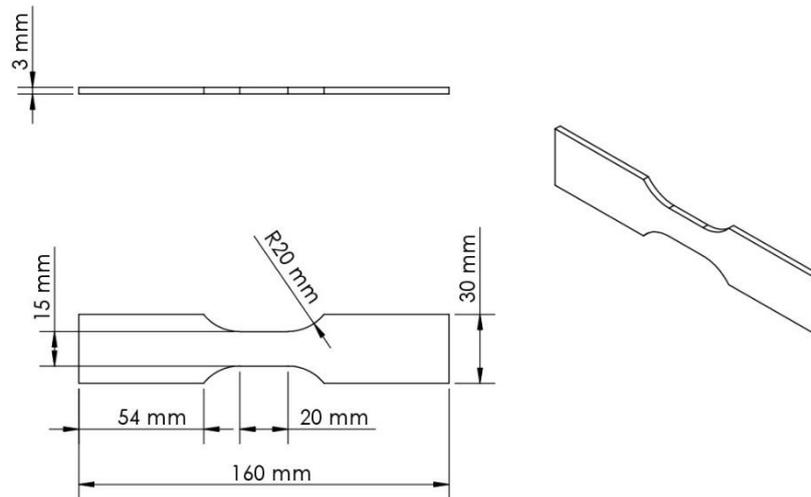


Figura 9: Disegno del provino quotato

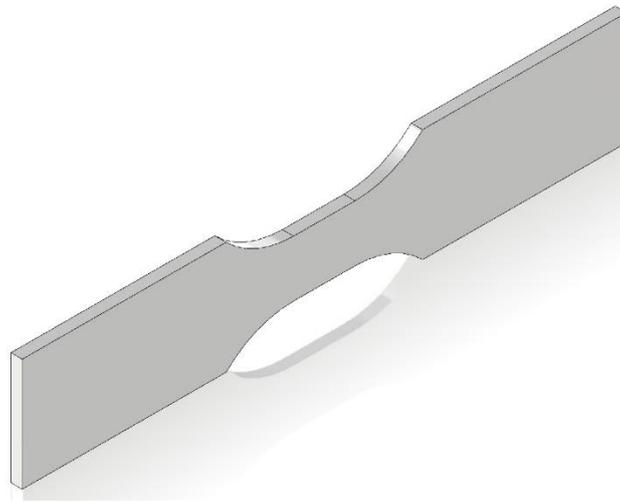


Figura 10: Disegno tridimensionale del provino

5. Misure da verificare

Come scritto in precedenza lo scopo di questa ricerca è quello di studiare l'effetto del trattamento chimico superficiale Green Etching[®] sulle proprietà meccaniche della lega di alluminio 7075-T6. Per fare questo saranno necessarie una serie di analisi del materiale prima e dopo il trattamento chimico. Ci soffermeremo su:

- analisi metallografica
- misura della rugosità
- misura della microdurezza superficiale
- analisi del comportamento a fatica uniassiale ad elevato numero di cicli
- analisi del comportamento meccanico di altre leghe di alluminio

In questo modo sarà possibile constatare se effettivamente il trattamento chimico superficiale migliora le proprietà meccaniche della lega.

5.1 Analisi metallografica 7075-T6

La metallografia è la branca della scienza che studia la costituzione e la struttura di metalli e leghe, come i diversi processi li modificano influenzandone le proprietà e i comportamenti. L'applicazione originaria di questa scienza era limitata dalla risoluzione del microscopio a luce riflessa usato per lo studio del campione. Le tecniche ottiche convenzionali sono tutt'ora largamente utilizzate e sono capaci di estrapolare informazioni utili alla soluzione di svariati problemi [8].

L'analisi metallografica è stata effettuata sulla superficie del campione di lega di alluminio 7075-T6 non trattato e sul campione trattato tramite Green Etching[®] ad una temperatura di 80 °C. Lo scopo dello studio è quello di capire se il trattamento chimico genera delle variazioni di struttura della lega e nel caso affermativo capire se queste variazioni sono presenti solo sulla superficie trattata o anche all'interno del campione.

5.1.1 Attrezzatura utilizzata

Il campione prima dell'analisi necessita di una preparazione eseguita tramite una serie di macchinari presenti nel laboratorio Disat del Politecnico di Torino:

- troncatrice metallografica Remet TR80 Evolution
- pressa inglobatrice Leco PR-36
- lucidatrice Remet LS250
- microscopio ottico Leica Z16 AP0A
- microscopio ottico Reichert-Jung MeF3

La troncatrice metallografica Remet TR80 Evolution consente il prelievo di campioni ridotti, più facili da analizzare, su pezzi di qualsiasi forma nel pieno rispetto delle regole metallografiche. La troncatrice è dotata di una fresa per il taglio e un sistema di raffreddamento che non modifica le caratteristiche della lega stessa durante la troncatura. Comprende una morsa utile al bloccaggio del campione, uno schermo protettivo e una leva per il movimento della fresa [9].



Figura 11: Troncatrice metallografica Remet TR80 Evolution

La pressa inglobatrice Leco PR-36 permette di inglobare il campione all'interno di un cilindretto composto da polvere di bachelite nera compressa ad una determinata pressione e temperatura. La macchina è costituita da una pressa apribile tramite una manopola e da uno schermo digitale sul quale selezionare i parametri del processo di inglobatura. Il cilindretto inglobante permette una più facile lucidatura e analisi metallografica [10].



Figura 12: Pressa inglobatrice Leco PR-36

La lucidatrice Remet LS250 è fondamentale per la preparazione completa dei provini metallografici dalla levigatura con carte abrasive alla lucidatura finale. La lucidatrice è composta da una base cilindrica sulla quale si posiziona la carta abrasiva o il panno, la lucidatura avviene poggiando il campione sulla carta o sul panno in rotazione. Un sistema idraulico permette di bagnare la carta abrasiva o il panno rispettivamente con acqua o alcool durante la lucidatura [11].

Sono state utilizzate carte abrasive con grana P60, P120, P250, P500, P1000, P2000, P4000 e panni diamantati da 9 μ m, 3 μ m e 1 μ m.



Figura 13: Lucidatrice Remet LS250

Il microscopio ottico Leica Z16 AP0A, supportato dalla fotocamera Leica MC170 HD, dal sistema di controllo Leica SmartTouch e dal LED5000 RL permette di scattare immagini della superficie del campione con un ingrandimento 115x [12].

Il microscopio è affiancato dal programma di controllo e di acquisizione LAS (Leica Application Suite).



Figura 14: Microscopio ottico Leica Z16 AP0A

Il microscopio ottico Reichert-Jung MeF3 viene utilizzato per l'analisi metallografica. Permette di scattare immagini della superficie del campione con un ingrandimento 1000x [13].

Il microscopio è affiancato dal programma di acquisizione IC Captur (Image Control).



Figura 15: Microscopio ottico Reichert-Jung MeF3

5.1.2 Procedura utilizzata

L'analisi metallografica di materiali non ferrosi come la lega di alluminio viene effettuata secondo la normativa UNI 3250. La preparazione del campione avviene attraverso una serie di lavorazioni.

La prima è quella di troncatura, suddivisa nei seguenti passaggi:

- a. accensione troncatrice metallografica
- b. apertura della valvola di alimentazione dell'acqua
- c. fissaggio del campione tramite la morsa
- d. chiusura dello schermo protettivo
- e. avviamento rotazione della fresa
- f. troncatura del campione

Una volta troncato il campione è necessario limarlo sui bordi per eliminare possibili sbavature.

Adesso sarà possibile passare alla fase di inglobatura:

- g. accensione della pressa inglobatrice
- h. apertura della valvola di alimentazione dell'acqua
- i. posizionamento del campione all'interno della forma (utilizzo di apposite molle in plastica per fissare il campione in posizione verticale con la superficie interessata rivolta verso il basso)
- j. riempimento della forma con la resina
- k. chiusura della pressa
- l. settaggio della pressa
- m. avviamento del processo

Il processo di inglobatura viene effettuato ad una temperatura di 140 °C, una pressione di 4500 psi e per una durata di 15 minuti. Il risultato finale è un cilindretto di resina contenente al suo interno il campione utilizzato.

La successiva fase di preparazione corrisponde a quella di lucidatura:

- n. posizionamento della carta abrasiva sulla base rotante della lucidatrice
- o. accensione della lucidatrice
- p. apertura getto d'acqua o d'alcol
- q. avviamento della rotazione della base
- r. lucidatura della superficie del campione

La precedente procedura si ripete più volte, passando da una carta abrasiva con grana P60 ad una P4000 (da una grossolana ad una più fine) e ruotando il campione di 90° ad ogni cambio di carta. Successivamente si utilizzano i panni diamantati da 9µm, 3µm e 1µm. Alla fine della lucidatura si dovrebbe ottenere una superficie completamente lucida priva di tagli o imperfezioni visibili ad occhio nudo.

Durante la fase di lucidatura è utile controllare la qualità della superficie del campione in modo tale da capire se la lavorazione sta procedendo correttamente tramite il microscopio ottico.

L'ultima fase di preparazione del campione è il bagno in soluzione Keller.

Soluzione Keller (% vol.)			
HF	HCl	HNO₃	H₂O
2	3	5	190

Tabella 5: Composizione chimica della soluzione Keller

Entrambi i campioni sono immersi in soluzione per 30 secondi. Successivamente sono posti sotto un getto d'acqua e bagnati con alcol etilico. Infine, sono asciugati tamponando la superficie per evitare la produzione di righe.

5.1.3 Risultati

Immagine a basso ingrandimento

Le immagini seguenti consistono in una serie di scatti della superficie esterna non lucidata dei diversi provini. Le immagini sono state acquisite tramite il microscopio Leica Z16 AP0A ad un ingrandimento massimo di 115x. Il provino è stato posizionato nel seguente modo ed è stata analizzata la zona centrale della sezione ristretta, dove si dovrebbe generare la frattura durante la prova di fatica.

In azzurro è rappresentata la base su cui poggia il provino. In rosso la zona di interesse fotografata dal microscopio.

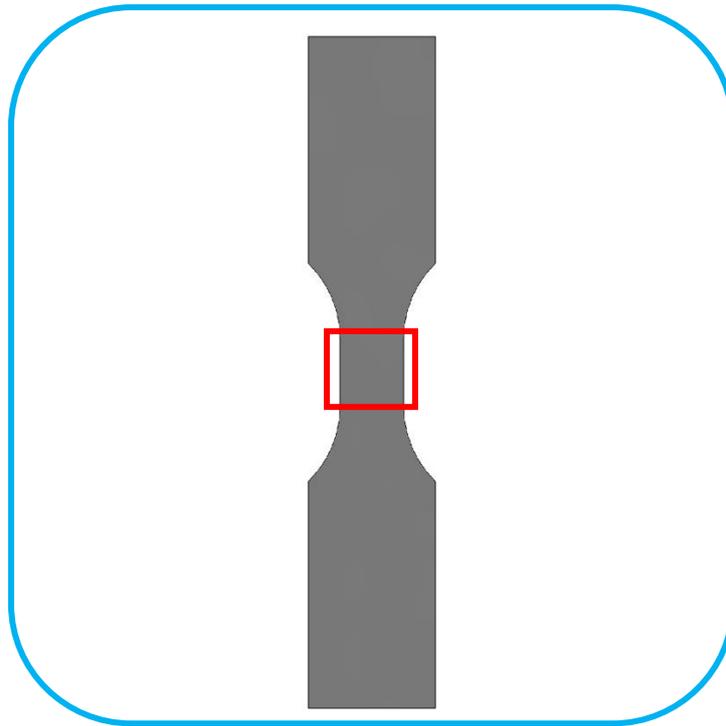


Figura 16: Posizionamento del provino e zona interessata dell'analisi superficiale

Provini 7075-T6 non trattati

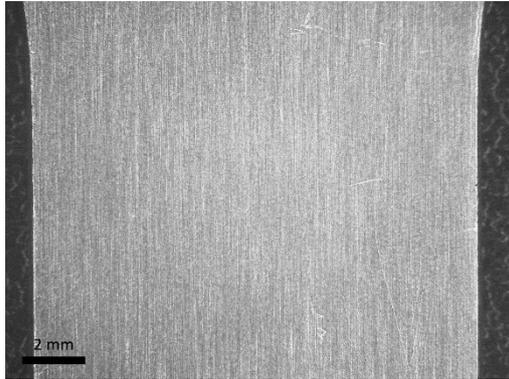


Figura 17: 7075_NT (7,5x)

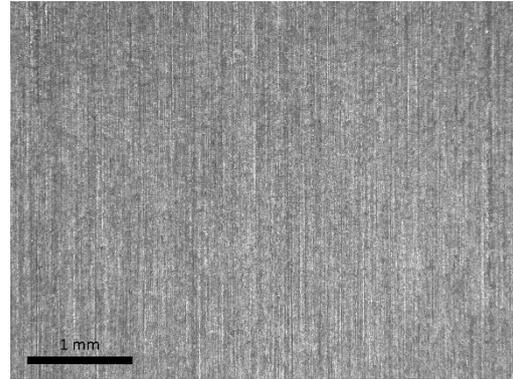


Figura 18: 7075_NT (25x)

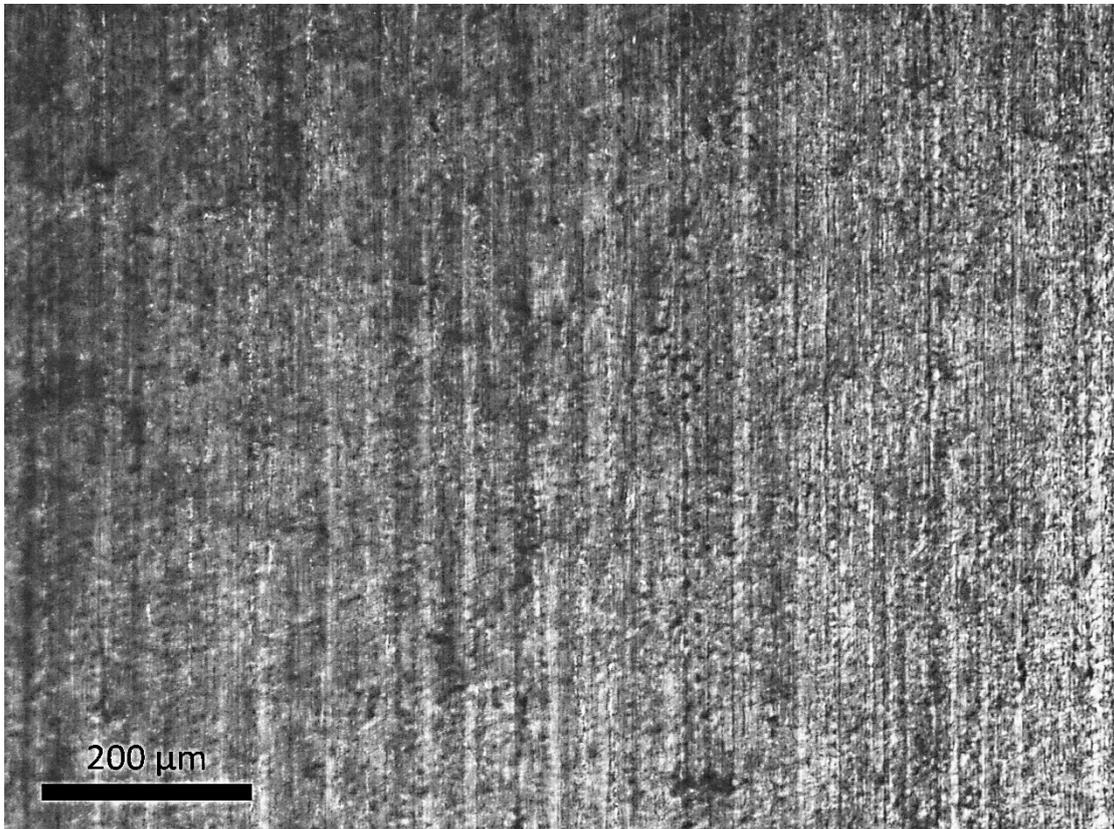


Figura 19: 7075_NT (115x)

Provini 7075-T6 trattati con Green Etching® a 50 °C

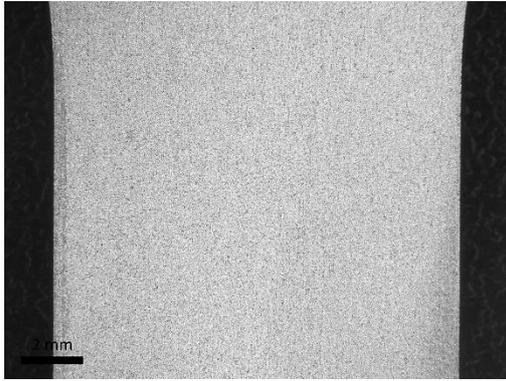


Figura 20: 7075_GE50 (7,5x)

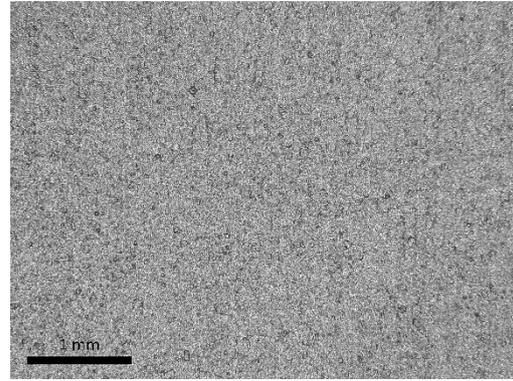


Figura 21: 7075_GE50 (25x)

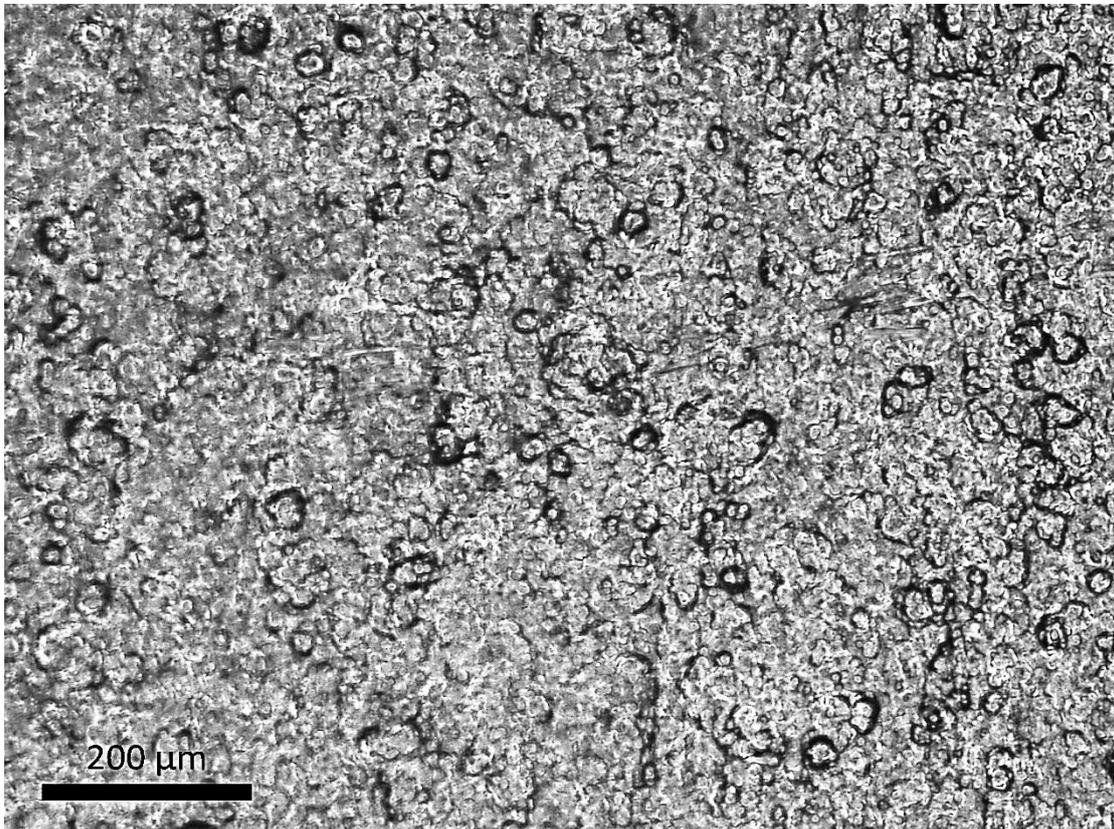


Figura 22: 7075_GE50 (115x)

Provini 7075-T6 trattati con Green Etching[®] a 80 °C

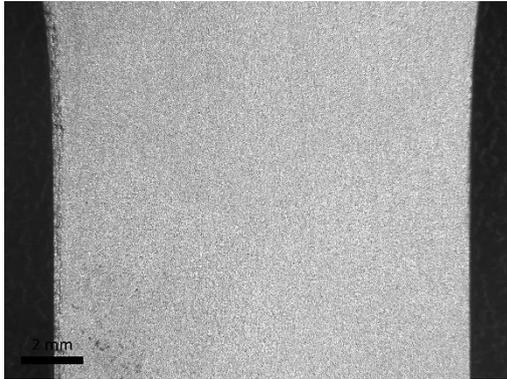


Figura 23: 7075_GE80 (7,5x)

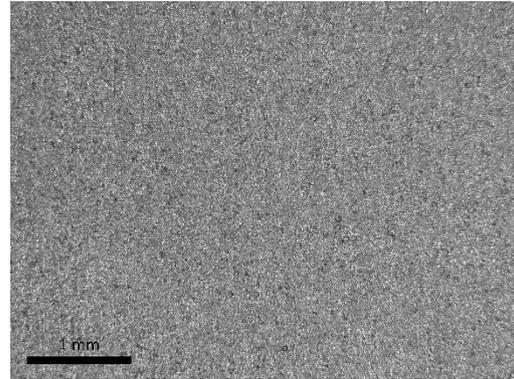


Figura 24: 7075_GE80 (25x)

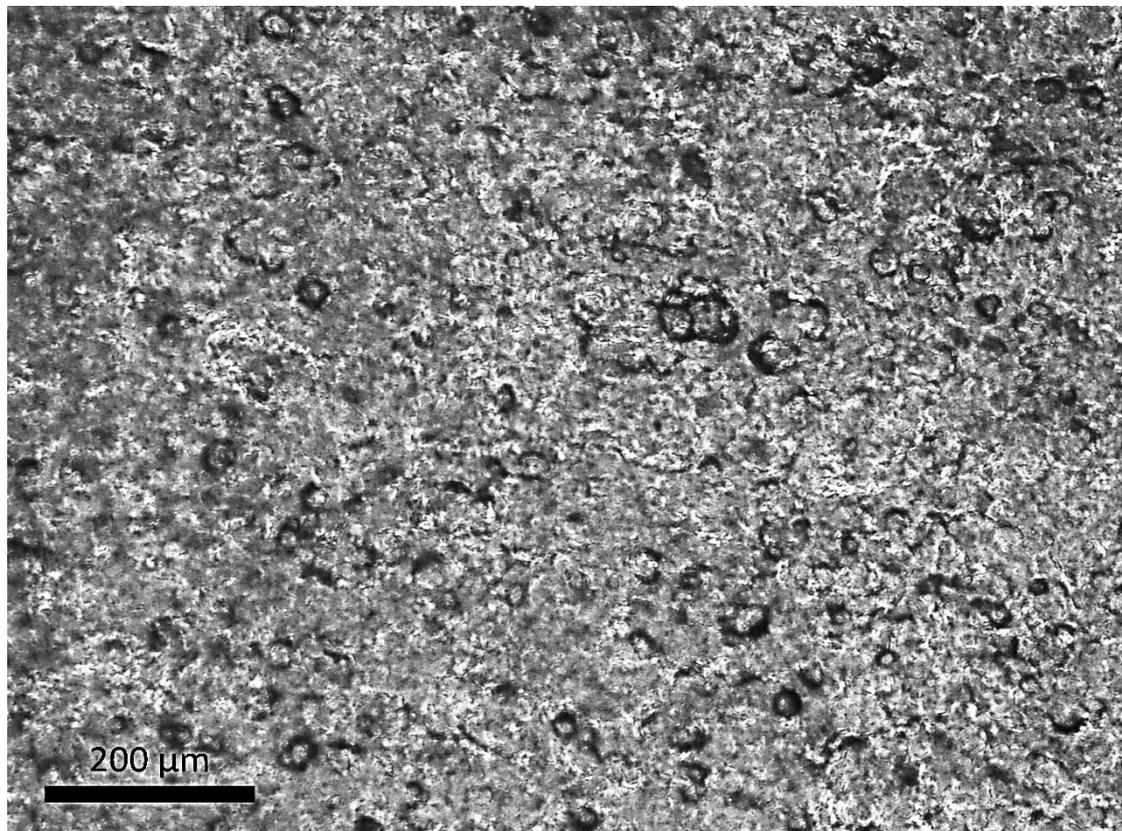


Figura 25: 7075_GE80 (115x)

Immagini ad alto ingrandimento

Le immagini seguenti sono una serie di scatti della superficie interna lucidata dei campioni estratti tramite troncatura da due diversi provini, uno non trattato chimicamente e uno sottoposto a Green Etching[®] a 80 °C. Le immagini sono state acquisite tramite il microscopio ottico Reichert-Jung MeF3 ad un ingrandimento massimo di 1000x. Il campione è stato sottoposto ad inglobatura in modo tale da poter osservare facilmente la superficie interna del provino e capire quanto il trattamento chimico modifica la struttura metallografica.

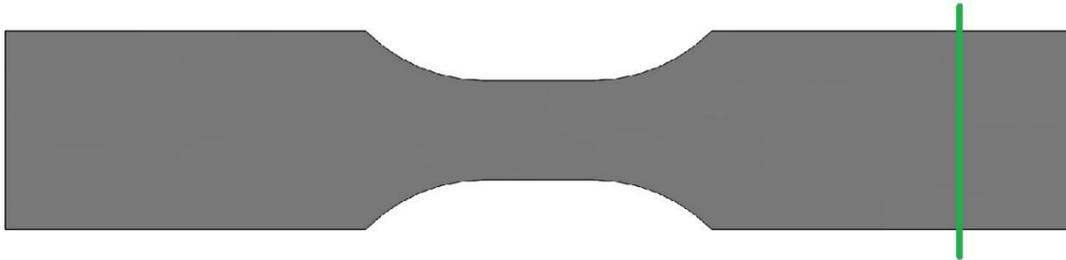


Figura 26: Direzione di taglio della troncatrice



Figura 27: Superficie analizzata

Provini 7075-T6 non trattati

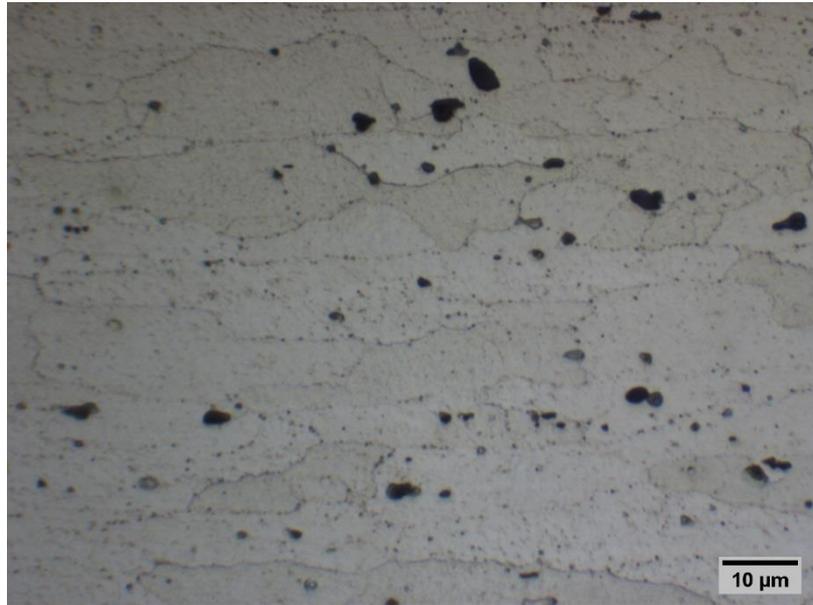


Figura 28: 7075_NT (1000x)

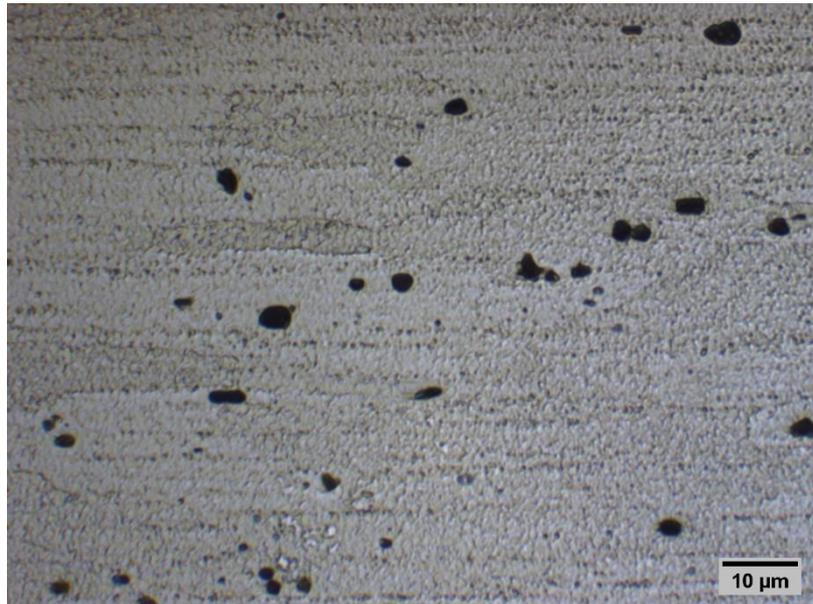


Figura 29: 7075_NT (1000x)

Provini 7075-T6 trattati con Green Etching[®] a 80 °C

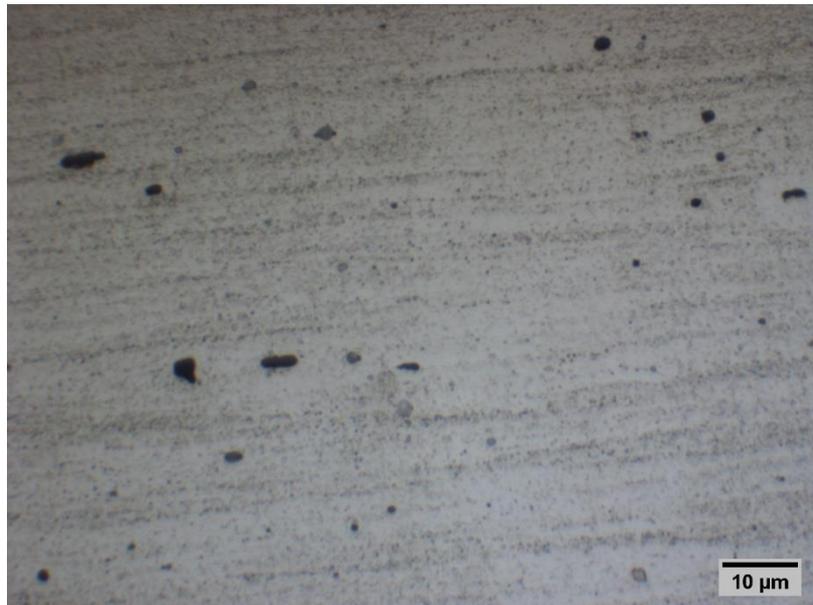


Figura 30: 7075_GE80 (1000x)

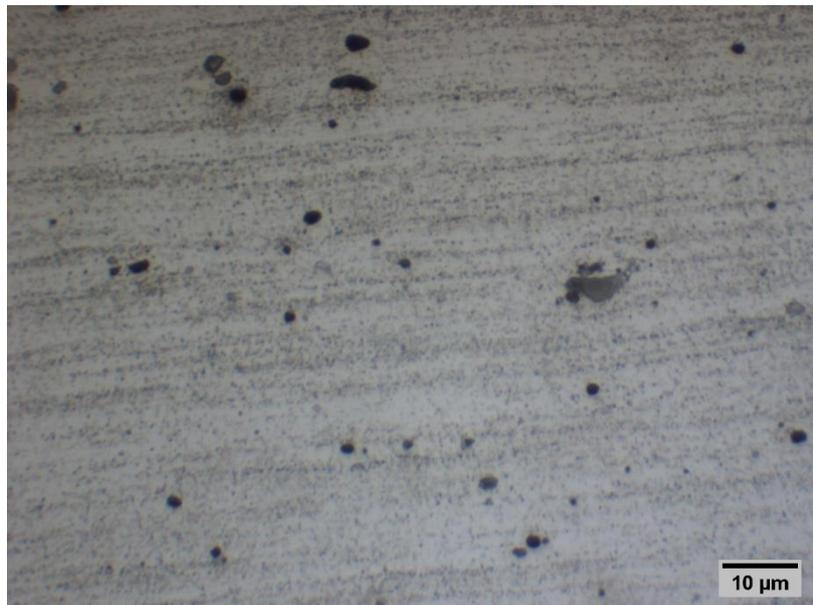


Figura 31: 7075_GE80 (1000x)

5.2 Rugosità 7075-T6

5.2.1 Attrezzatura utilizzata

Per la misurazione della rugosità dei campioni è stato utilizzato il rugosimetro RTP 80 Metrology System presente all'interno del laboratorio Dimeas del Politecnico di Torino.

Il rugosimetro è uno strumento capace di misurare e valutare le microirregolarità di una superficie. Lo strumento è dotato di un braccio meccanico alla quale estremità è posizionato uno stilo di diamante [14].



Figura 32: Rugosimetro RTP 80 Metrology System

Il rugosimetro è affiancato da un display con il quale è possibile effettuare una taratura dello strumento e visualizzare i dati di rugosità acquisiti.

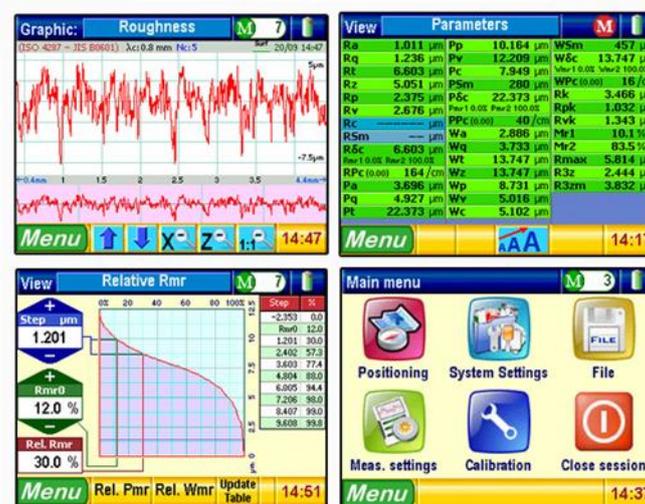


Figura 33: Schermata di acquisizione dati

5.2.2 Procedura utilizzata

Procedura acquisizione dati

La procedura di acquisizione dati è anticipata dalla preparazione del banco di prova.

I passaggi necessari per la preparazione del banco di prova sono:

- a. accensione rugosimetro
- b. calibrazione dello strumento
- c. impostazione cut-off: 0,8 mm
- d. impostazione numero di cut-off: 5
- e. impostazione velocità di acquisizione: 0,5 mm/s

Effettuati i precedenti passaggi sarà possibile effettuare il posizionamento del campione sul banco di prova. Lo strumento presenta una base d'appoggio metallica.

I passaggi utili all'avvio della procedura di misurazione sono:

- f. controllo della superficie del provino
- g. fissaggio del campione sulla base
- h. posizionamento della base
- i. posizionamento dello stilo
- j. avvio della prova di misurazione

I valori di rugosità ottenuti dalla misurazione sono stati salvati in formato Excel per una successiva elaborazione.

Procedura di elaborazione dati

La procedura di elaborazione dati si svolge utilizzando un foglio di lavoro Excel all'interno del quale saranno salvati i valori di R_a , R_q , R_t , R_z , R_{sk} , R_{ku} e R_{Sm} . Vengono misurate le rugosità di 10 provini per ogni tipo. Per ogni provino sono effettuate 4 diverse misure. Successivamente verrà calcolato un valore medio in modo tale da avere un unico valore rappresentativo della rugosità per il materiale non trattato e per le due configurazioni di Green Etching[®]. Con i dati ottenuti si costruisce un grafico che li rappresenti.

5.2.3 Risultati

La rugosità è stata misurata in 4 punti di ognuno dei 10 provini per tipo. Le 4 misure sono state effettuate procedendo in 2 direzioni tra loro perpendicolari. Le misure “a” e “b” con direzione parallela alla direzione del carico della prova di fatica. Le misure “c” e “d” con direzione perpendicolare.

I valori forniti dal rugosimetro sono Ra, Rq, Rt, Rz, Rsk, Rku e RSm.

È stata calcolata la media e la deviazione dei valori per ogni gruppo di provini.

Sono riportate di seguito le tabelle con i relativi risultati e i grafici rappresentativi.

			Ra	Rq	Rt	Rz	Rsk	Rku	RSm
			(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(-)	(-)	(μm)
7075 NT	a b	media	0,108	0,137	1,023	0,719	-0,085	3,132	57,900
		deviazione	0,019	0,024	0,248	0,124	0,111	0,423	9,514
	c d	media	0,208	0,262	1,693	1,324	-0,241	3,323	41,400
		deviazione	0,033	0,044	0,529	0,225	0,156	0,871	3,119

Tabella 6: Rugosità media e deviazione dei provini 7075-T6 non trattati

			Ra	Rq	Rt	Rz	Rsk	Rku	RSm
			(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(-)	(-)	(μm)
7075 50°C	a b	media	1,370	1,726	11,101	8,505	-0,043	3,136	91,450
		deviazione	0,132	0,169	1,971	0,906	0,153	0,377	7,373
	c d	media	1,536	1,921	11,922	9,432	-0,116	3,118	96,100
		deviazione	0,133	0,151	1,249	0,754	0,093	0,356	12,756

Tabella 7: Rugosità media e deviazione dei provini 7075-T6 trattati con Green Etching® a 50 °C

			Ra	Rq	Rt	Rz	Rsk	Rku	RSm
			(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(-)	(-)	(μm)
7075 80°C	a b	media	1,222	1,531	9,264	10,341	-0,093	2,943	100,400
		deviazione	0,083	0,107	1,077	13,151	0,093	0,318	12,420
	c d	media	1,375	1,737	11,176	8,610	-0,111	3,132	97,900
		deviazione	0,101	0,132	1,642	0,881	0,104	0,242	16,717

Tabella 8: Rugosità media e deviazione dei provini 7075-T6 trattati con Green Etching® a 80 °C

Provini 7075-T6 non trattati

			Ra	Rq	Rt	Rz	Rsk	Rku	RSm
			(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(-)	(-)	(μm)
7075 Non Trattati	1	a	0,083	0,108	1,005	0,657	0,141	3,02	52
		b	0,118	0,147	0,941	0,704	-0,159	3,336	77
	2	a	0,135	0,168	1,036	0,806	-0,103	2,642	54
		b	0,101	0,124	0,786	0,604	-0,014	3,015	66
	3	a	0,132	0,173	1,582	1,048	-0,201	3,016	73
		b	0,138	0,171	1,063	0,837	0,101	3,787	67
	4	a	0,102	0,132	1,369	0,725	-0,151	3,289	66
		b	0,123	0,152	1,046	0,757	0,029	2,946	60
	5	a	0,104	0,13	0,814	0,658	-0,145	2,712	46
		b	0,086	0,107	0,672	0,557	-0,035	2,731	48
	6	a	0,115	0,146	1,247	0,747	-0,035	3,163	51
		b	0,123	0,156	1,011	0,775	-0,156	3,1	57
	7	a	0,084	0,106	0,711	0,546	-0,065	2,933	50
		b	0,133	0,167	1,242	0,87	-0,091	2,988	62
	8	a	0,105	0,133	1,03	0,691	-0,117	2,888	59
		b	0,121	0,152	0,937	0,747	-0,192	2,758	61
	9	a	0,096	0,126	1,092	0,687	-0,071	3,992	54
		b	0,082	0,102	0,68	0,562	-0,236	2,836	40
	10	a	0,083	0,107	0,812	0,582	-0,27	3,29	49
		b	0,103	0,131	1,388	0,817	0,073	4,197	66
1	c	0,241	0,299	1,782	1,498	-0,586	3,464	40	
	d	0,234	0,289	1,642	1,41	-0,574	4,502	38	
2	c	0,229	0,318	3,644	1,592	-0,251	3,939	41	
	d	0,167	0,207	1,166	1,01	-0,3	3,366	39	
3	c	0,22	0,275	1,732	1,45	-0,083	2,563	44	
	d	0,218	0,276	1,68	1,42	-0,182	3,016	43	
4	c	0,235	0,296	1,902	1,522	-0,099	3,056	42	
	d	0,239	0,309	2,003	1,636	-0,312	6,441	46	
5	c	0,169	0,211	1,266	1,095	-0,08	2,677	38	
	d	0,174	0,222	1,431	1,163	-0,284	3,367	44	
6	c	0,224	0,282	1,938	1,515	-0,227	3,171	39	
	d	0,239	0,307	1,849	1,568	-0,355	3,676	39	
7	c	0,22	0,271	1,643	1,337	-0,308	2,917	41	
	d	0,225	0,284	1,758	1,378	-0,146	3,174	38	
8	c	0,223	0,28	1,541	1,352	-0,141	3,076	37	
	d	0,249	0,308	1,708	1,472	-0,298	2,911	43	
9	c	0,168	0,207	1,406	1,059	-0,289	2,859	41	
	d	0,168	0,205	1,256	1,009	-0,173	2,707	45	
10	c	0,172	0,212	1,439	1,09	0,076	2,796	49	
	d	0,147	0,183	1,079	0,911	-0,207	2,784	41	

Tabella 9: Rugosità dei provini 7075-T6 non trattati

Provini 7075-T6 trattati con Green Etching® a 50 °C

			Ra	Rq	Rt	Rz	Rsk	Rku	RSm
			(µm)	(µm)	(µm)	(µm)	(-)	(-)	(µm)
7075 Trattati 50°C	1	a	1,474	1,808	11,052	8,419	-0,139	2,602	102
		b	1,539	1,966	15,351	10,078	-0,157	3,409	104
	2	a	1,249	1,618	12,345	8,107	-0,091	3,861	92
		b	1,18	1,459	8,482	7,012	-0,038	2,716	90
	3	a	1,241	1,554	10,491	7,821	0,082	2,962	90
		b	1,479	1,829	10,428	8,685	-0,009	2,767	89
	4	a	1,269	1,58	10,284	8,167	-0,145	3,091	89
		b	1,21	1,527	8,907	7,527	-0,132	3,218	89
	5	a	1,537	1,903	10,513	8,868	0,027	2,643	104
		b	1,383	1,8	15,595	8,81	0,073	3,775	87
	6	a	1,459	1,861	11,394	9,026	0,465	3,468	88
		b	1,267	1,626	10,229	8,617	0,088	3,325	89
	7	a	1,58	1,964	11,8	9,187	-0,221	3,029	97
		b	1,273	1,579	9,251	7,804	-0,257	2,887	100
	8	a	1,587	2,041	13,876	10,583	-0,064	3,598	96
		b	1,396	1,748	10,604	8,552	-0,027	2,856	85
	9	a	1,381	1,747	11,478	9,058	-0,124	3,289	87
		b	1,299	1,622	10,194	8,154	-0,112	3,427	87
	10	a	1,389	1,757	11,255	8,805	-0,037	3,093	91
		b	1,216	1,524	8,488	6,816	-0,039	2,695	73
	1	c	1,628	2,024	12,909	10,377	-0,051	3,154	97
		d	1,668	2,151	13,915	10,658	-0,127	3,859	102
	2	c	1,771	2,092	12,18	9,867	-0,107	2,374	122
		d	1,618	2,008	11,203	10,104	-0,084	2,973	101
	3	c	1,546	1,967	12,509	9,67	-0,145	3,528	88
		d	1,631	2,046	12,132	9,92	-0,172	3,25	99
	4	c	1,502	1,864	11,27	8,952	-0,228	2,701	88
		d	1,594	1,993	13,352	10,236	-0,241	3,324	117
	5	c	1,371	1,747	10,219	8,526	-0,091	2,937	90
		d	1,32	1,673	11,358	8,382	-0,058	3,105	82
	6	c	1,581	1,989	12,726	10,024	-0,238	3,278	83
		d	1,349	1,683	11,553	8,413	-0,069	3,178	97
	7	c	1,472	1,858	12,521	9,318	-0,119	3,199	87
		d	1,635	2,062	11,587	10,416	-0,116	3,426	86
	8	c	1,503	1,859	10,603	9,203	-0,101	2,934	98
		d	1,645	2,017	14,778	9,222	-0,026	2,687	114
	9	c	1,231	1,586	10,199	8,171	0,108	3,47	75
		d	1,561	1,921	10,063	8,725	0,014	2,585	114
	10	c	1,495	1,902	11,279	9,327	-0,232	3,4	86
		d	1,596	1,976	12,081	9,127	-0,242	2,998	96

Tabella 10: Rugosità dei provini 7075-T6 trattati con Green Etching® a 50 °C

Provini 7075-T6 trattati con Green Etching® a 80 °C

			Ra	Rq	Rt	Rz	Rsk	Rku	RSm
			(µm)	(µm)	(µm)	(µm)	(-)	(-)	(µm)
7075 Trattati 80°C	1	a	1,149	1,425	8,126	6,989	0,014	2,899	94
		b	1,207	1,517	8,732	7,641	-0,137	3,179	86
	2	a	1,188	1,499	9,945	7,133	-0,179	3,262	93
		b	1,304	1,585	9,068	6,964	-0,168	2,337	110
	3	a	1,3	1,633	10,265	7,886	0,091	3,03	107
		b	1,165	1,522	10,462	7,862	0,047	3,543	83
	4	a	1,3	1,613	9,129	7,598	-0,039	2,745	99
		b	1,1	1,357	7,542	6,201	-0,186	2,791	90
	5	a	1,214	1,501	8,522	7,063	-0,009	2,745	117
		b	1,361	1,719	11,925	8,459	0,023	3,403	94
	6	a	1,352	1,699	8,876	7,658	-0,1	2,737	133
		b	1,127	1,441	8,803	7,237	-0,104	3,196	89
	7	a	1,27	1,631	10,96	7,846	-0,151	3,139	96
		b	1,359	1,705	9,989	7,966	-0,205	3,084	113
	8	a	1,145	1,392	7,68	66,169	0,005	2,422	110
		b	1,232	1,528	9,4	7,344	-0,095	2,906	93
	9	a	1,186	1,523	9,293	7,785	-0,118	3,121	99
		b	1,208	1,481	8,915	6,958	-0,197	2,591	108
	10	a	1,152	1,412	8,606	6,712	-0,201	2,634	106
		b	1,13	1,443	9,039	7,352	-0,153	3,098	88
1	c	1,181	1,449	9,314	7,039	-0,14	2,809	85	
	d	1,352	1,692	9,795	8,337	-0,075	2,914	84	
2	c	1,289	1,665	10,184	8,505	-0,187	3,347	98	
	d	1,266	1,634	10,925	7,837	-0,135	2,98	92	
3	c	1,539	1,966	11,749	9,43	-0,056	3,305	88	
	d	1,485	1,847	11,193	9,597	-0,185	3,197	139	
4	c	1,402	1,803	10,39	8,503	0,013	3,044	82	
	d	1,511	1,945	14,119	10,166	-0,036	3,545	104	
5	c	1,524	1,901	11,19	9,585	-0,178	3,078	108	
	d	1,447	1,859	13,243	10,033	-0,153	3,635	103	
6	c	1,332	1,674	9,615	7,647	0,115	3,04	97	
	d	1,41	1,765	9,554	8,418	0,016	2,799	106	
7	c	1,49	1,845	13,836	9,546	0,008	3,053	116	
	d	1,341	1,708	10,228	8,686	-0,1	3,043	82	
8	c	1,318	1,656	11,924	8,075	-0,083	3,25	82	
	d	1,325	1,722	14,266	8,666	-0,246	3,413	75	
9	c	1,3776	1,737	12,33	8,821	-0,181	3,326	98	
	d	1,238	1,564	9,131	7,67	-0,063	3,133	87	
10	c	1,391	1,704	10,828	8,147	-0,297	2,773	132	
	d	1,285	1,597	9,703	7,485	-0,251	2,964	100	

Tabella 11: Rugosità dei provini 7075-T6 trattati con Green Etching® a 80 °C

Nei seguenti grafici i valori di rugosità sono rappresentati da colonne delimitate dai valori estremi (massimo e minimo). La linea presente all'interno di ogni colonna rappresenta il valore medio.

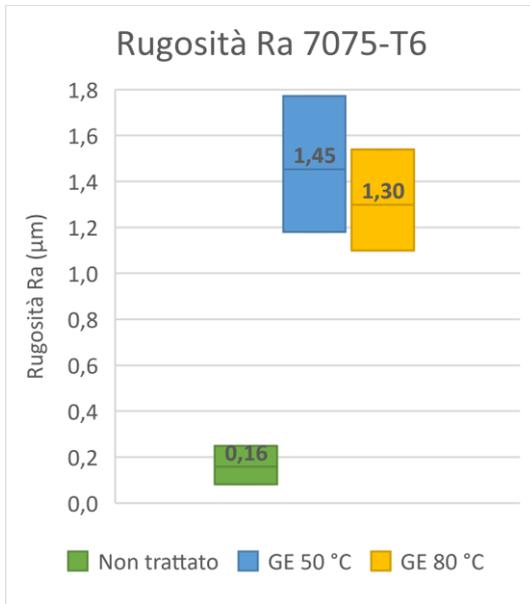


Grafico 1: Rugosità Ra

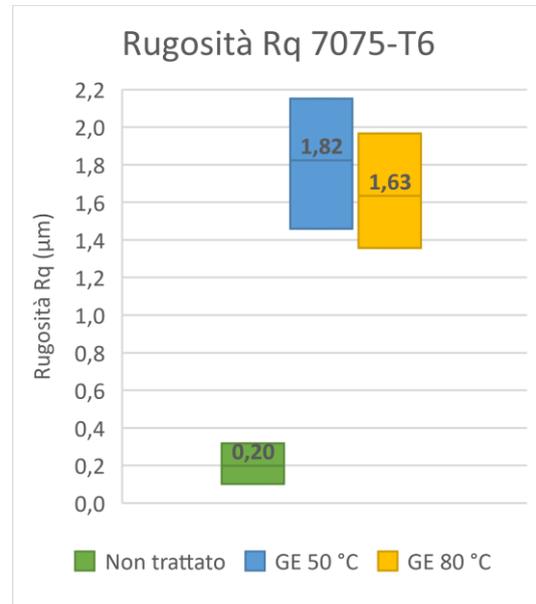


Grafico 2: Rugosità Rq

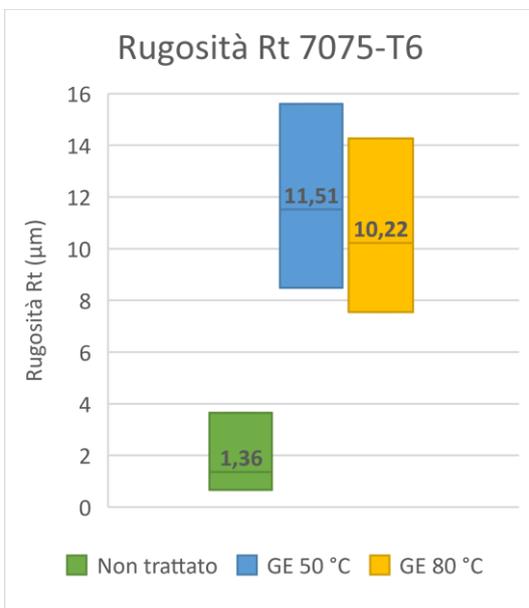


Grafico 3: Rugosità Rt

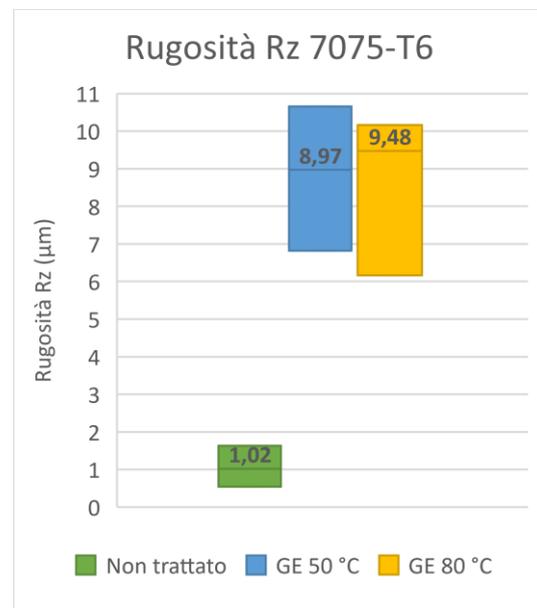


Grafico 4: Rugosità Rz

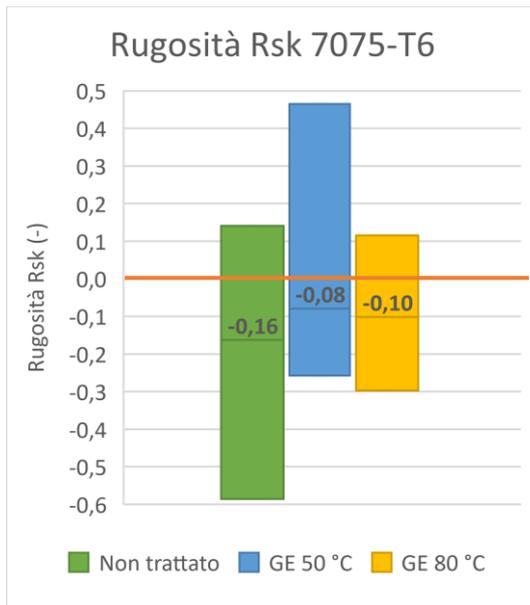


Grafico 5: Rugosità Rsk

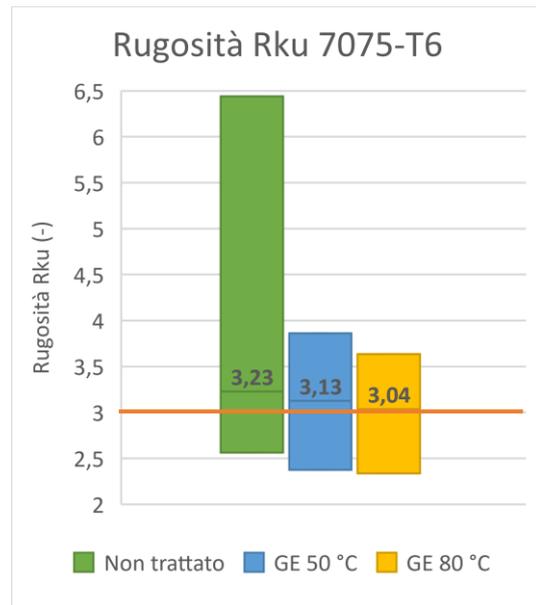


Grafico 6: Rugosità Rku

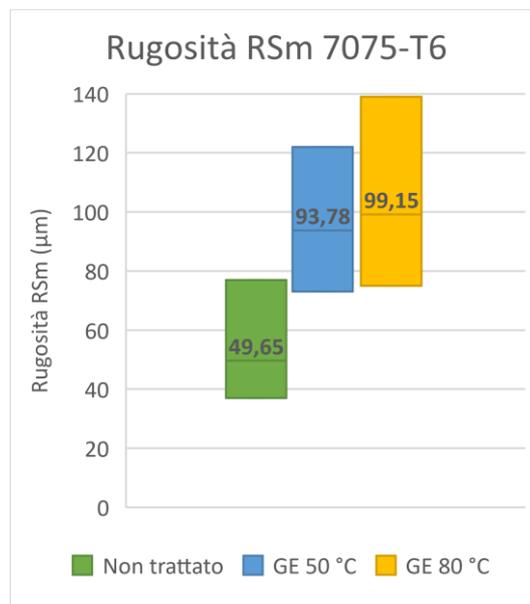


Grafico 7: Rugosità RSm

5.3 Microdurezza 7075-T6

La microdurezza Vickers è un valore di pressione che definisce la durezza di una determinata superficie. Si fa penetrare nel materiale in esame una punta di diamante a forma piramidale a base quadrata sottoponendo il penetratore a un carico prestabilito [15].

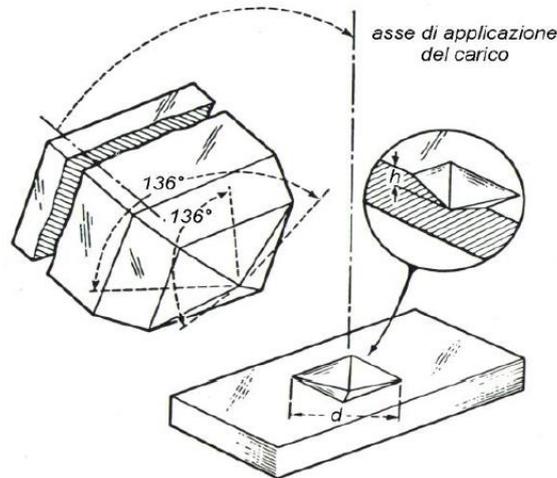


Figura 34: Geometria punta di diamante e impronta lasciata sulla superficie

Impostato il carico da applicare F tramite la punta di diamante, misurato in gf (grammi forza), si procede con la prova. Una volta conclusa, tramite un microscopio e un software si misura la dimensione dell'impronta. Si ricavano i valori delle diagonali del rombo e il software ne calcola una media denominata d .

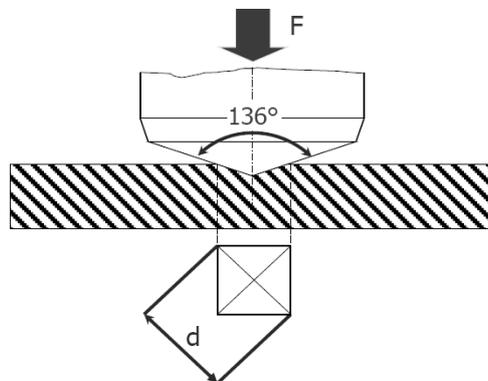


Figura 35: Sezione della prova

Il valore di microdurezza Vickers si misura in HV ed è definito dalla seguente formula:

$$\text{Microdurezza Vickers (HV)} = \frac{2 * F * \sin(\alpha/2)}{d^2}$$

Dove compaiono i seguenti valori:

- F carico applicato misurato in gf
- α angolo al vertice della punta di diamante misurato in $^\circ$
- d diagonale media dell'impronta misurata in μm

5.3.1 Attrezzatura utilizzata

Per le misure di microdurezza Vickers è stato utilizzato un microdurometro Remet HX1000 [16]. Il microdurometro è affiancato da un computer sul quale è installato il software Alexasoft.



Figura 36: Microdurometro Remet HX1000

5.3.2 Procedura utilizzata

I campioni analizzati tramite il microdurometro sono gli stessi campioni inglobati e lucidati nel capitolo precedente di analisi metallografica.

La procedura utilizzata durante la misurazione si divide nelle seguenti fasi:

- a. accensione del microdurometro e del computer
- b. apertura del programma Alexasoft
- c. posizionamento del campione sulla base di misura
- d. controllo della superficie misurata tramite microscopio del microdurometro
- e. impostazione del carico (10 gf)
- f. avviamento della prova
- g. misurazione dell'impronta tramite software Alexasoft

Il software genera direttamente il valore di microdurezza Vickers in HV.

Sono stati analizzati due campioni, uno non trattato e uno trattato tramite Green Etching[®] a 80°C.

Su ogni campione sono state effettuate 10 misure in totale, 5 nel cuore del campione e 5 in prossimità della superficie ad una distanza di circa 30 μm .

Ad ogni gruppo di 5 misure è stato eliminato il valore più distante dalla media. Infine, è stata calcolata la media delle 4 misure rimanenti.

Dunque, saranno presentati 4 diversi valori di microdurezza media calcolata nel cuore e in prossimità della superficie dei due campioni.

5.3.3 Risultati

I risultati ottenuti sono rappresentati in tabelle e in grafici. All'interno della tabella è segnato in giallo il valore eliminato. Nella seconda tabella è riportato il valore medio.

		Microdurezza Vickers	
		Superficie	Cuore
		HV	
7075 Non Trattata	1	88,2	87
	2	110,9	81,9
	3	107	96,4
	4	108	90,2
	5	115	94,2

		Microdurezza Vickers	
		Superficie	Cuore
		HV	
7075 Trattata 80°C	1	94	98,6
	2	113	92,2
	3	115	103,3
	4	105,7	94,2
	5	113,6	96,4

Tabella 12: Microdurezza Vickers della lega di alluminio 7075-T6 non trattata e trattata tramite Green Etching® a 80 °C

	Microdurezza Vickers	
	Superficie	Cuore
	(HV)	
7075 NT	110,2	92,0

	Microdurezza Vickers	
	Superficie	Cuore
	(HV)	
7075 GE 80	111,8	98,1

Tabella 13: Microdurezza Vickers media della lega di alluminio 7075-T6 non trattata e trattata tramite Green Etching® a 80 °C

Sono riportati graficamente il valore minimo, massimo e medio delle diverse misurazioni.

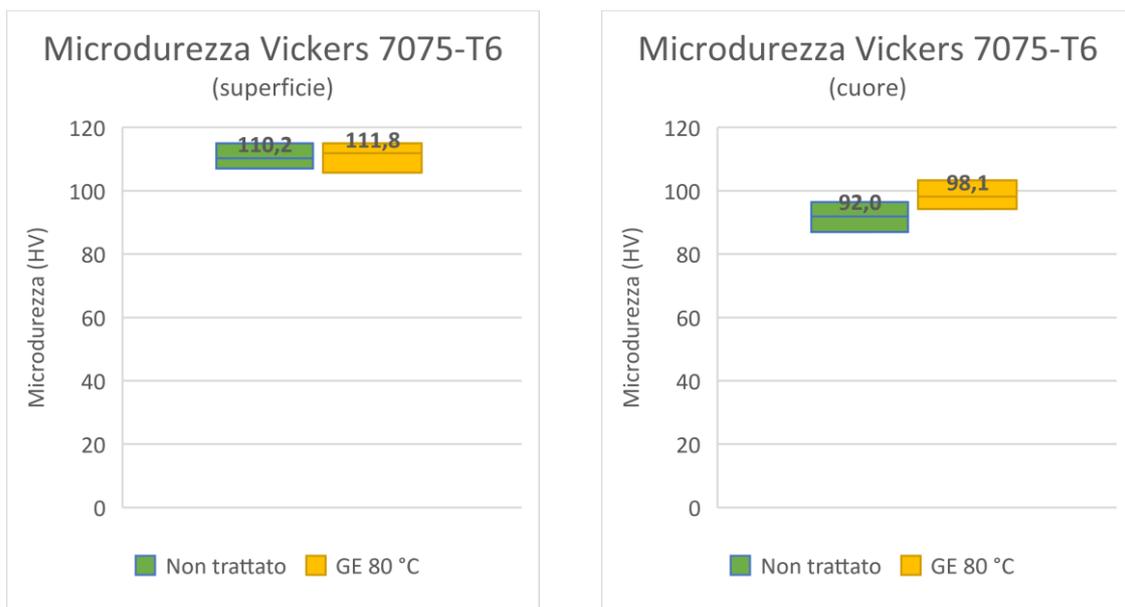


Grafico 8: Microdurezza Vickers della lega di alluminio 7075-T6 non trattata e trattata tramite Green Etching® a 80 °C

5.4 Prove di fatica 7075-T6

“La fatica è un processo permanente, progressivo e localizzato di cambiamento strutturale in un materiale soggetto a condizioni di tensioni e deformazioni variabili nel tempo che può portare alla formazione di cricche e/o alla frattura dopo un numero sufficiente di cicli.”

Questa è la definizione di fatica secondo le norme ASTM E206. Descrive il fenomeno come:

- permanente: non reversibile, non esiste una fase di recupero del danneggiamento apportato al materiale
- progressivo: ogni applicazione di carico induce un contributo al danneggiamento del materiale, fino al cedimento
- localizzato: colpisce una regione in genere ben definita e in genere limitata del componente

Le condizioni di tensione e deformazioni variabili nel tempo sono provocate dall'applicazione ripetuta di un carico inferiore a quello che provoca la rottura del provino (o, in generale, della struttura) se applicato una sola volta.

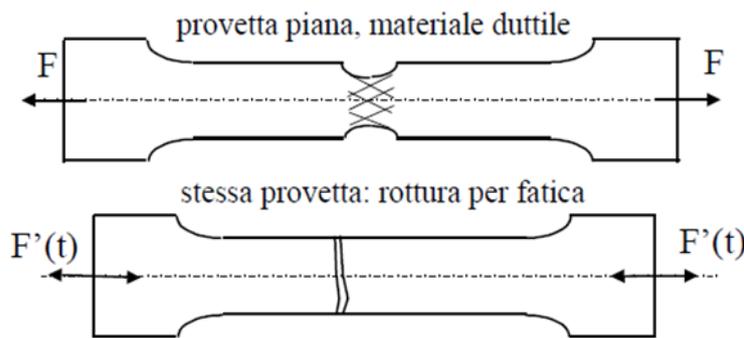


Figura 37: Rottura provino

Quindi se un determinato carico è sopportato una volta da parte della struttura non necessariamente la stessa struttura sarà in grado di sopportarlo ulteriormente, qualora detto carico sia applicato più volte. Inoltre, soggettando un determinato provino a carichi inferiori al limite di fatica (valore di sollecitazione al di sotto del quale non si è mai osservata rottura), esso resiste indefinitamente.

Dunque, il fenomeno della fatica consiste in un danneggiamento progressivo che sfocia in un'accelerazione catastrofica del processo e la conseguente fine della vita in servizio della struttura. Il fenomeno di cedimento della struttura può essere suddiviso in quattro distinte fasi:

- nucleazione
- propagazione della cricca nella struttura
- propagazione della cricca caratterizzata da un meccanismo di frattura elastica lineare, meccanismo di frattura elasto-plastica, o meccanismo di frattura unicamente plastica
- instabilità finale

Ognuna di queste fasi è un processo estremamente complesso o può includere una serie di processi.

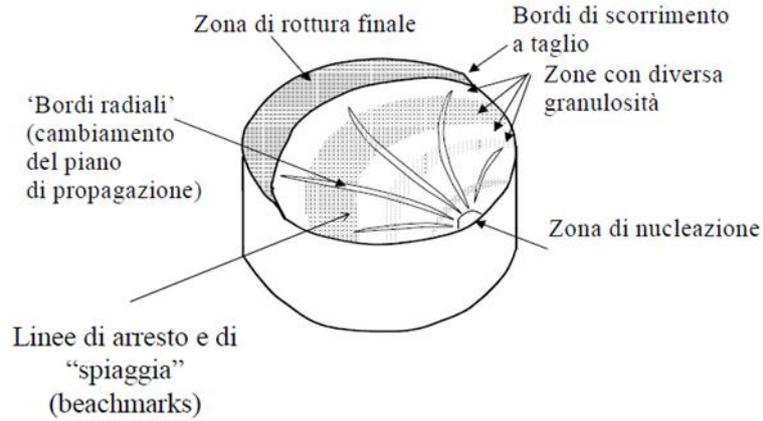


Figura 38: Superficie di rottura a fatica

Definiamo i seguenti parametri utili alla descrizione di un processo di fatica ciclica:

- $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$ tensione media
- $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ tensione alterna
- $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$ tensione massima
- $\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$ tensione minima
- $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a$ ampiezza della tensione
- $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ rapporto di tensione
- N numero di cicli
- f frequenza di oscillazione
- σ_{LF} limite di fatica

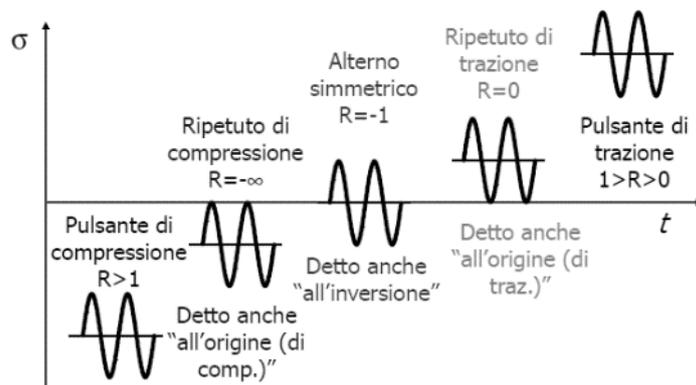


Figura 39: Rapporto di tensione

5.4.1 Attrezzatura utilizzata

Per l'esecuzione delle prove di fatica uniassiale ad alto numero di cicli è stato utilizzato un vibroforo Amsler 10 HFP 422 presente all'interno del laboratorio Dimeas del Politecnico di Torino.



Figura 40: Vibroforo Amsler 10 HFP 422

Il vibroforo Amsler 10 HFP 422 determina la resistenza ai carichi ripetuti di trazione, di compressione o a sollecitazioni di trazione/compressione di materiali metallici (ferrosi e non ferrosi) e non metallici (ad esempio ceramica, plastica, etc.) del formato e della forma adatta, nonché per rilevare la resistenza alle forze dinamiche di elementi strutturali e di assiemi quali giunti rivettati o saldati, sezioni filettate, fili per cavi e calcestruzzo. Essi servono anche per la determinazione quantitativa della capacità di smorzamento dei materiali. Consente di effettuare test ad elevate frequenze sfruttando la risonanza del sistema, in tempi ridotti e ad elevati carichi. Oltre a prove di fatica, la macchina permette la determinazione del coefficiente di smorzamento interno e del modulo elastico del materiale analizzato. Sottopone i provini a vari tipi di sollecitazione (trazione, compressione, flessione, taglio, torsione).

La macchina è costituita da un elettromagnete che mette in movimento un insieme di elementi costituenti un sistema massa-molla che sollecita il provino la cui rigidezza è posta in serie con quella dell'intero sistema. Durante il funzionamento per via elettromagnetica viene messa in risonanza un sistema composto da due masse e da due molle, una delle quali è il provino stesso [17].

Il vibroforo è supportato da un computer, tramite il quale è possibile regolare la macchina e seguire il corretto andamento della prova. Si possono controllare i seguenti parametri:

- forza statica
- forza dinamica
- valore di attivazione della forza dinamica
- numero di cicli
- frequenza

5.4.2 Procedura utilizzata

Procedura acquisizione dati

La procedura di acquisizione dati è anticipata dalla preparazione del banco di prova.

I passaggi necessari per la preparazione del banco di prova sono:

- a. accensione vibroforo
- b. accensione computer
- c. preparazione del vibroforo (distanza morse, posizionamento piastre)
- d. impostazione forza statica, forza dinamica, valore di attivazione della forza dinamica
- e. impostazione numero di cicli

Effettuati i precedenti passaggi sarà possibile effettuare il posizionamento del campione sul banco di prova. Lo strumento presenta una base d'appoggio metallica.

I passaggi utili all'avvio della procedura di misurazione sono:

- f. controllo della superficie del provino
- g. fissaggio del campione nelle morse (utilizzo di carta abrasiva per evitare lo scivolamento durante la prova)
- h. avvio della prova di fatica

Procedura di elaborazione dati

Il programma interrompe la prova al termine dei cicli impostati (2'000'000) o nel caso di cedimento del provino. La frequenza utilizzata sarà di 125 Hz e rimarrà costante per tutta la prova. Al termine il programma riferirà se il provino ha resistito o no ai cicli impostati e nel caso di rottura saranno noti i cicli effettuati. In questo modo avremo tre principali informazioni riguardanti la prova:

- forza statica
- forza dinamica
- numero di cicli

Tramite il valore dell'area della superficie trasversale del provino è possibile calcolare la tensione media e la tensione alterna. Con queste informazioni sarà possibile generare una curva secondo il metodo Stair-Case.

Infine, sarà calcolato il limite di fatica secondo il metodo Stair-Case.

5.4.3 Risultati

Tramite le informazioni riguardo la tensione di rottura UTS, il limite di fatica σ_{LF} e la tensione di snervamento σ_y della lega di alluminio 7075-T6 è possibile generare il diagramma di Haigh in maniera del tutto approssimativa.

Lega di Alluminio 7075-T6		
UTS	σ_{LF}	σ_y
560 MPa	160 MPa	480 MPa

Tabella 14: Caratteristiche meccaniche della lega di alluminio 7075-T6

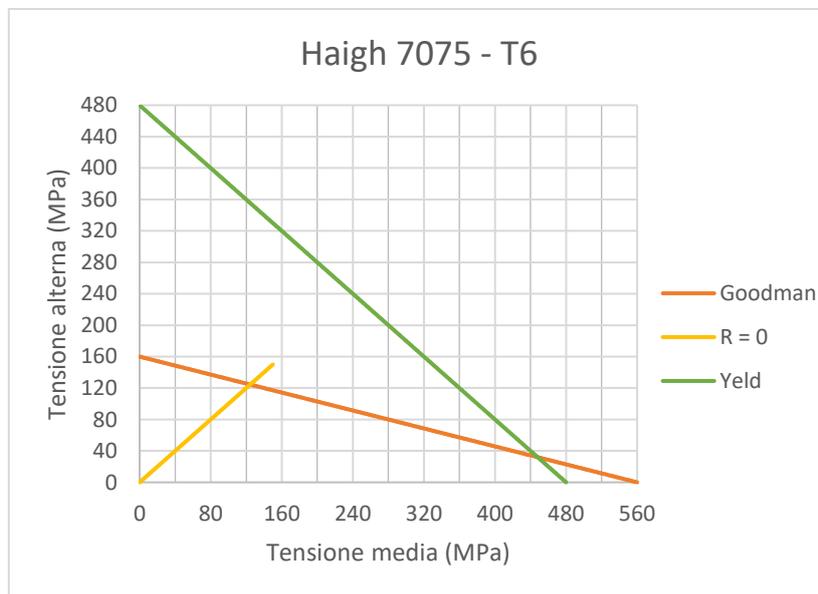


Grafico 9: Diagramma di Haigh della lega di alluminio 7075-T6

Di seguito è riportato il diagramma di Wöhler della lega di alluminio 7075-T6 costruito con un rapporto di tensione $R=0$ [18]. All'interno delle prove manterremo un rapporto di tensione compreso tra 0 e 1 in modo tale da sollecitare il provino unicamente a trazione.

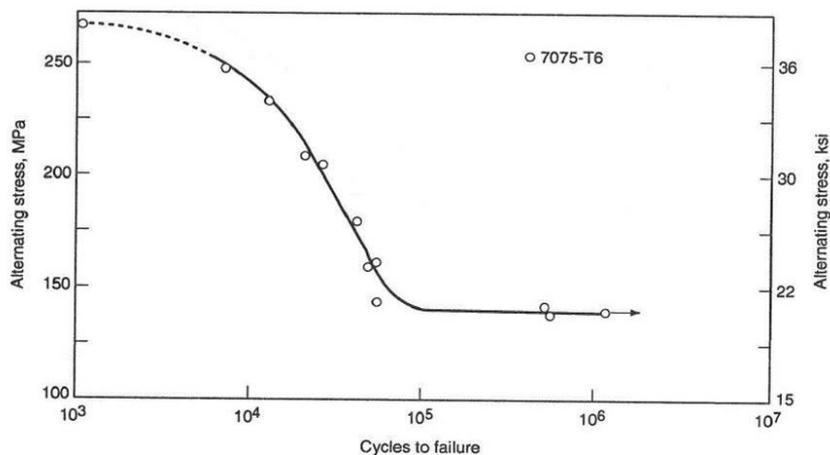


Figura 41: Diagramma di Wöhler della lega di alluminio 7075-T6

Provini 7075-T6 non trattati

Basandoci sul diagramma di Haigh precedentemente costruito e sul diagramma di Wöhler è possibile stabilire una coppia di tensioni, alterna e media, con la quale iniziare a testare i provini non trattati.

Di seguito è riportata la tabella che riassume le prove effettuate sui provini non trattati chimicamente (NT).

provino	T media (MPa)	T alterna (MPa)	C medio (N)	C alterno (N)	cicli
NT00	136	133,33	5957	5840	8'000
NT01	66,67	40	2920	1752	1'103'942
NT02	53,33	40	2336	1752	1'600'000
NT03	53,33	40	2336	1752	819'769
NT04	53,33	26,67	2336	1168	2'000'000
NT05	53,33	33,33	2336	1460	2'000'000
NT06	53,33	40	2336	1752	2'000'000
NT07	53,33	50	2336	2190	1'850'000
NT07	90	50	3942	2190	2'000'000
NT07	90	60	3942	2628	2'000'000
NT07	90	70	3942	3066	2'000'000
NT07	90	80	3942	3504	1'350'000
NT07	110	80	4818	3504	557'975
NT06	110	80	4818	3504	128'945
NT05	100	70	4380	3066	2'000'000
NT05	100	80	4380	3504	2'000'000
NT05	100	90	4380	3942	1'080'460
NT04	100	98	4380	4292,4	69'969
NT08	100	80	4380	3504	202'713
NT09	100	70	4380	3066	273'631
NT10	100	60	4380	2628	2'000'000
NT10	100	65	4380	2847	2'000'000
NT10	100	70	4380	3066	2'000'000
NT10	100	75	4380	3285	2'000'000
NT10	100	80	4380	3504	2'000'000
NT10	100	90	4380	3942	136'812
NT11	100	85	4380	3723	203'798
NT12	100	80	4380	3504	157'776
NT13	100	75	4380	3285	155'162
NT14	100	70	4380	3066	2'000'000
NT15	100	80	4380	3504	551'770
NT16	100	70	4380	3066	2'000'000
NT17	100	80	4380	3504	2'000'000
NT18	100	90	4380	3942	198'064
NT19	100	80	4380	3504	2'000'000
NT20	100	90	4380	3942	2'000'000
NT21	100	100	4380	4380	453'236
NT22	100	90	4380	3942	134'237
NT23	100	80	4380	3504	2'000'000
NT24	100	70	4380	3066	2'000'000

Tabella 15: Prove di fatica effettuate sui provini non trattati chimicamente

All'interno della tabella precedente si distinguono una serie di colori. Ogni colore indica un esito della prova secondo la seguente legenda.

vivo 2'000'000 cicli
cricca afferraggio
rottura prima prova
rottura prova successiva
vivo prova successiva

Tabella 16: Legenda prove

“Vivo 2'000'000 cicli” indica che il provino ha resistito ad una prima prova. Si riferisce ad un provino mai sollecitato in precedenza.

“Cricca afferraggio” indica che si è generata una cricca in prossimità della zona racchiusa nell'afferraggio. Questo fenomeno si è verificato in tre prove a causa di un possibile slittamento del provino o di una pressione non omogenea degli afferraggi stessi. Per evitare questo inconveniente è stata utilizzata della carta abrasiva, posta tra la superficie del provino e quella dell'afferraggio.

“Rottura prima prova” indica una prova all'interno della quale il provino ha raggiunto rottura all'interno dei primi 2'000'000 di cicli. Ci riferiamo ad un provino mai sollecitato in precedenza.

“Rottura prova successiva” indica una prova all'interno della quale il provino ha raggiunto rottura ma a differenza del caso precedente ci riferiamo ad un provino già sollecitato in precedenza.

“Vivo prova successiva” indica una prova all'interno della quale il provino non ha raggiunto rottura all'interno dei 2'000'000 di cicli. In quest'ultimo caso ci riferiamo ad un provino già sollecitato in precedenza.

Le prove all'interno delle quali non si è verificata rottura con meno di 2'000'000 sono prove interrotte dall'utente.

Inoltre, sono riportati sia il valore di tensione che di carico in quanto il vibroforo applica una forza. Per questo motivo è necessario calcolare il valore di forza dalla tensione stabilita moltiplicando per l'area della sezione ristretta del provino.

spessore	3	mm
larghezza	14,6	mm
area	43,8	mm²

Tabella 17: Dimensioni della sezione ristretta del provino

Il seguente grafico rappresenta le prove del tipo “vivo 2'000'000 cicli” (V) e “rottura prima prova” (X) per i provini non trattati chimicamente.

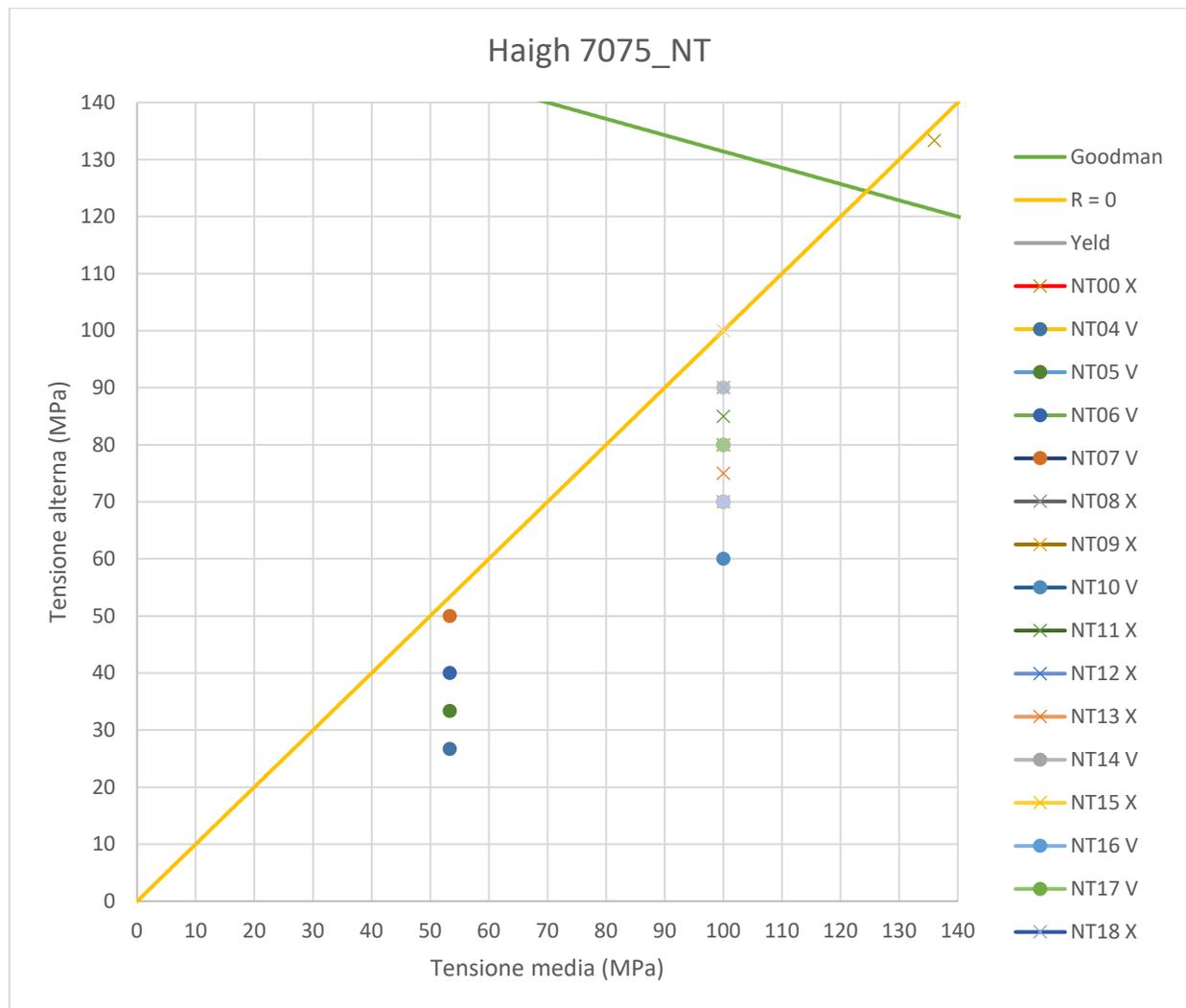


Grafico 10: Diagramma di Haigh con prove di fatica dei provini non trattati chimicamente

Metodo Stair-Case 7075-T6 non trattata

I primi 8 provini, da NT00 a NT07, sono stati utilizzati per decidere il valore di tensione media da utilizzare all'interno del metodo Stair-Case. Quindi dal provino NT08 al provino NT24 è stata mantenuta la tensione media costante ad un valore di 100 MPa. La tensione alterna è stata fatta variare di un valore di 10 MPa. Solo queste sono rappresentate all'interno del diagramma Stair-Case.

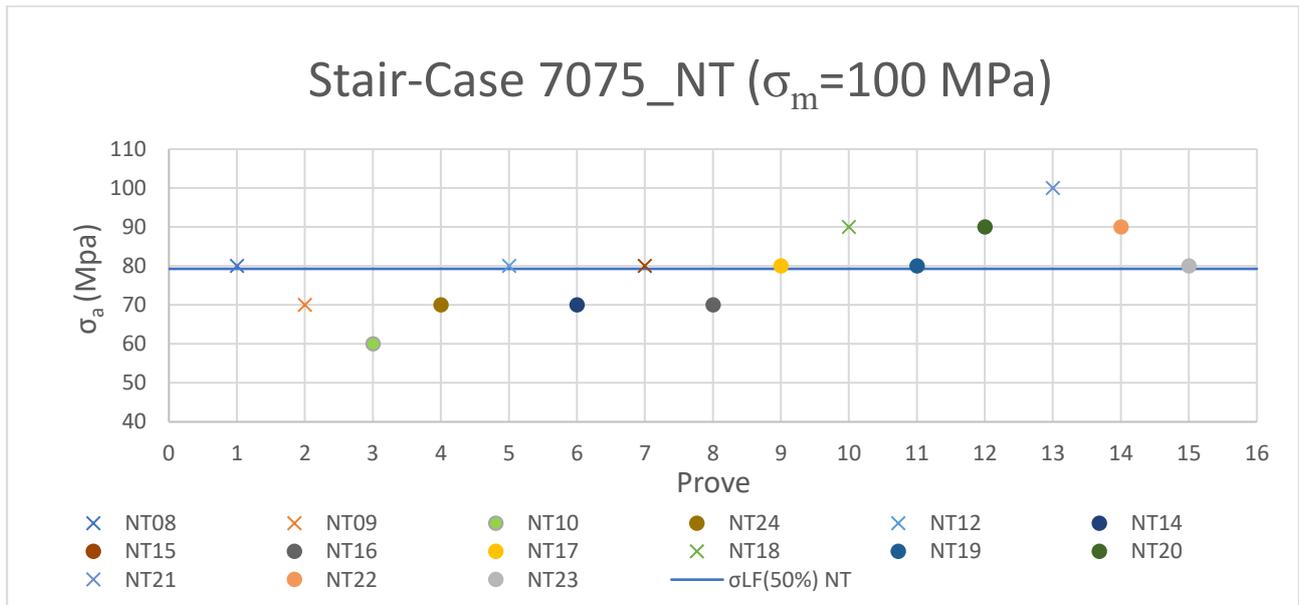


Grafico 11: Metodo Stair-Case provini 7075_NT

provino	T media (MPa)	T alterna (MPa)	C medio (N)	C alterno (N)	cicli	P
NT08	100	80	4380	3504	202'713	1
NT09	100	70	4380	3066	273'631	2
NT10	100	60	4380	2628	2'000'000	3
NT24	100	70	4380	3066	2'000'000	4
NT12	100	80	4380	3504	157'776	5
NT14	100	70	4380	3066	2'000'000	6
NT15	100	80	4380	3504	551'770	7
NT16	100	70	4380	3066	2'000'000	8
NT17	100	80	4380	3504	2'000'000	9
NT18	100	90	4380	3942	198'064	10
NT19	100	80	4380	3504	2'000'000	11
NT20	100	90	4380	3942	2'000'000	12
NT21	100	100	4380	4380	453'236	13
NT22	100	90	4380	3942	134'237	14
NT23	100	80	4380	3504	2'000'000	15

Tabella 18: Prove utilizzate nel metodo Stair-Case per la lega di alluminio 7075-T6 non trattata

		Ordine delle prove														
σ_a (MPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
100													x			
90										x		o		x		
80	x				x		x		o		o				o	
70		x		o		o		o								
60			o													

Tabella 19: Esito prove 7075-T6 non trattata

Tramite la normativa UNI 3964 [19] è stato calcolato il limite di fatica per tensione media 100 MPa con una probabilità di rottura del 50 % entro i 2'000'000 di cicli.

$$\sigma_{D(50\%)} = \sigma_o + d \left(\frac{A}{N} \pm 0,5 \right)$$

Nella parentesi si adotta il segno meno se l'eventualità meno frequente è la rottura ed il segno più nel caso contrario (meno per NT, più per GE50 e GE80). All'interno della formula troviamo una serie di elementi:

- σ_o è livello di ampiezza di oscillazioni più basso (60 MPa per NT, 50 MPa per GE50 e GE80)
- d è la spaziatura tra i vari livelli di tensione alterna (10 MPa)
- A è la somma dei prodotti del numero di eventi n (meno frequenti) presenti in ciascun livello per il numero d'ordine i del livello stesso (a partire dal livello più basso, ordine 0)
- N è il numero totale degli eventi meno frequenti

Inoltre, è possibile calcolare la stima dello scarto tipo s tramite la seguente formula.

$$s = 1,62 d \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right)$$

All'interno della formula troviamo il valore $B = \sum i^2 * n$. Questa formula è applicabile solo se $\frac{NB - A^2}{N^2} > 0,3$. La condizione precedente è verificata nel caso NT.

I valori di limite di fatica per tensione media 100 MPa con una probabilità di rottura del 50 % e di scarto tipo per la lega 7075-T6 non trattata sono rispettivamente:

$$\sigma_{D(50\%)} = 79,29 \text{ MPa}$$

$$s = 13,69 \text{ MPa}$$

I valori di limite di fatica per tensione media 100 MPa con una probabilità di rottura del 10 % e del 90% per la lega 7075-T6 non trattata sono rispettivamente:

$$\sigma_{D(10\%)} = \sigma_{D(50\%)} - 1,28s = 61,76 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{D(90\%)} = \sigma_{D(50\%)} + 1,28s = 96,81 \text{ MPa}$$

Provini 7075-T6 trattati con Green Etching® a 50 °C

Basandoci sui risultati delle prove precedentemente effettuate è possibile stabilire una coppia di tensioni, alterna e media, con la quale iniziare a testare i provini trattati. Di seguito sono riportati il grafico Stair-Case e la tabella che riassume le prove effettuate sui provini trattati chimicamente ad una temperatura di bagno di 50 °C (GE50).

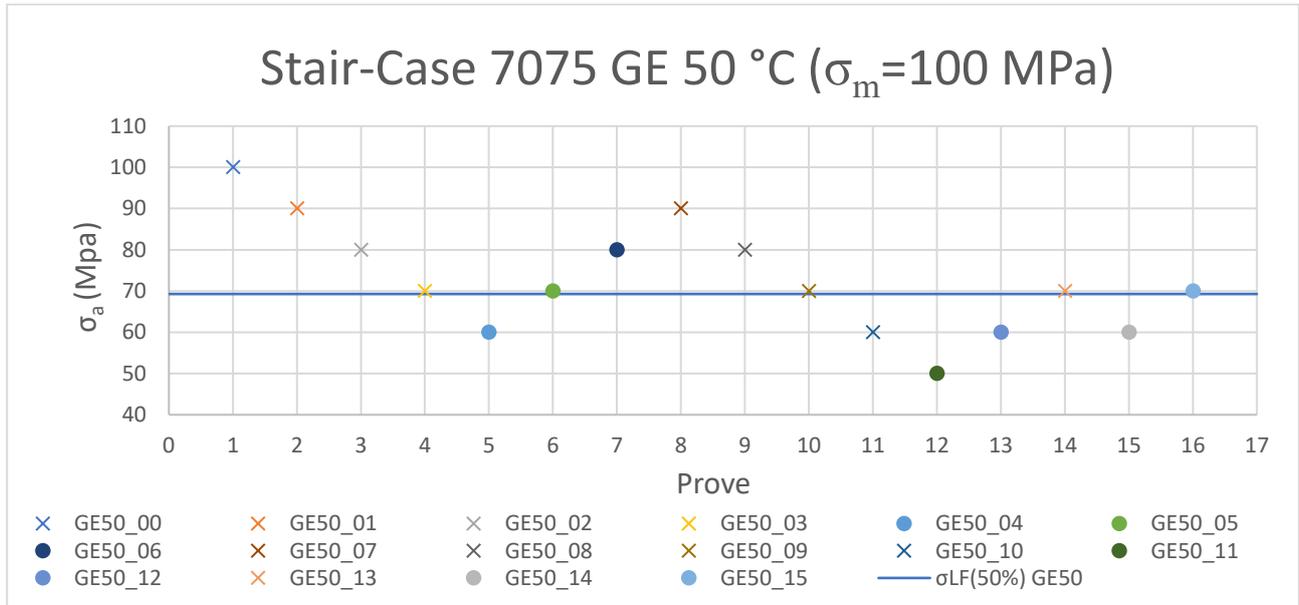


Grafico 12: Metodo Stair-Case provini 7075_GE50

provino	T media (MPa)	T alterna (MPa)	C medio (N)	C alterno (N)	cicli	P
GE50_00	100	100	4080	4080	106'682	1
GE50_01	100	90	4080	3672	318'208	2
GE50_02	100	80	4080	3264	438'839	3
GE50_03	100	70	4080	2856	348'045	4
GE50_04	100	60	4080	2448	2'000'000	5
GE50_05	100	70	4080	2856	2'000'000	6
GE50_06	100	80	4080	3264	2'000'000	7
GE50_07	100	90	4080	3672	394'265	8
GE50_08	100	80	4080	3264	301'352	9
GE50_09	100	70	4080	2856	1'437'006	10
GE50_10	100	60	4080	2448	1'203'321	11
GE50_11	100	50	4080	2040	2'000'000	12
GE50_12	100	60	4080	2448	2'000'000	13
GE50_13	100	70	4080	2856	564'346	14
GE50_14	100	60	4080	2448	2'000'000	15
GE50_15	100	70	4080	2856	2'000'000	16

Tabella 20: Prove utilizzate nel metodo Stair-Case per la lega di alluminio 7075-T6 trattata a 50 °C

		Ordine delle prove														
σ_a (MPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
100	x															
90		x						x								
80			x				o		x							
70				x		o				x				x		o
60					o						x		o		o	
50												o				

Tabella 21: Esito prove 7075-T6 trattata a 50 °C

La prima prova ($\sigma_a = 100$ MPa) non è stata presa in considerazione durante il calcolo del limite di fatica in quanto è necessario che le prove siano comprese tra la rottura più alta vicino ad una sopravvivenza (prova 8) e la sopravvivenza più bassa vicino ad una rottura (prova 12). Dunque, saranno considerate le prove da 2 a 16 per un totale di 15 prove.

Il valore di limite di fatica per tensione media 100 MPa con una probabilità di rottura del 50 % per la lega 7075-T6 trattata tramite Green Etching® a 50 °C è:

$$\sigma_{D(50\%)} = 69,29 \text{ MPa}$$

La condizione $\frac{NB-A^2}{N^2} > 0,3$ è verificata dunque è possibile calcolare lo scarto tipo secondo la formula utilizzata in precedenza.

$$s = 14 \text{ MPa}$$

I valori di limite di fatica per tensione media 100 MPa con una probabilità di rottura del 10 % e del 90% per la lega 7075-T6 trattata tramite Green Etching® a 80 °C sono rispettivamente:

$$\sigma_{D(10\%)} = \sigma_{D(50\%)} - 1,28s = 51,76 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{D(90\%)} = \sigma_{D(50\%)} + 1,28s = 86,81 \text{ MPa}$$

Provini 7075-T6 trattati con Green Etching® a 80 °C

Di seguito sono riportati il grafico Stair-Case e la tabella che riassumono le prove effettuate sui provini trattati chimicamente ad una temperatura di bagno di 80 °C (GE80).

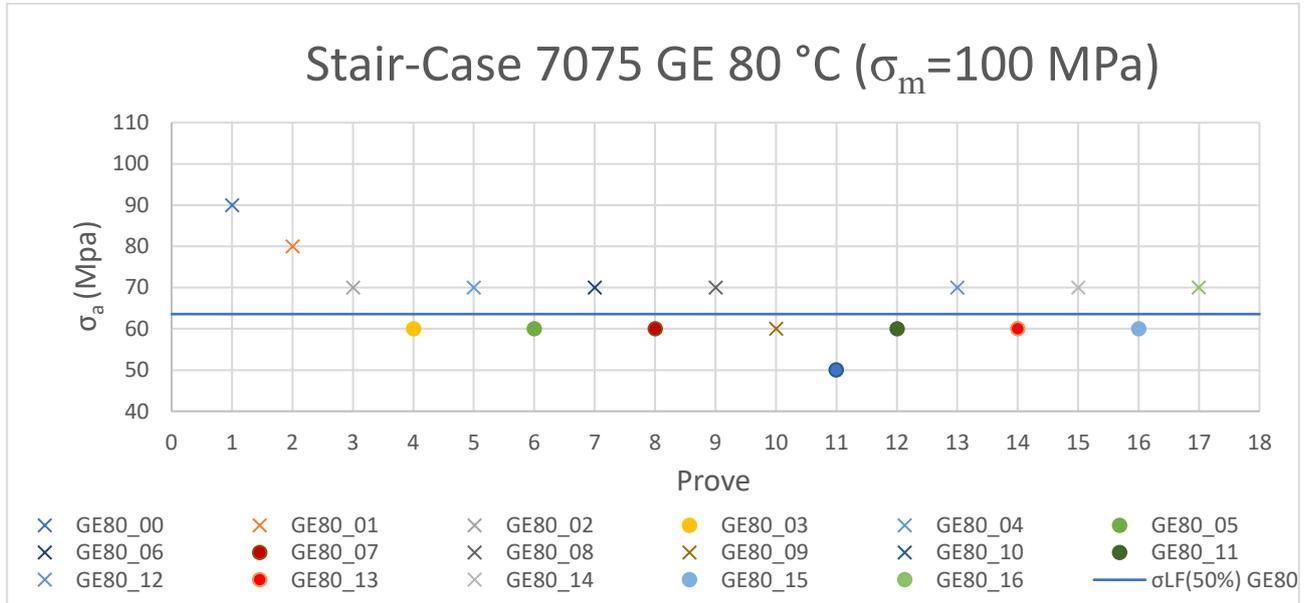


Grafico 13: Metodo Stair-Case provini 7075_GE80

provino	T media (MPa)	T alterna (MPa)	C medio (N)	C alterno (N)	cicli	P
GE80_00	100	90	4080	3672	106'682	1
GE80_01	100	80	4080	3264	224'316	2
GE80_02	100	70	4080	2856	354'936	3
GE80_03	100	60	4080	2448	2'000'000	4
GE80_04	100	70	4080	2856	1'977'342	5
GE80_05	100	60	4080	2448	2'000'000	6
GE80_06	100	70	4080	2856	576'189	7
GE80_07	100	60	4080	2448	2'000'000	8
GE80_08	100	70	4080	2856	484'486	9
GE80_09	100	60	4080	2448	527'746	10
GE80_10	100	50	4080	2040	2'000'000	11
GE80_11	100	60	4080	2448	2'000'000	12
GE80_12	100	70	4080	2856	1'200'391	13
GE80_13	100	60	4080	2448	2'000'000	14
GE80_14	100	70	4080	2856	292'003	15
GE80_15	100	60	4080	2448	2'000'000	16
GE80_16	100	70	4080	2856	274'771	17

Tabella 22: Prove utilizzate nel metodo Stair-Case per la lega di alluminio 7075-T6 trattata a 80 °C

		Ordine delle prove																
σ_a (MPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
90	x																	
80		x																
70			x		x		x		x				x				x	
60				o		o		o		x		o		x		o		
50											o				o			

Tabella 23: Esito prove 7075-T6 trattata a 80 °C

Le prime due prove ($\sigma_a = 90$ MPa e $\sigma_a = 80$ MPa) non sono state prese in considerazione durante il calcolo del limite di fatica in quanto è necessario che le prove siano comprese tra la rottura più alta vicino ad una sopravvivenza (prova 3) e la sopravvivenza più bassa vicino ad una rottura (prova 11). Dunque, saranno considerate le prove da 3 a 17 per un totale di 15 prove.

I valori di limite di fatica per tensione media 100 MPa con una probabilità di rottura del 50 % e di scarto tipo per la lega 7075-T6 trattata tramite Green Etching® a 80 °C è:

$$\sigma_{D(50\%)} = 63,57 \text{ MPa}$$

La condizione $\frac{NB-A^2}{N^2} > 0,3$ non è verificata dunque non è possibile calcolare lo scarto tipo secondo la formula utilizzata in precedenza. Sarà utilizzato il metodo Dixon-Mood [20].

$$s = 0,53s = 5,3 \text{ MPa}$$

I valori di limite di fatica per tensione media 100 MPa con una probabilità di rottura del 10 % e del 90% per la lega 7075-T6 trattata tramite Green Etching® a 80 °C sono rispettivamente:

$$\sigma_{D(10\%)} = \sigma_{D(50\%)} - 1,28s = 56,79 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{D(90\%)} = \sigma_{D(50\%)} + 1,28s = 70,36 \text{ MPa}$$

Tramite i seguenti grafici saranno riassunti i risultati ottenuti dal metodo Stair-Case effettuato sulle tre tipologie di provino della lega 7075-T6 (NT, GE50, GE80).

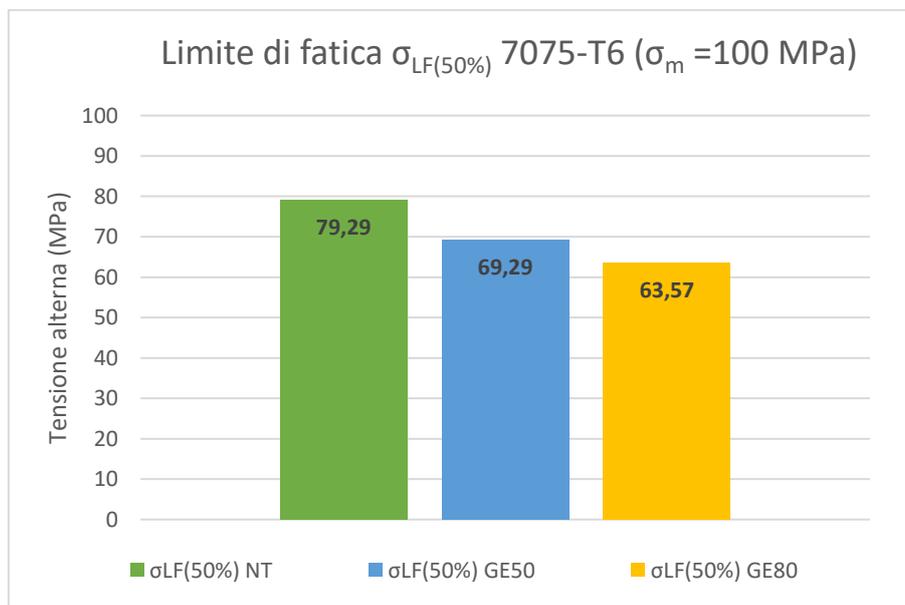


Grafico 14: Limite di fatica con il 50% di probabilità di rottura

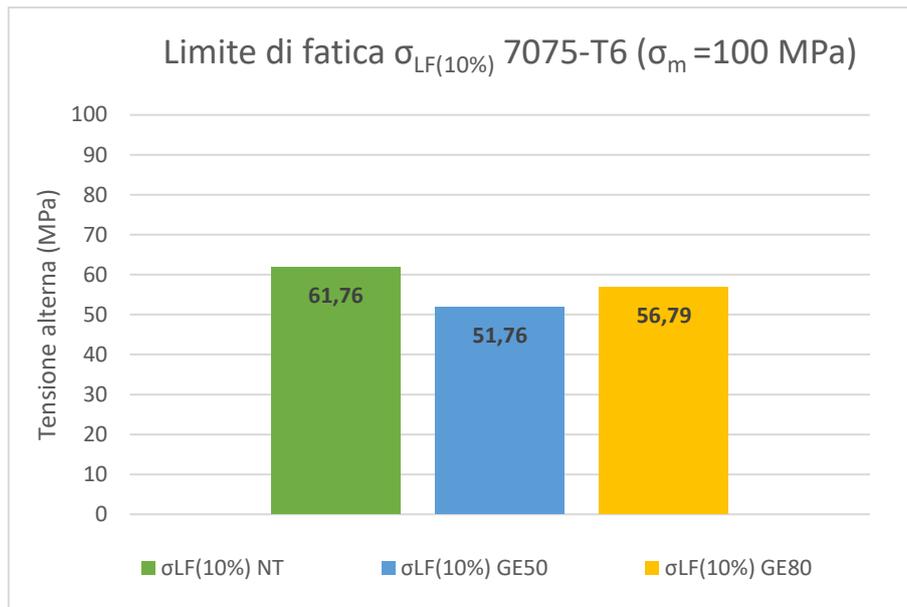


Grafico 15: Limite di fatica con il 10% di probabilità di rottura

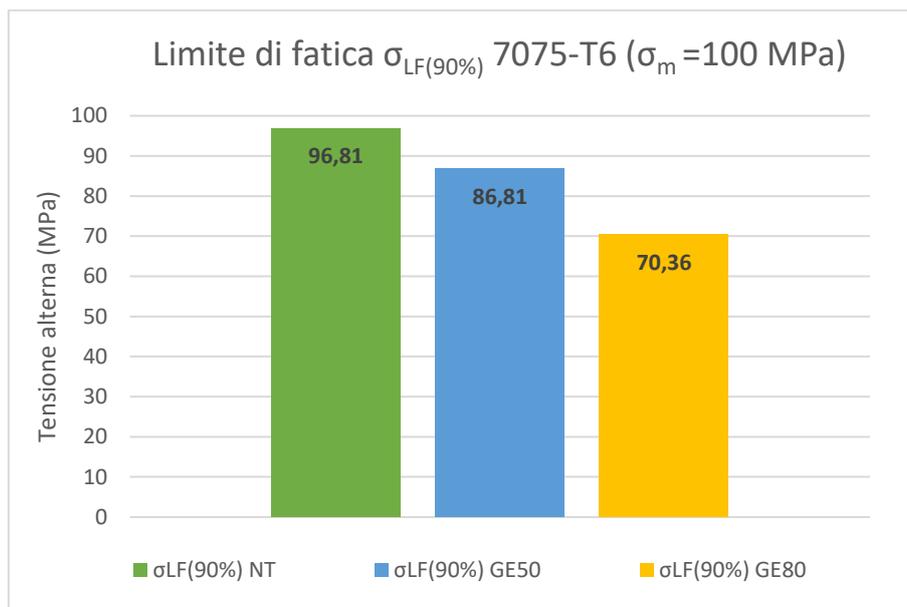


Grafico 16: Limite di fatica con il 90% di probabilità di rottura

5.5 Prove di trazione 5754-H111 e 6014-T4

La ricerca effettuata sulla variazione delle proprietà meccaniche delle leghe di alluminio sottoposte a trattamento di Green Etching® comprende lo svolgimento di una serie di prove di trazione uniassiale su leghe di alluminio della serie 5000 e 6000.

La prova di trazione uniassiale è una prova distruttiva che viene effettuata per ricavare alcune caratteristiche dei materiali. Consiste nel sottoporre un provino, di dimensioni standardizzate, di un materiale in esame a un carico uniassiale, che viene incrementato da zero fino ad un valore massimo che determina la sua rottura. Il provino è portato dunque a rottura.

Le leghe analizzate sono la lega 5754-H111 e la lega 6014-T4.

Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
3.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	Bal.

Tabella 24: Composizione chimica della lega di Alluminio 5754 (frazione in massa, %) [21]

Mg	Si	Fe	Mn	Cu	V	Cr	Ti	Zn	Al
0.8	0.6	0.35	0.2	0.25	0.2	0.2	0.1	0.1	Bal.

Tabella 25: Composizione chimica della lega di Alluminio 6014 (frazione in massa, %) [22]

I provini utilizzati hanno dimensioni standardizzate secondo la normativa UNI EN 10002/1.

Lo spessore sarà variabile in base alle condizioni di Green Etching®.

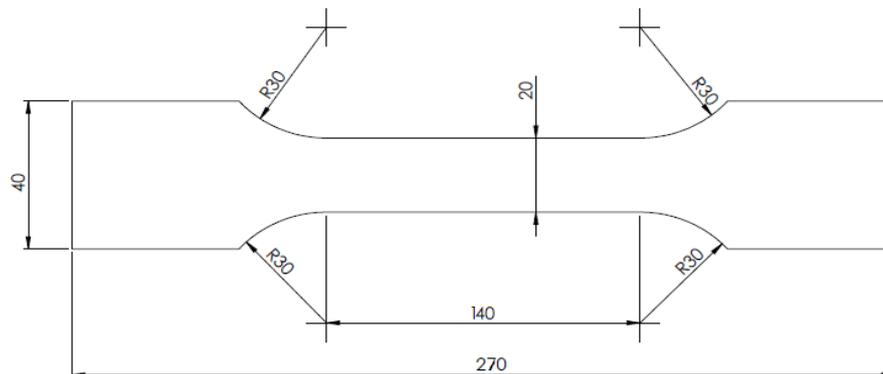


Figura 42: Disegno del provino quotato

Il Green Etching® è stato effettuato su tutti i provini tranne quelli denominati con la sigla “MB” (materiale base).

I campioni analizzati sono stati trattati con diversi tempi di immersione e diverse temperature del bagno. Le temperature di bagno sono 40°C, 55°C e 70°C. Mentre la durata di bagno varia da 10min a 90 min.

5.5.1 Attrezzatura utilizzata

Per l'esecuzione delle prove di trazione uniassiale è stato utilizzato il sistema servoidraulico di prova Instron 8801 presente all'interno del laboratorio Dimeas del Politecnico di Torino. L'8801 offre complete soluzioni di prova per soddisfare le esigenze dei materiali avanzati e prove sui componenti, ed è ideale per le prove di fatica ad alto e a basso numero di cicli, prove termomeccaniche di fatica e di meccanica della frattura. In questo caso sarà usato per effettuare prove statiche di trazione [23]. La macchina è affiancata da un computer che contiene Software Bluehill[®], programma di acquisizione per prove statiche.



Figura 43: sistema servoidraulico di prova Instron 8801

5.5.2 Procedura utilizzata

Procedura acquisizione dati

La procedura di acquisizione dati è anticipata dalla preparazione del banco di prova.

I passaggi necessari per la preparazione del banco di prova sono:

- a. accensione computer
- b. accensione macchina
- c. bloccaggio del provino all'interno della macchina
- d. posizionamento dell'estensometro
- e. avvio prova di trazione

La prova di trazione si conclude con la rottura del provino. Il software genererà una serie di dati che rappresentano l'estensione del provino e il carico a cui è stato sottoposto durante la prova.

Procedura di elaborazione dati

La procedura di elaborazione dati si svolge utilizzando un foglio di lavoro Excel all'interno del quale potremo inserire i dati ottenuti durante la prova e generare un grafico tensione-deformazione che rappresenti la prova di trazione.

Da questo grafico sarà possibile estrarre i seguenti dati:

- limite elastico
- tensione massima
- tensione di rottura
- allungamento massimo

Ci concentreremo sui dati di

limite elastico $R_{p0.2}$ e tensione massima σ_{max} . I dati riportati sono il risultato della media dei valori ottenuti da due diverse prove effettuate su due provini trattati con Green Etching® alle stesse condizioni di temperatura e di permanenza nel bagno chimico.

5.5.3 Risultati

I valori di limite elastico e tensione massima ottenuti sono rappresentati tramite una tabella riassuntiva e un grafico utile per interpretare meglio l'andamento delle proprietà al variare delle condizioni di trattamento.

Provini 5754-H111

	Limite elastico 5754-H111 (MPa)		
	40 °C	55 °C	70 °C
10 min	147	123	130
30 min	128	129	115
60 min	129	125	117
90 min	125	115	104

	Tensione massima 5754-H111 (MPa)		
	40 °C	55 °C	70 °C
10 min	259	242	253
30 min	250	253	230
60 min	253	251	247
90 min	245	245	232

MB	145
-----------	-----

MB	268
-----------	-----

Tabella 26: Tensione massima e limite elastico 5754-H111

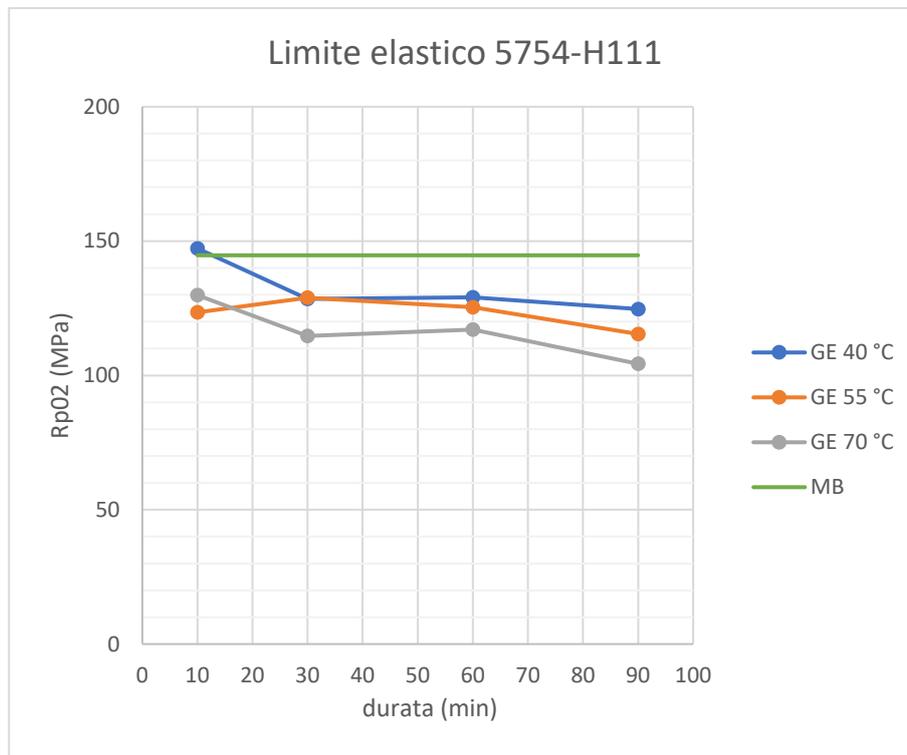


Grafico 17: Limite elastico 5754-H111

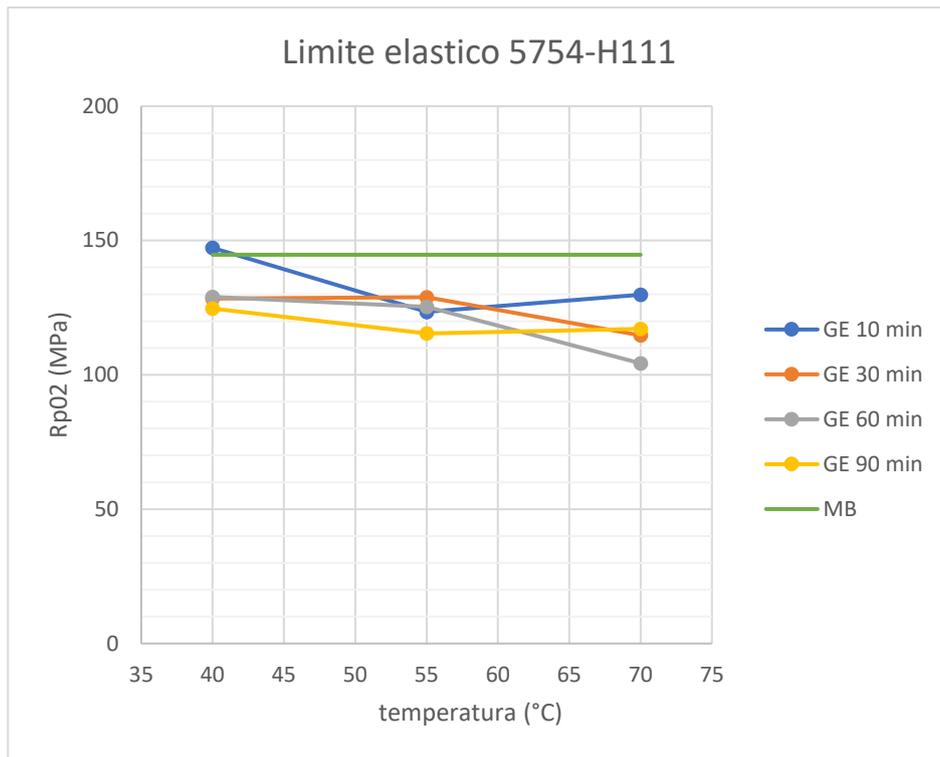


Grafico 18: Limite elastico 5754-H111

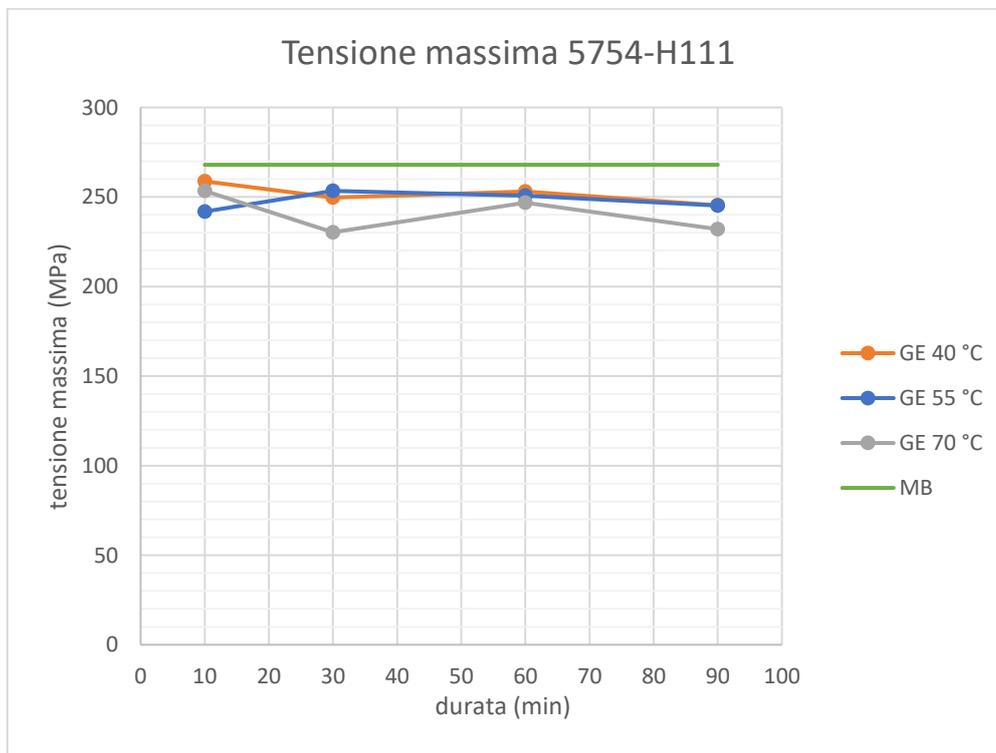


Grafico 19: Tensione massima 5754-H111

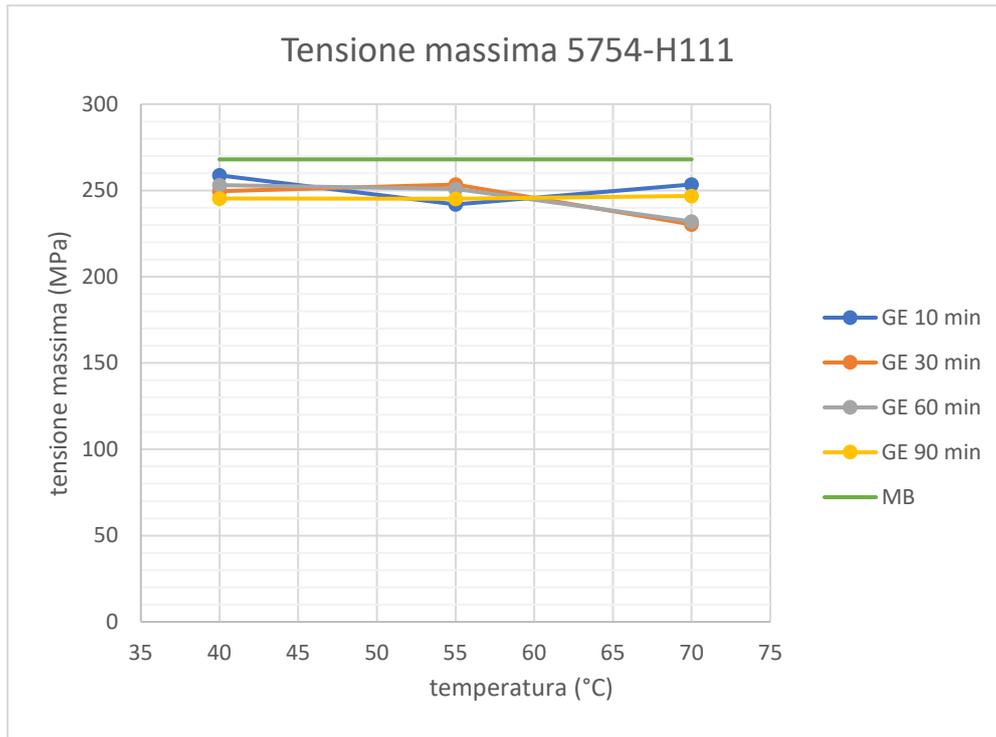


Grafico 20: Tensione massima 5754-H111

Provini 6014-T4

I valori di limite elastico e tensione massima ottenuti sono rappresentati tramite una tabella riassuntiva e un grafico utile per interpretare meglio l'andamento delle proprietà al variare delle condizioni di trattamento.

	Limite elastico 6014-T4 (MPa)		
	40 °C	55 °C	70 °C (*)
10 min	154	159	141
30 min	129	156	108
60 min (45)	137	144	132
90 min (60)	127	145	120

	Tensione massima 6014-T4 (MPa)		
	40 °C	55 °C	70 °C (*)
10 min	281	288	266
30 min	250	290	217
60 min (45)	256	273	255
90 min (60)	243	266	180

MB	140
-----------	-----

MB	258
-----------	-----

Tabella 27: Limite elastico e tensione massima 6014-T4

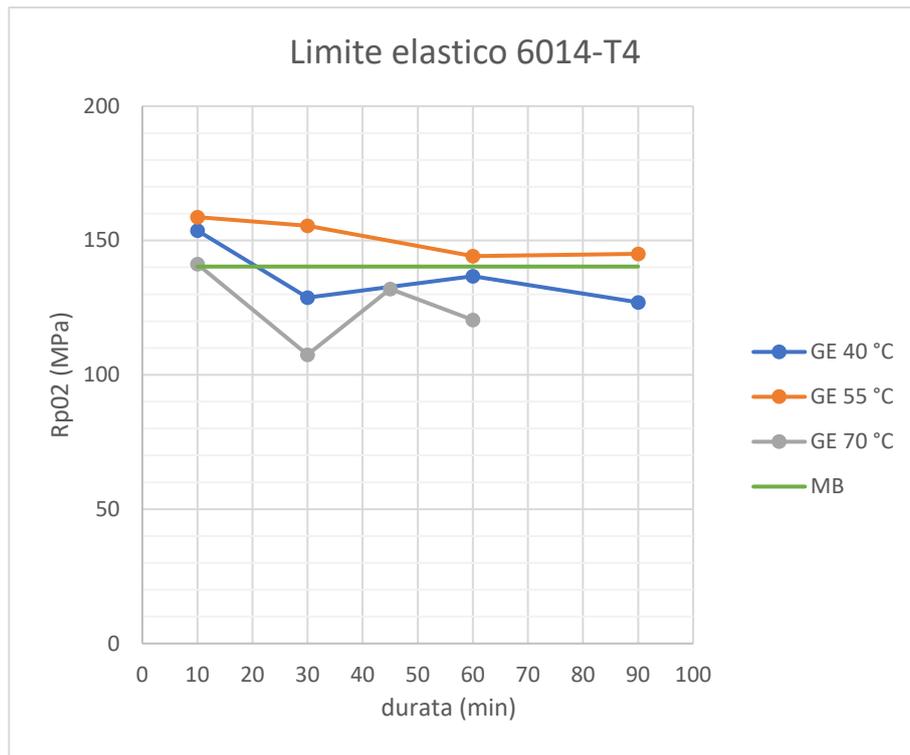


Grafico 21: Limite elastico 6014-T4

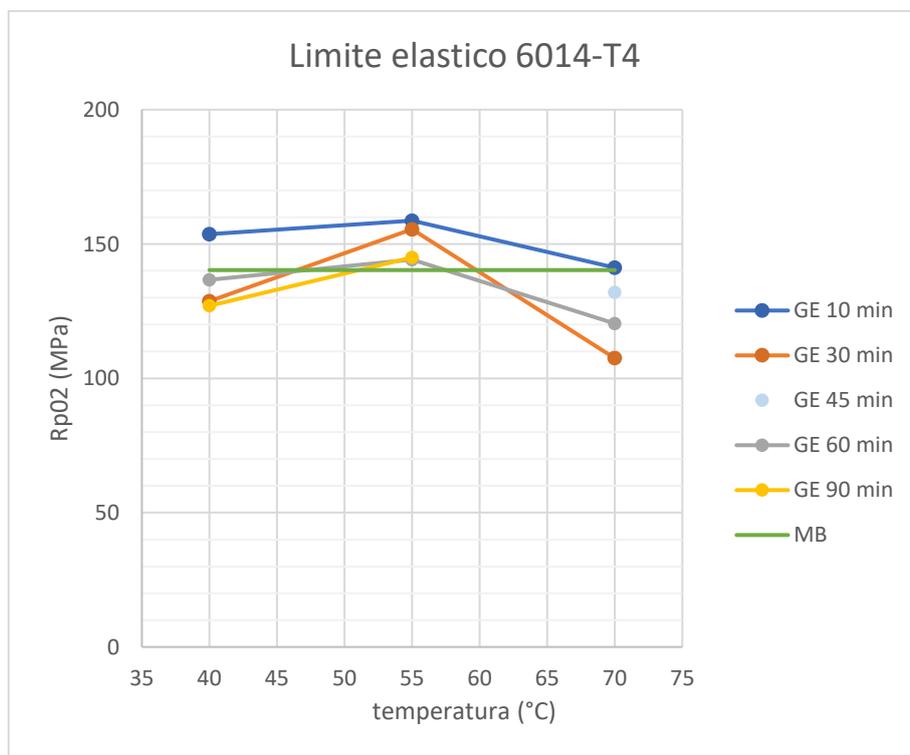


Grafico 22: Limite elastico 6014-T4



Grafico 23: Tensione massima 6014-T4

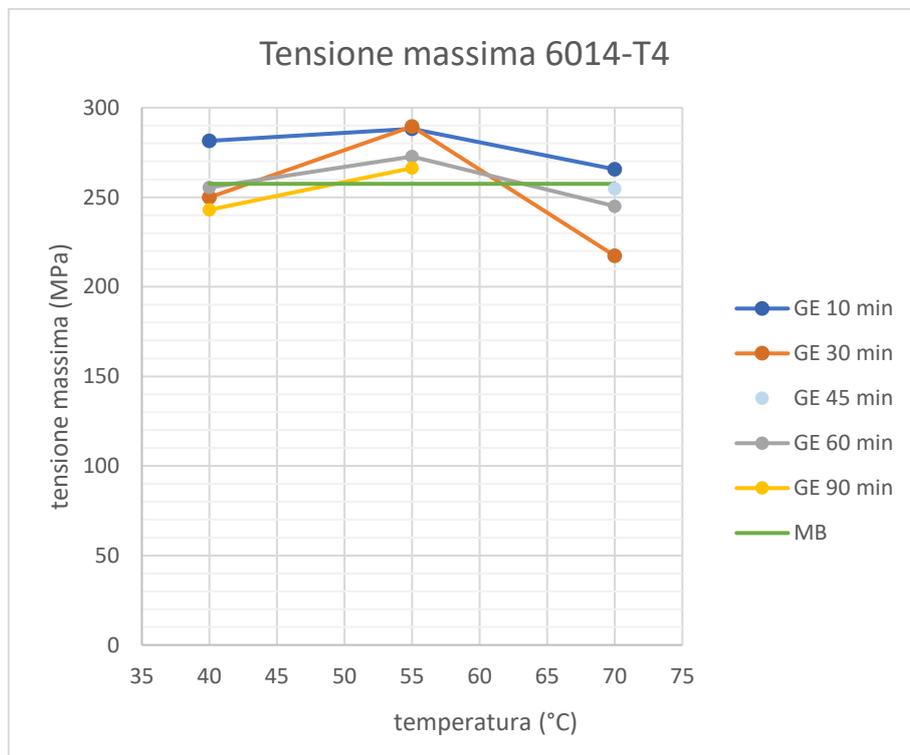


Grafico 24: Tensione massima 6014-T4

6. Discussione

Analisi metallografica

Tramite l'analisi metallografica effettuata sui due campioni non si sono riscontrate particolari variazioni di struttura tra il campione NT e il GE80. La superficie analizzata presenta grani di forma allungata a causa del processo di laminazione, questa caratteristica non varia dal NT al GE80. Entrambi i campioni presentano una serie di precipitati in corrispondenza dei bordi di grano, la loro distribuzione è omogenea in entrambi i casi. Non si nota alcuna differenza tra le zone interne e le zone esterne della superficie trattata, dunque si può dedurre che il trattamento di Green Etching[®] non modifica la struttura interna del campione essendo un trattamento superficiale. L'unica particolarità riscontrata è la presenza di una zona più lucida in corrispondenza della superficie del GE80, potrebbe essere un agglomerato di ossidi di alluminio ma sarebbe necessaria un'analisi XPS (X-rays Photoelectron Spectroscopy) che fornisca i dati relativi alla presenza di ossigeno. Anche in questo caso sarebbe utile analizzare la struttura metallografica di un numero maggiore di campioni e considerare anche il GE50 dove con un tempo maggiore di permanenza nel bagno si potrebbero riscontrare maggiori variazioni.

Per quanto riguarda le immagini della superficie ristretta scattate a basso ingrandimento (115x), si nota un evidente cambiamento. Nel provino NT si ha una superficie tipica delle lamiere ottenute per laminazione, questo giustifica la bassa rugosità. Invece nei provini GE50 e GE80 si nota la presenza di crateri generati dalla corrosione. Nei provini trattati non è più visibile il segno superficiale della laminazione infatti le rugosità misurate lungo le due direzioni (parallela e perpendicolare alla direzione di carico) coincidono. Non si notano eccessive differenze tra la superficie del GE50 e del GE80, dunque si può pensare che dopo una determinata durata di permanenza nel bagno la superficie corrosa rimanga più o meno invariata e gli effetti della corrosione siano maggiormente visibili nella prima parte del trattamento.

Rugosità

All'interno della ricerca sono stati misurati i valori di rugosità R_a , R_q , R_t , R_z . Le rugosità appena elencate danno un'informazione riguardo lo scostamento verticale del profilo dalla linea media del profilo stesso. Secondo le considerazioni fatte in precedenza, il trattamento chimico di Green Etching[®] dovrebbe ridurre la rugosità superficiale del campione. Nella lega 7075-T6 si è verificato esattamente il fenomeno opposto. Di seguito sono riportati i valori medi di rugosità.

- R_a ha un valore di 0,16 μm nel campione non trattato (NT), 1,45 μm nel trattato a 50 °C (GE50) e 1,30 μm nel trattato a 80 °C (GE80).
- R_q ha un valore di 0,20 μm nel NT, 1,82 μm nel GE50 e 1,63 μm nel GE80.
- R_t ha un valore di 1,36 μm nel NT, 11,51 μm nel GE50 e 10,22 μm nel GE80.
- R_z ha un valore di 1,02 μm nel NT, 8,97 μm nel GE50 e 9,47 μm nel GE80.

Per i valori di R_a , R_q e R_t si riscontra un aumento della rugosità durante il trattamento e in particolare alla temperatura più bassa. Ciò succede molto probabilmente a causa del tempo di permanenza nel bagno. Ricordando che il trattamento chimico è stato effettuato per ridurre lo spessore dei provini di 1 mm, per avere una uguale riduzione ad una temperatura di 50 °C sarà necessario un tempo di permanenza maggiore rispetto ad un bagno a 80 °C. L'efficacia di corrosione della soluzione au-

menta con l'aumentare della temperatura. Dunque, la rugosità di una lega di alluminio 7075-T6 tenderà ad aumentare se sottoposto a Green Etching® e in particolare ad elevati tempi di bagno. Questo andamento crescente della rugosità in funzione del tempo di permanenza nel bagno non si riscontra nell'ultimo caso. Infatti, la rugosità R_z tende ad aumentare all'aumentare della temperatura di bagno. Questo andamento di R_z potrebbe essere giustificato dal fatto che il trattamento prolungato (50 °C) riduce gli scostamenti verticali levigando i picchi del profilo. Nel complesso potrebbe essere conveniente un trattamento a 80 °C che impieghi meno tempo danneggiando meno la superficie.

Oltre alle rugosità appena viste, sono state analizzate le rugosità R_{sk} , R_{ku} , R_{Sm} . Queste ultime danno un'informazione riguardo la forma e le dimensioni delle valli e delle cime del profilo. Il trattamento di Green Etching® dovrebbe ingrandire le valli scavando il materiale tramite corrosione.

- R_{sk} ha un valore di -0,16 nel NT, -0,08 nel GE50 e -0,10 nel GE80.
- R_{ku} ha un valore di 3,23 nel NT, 3,13 nel GE50 e 3,04 nel GE80.
- R_{Sm} ha un valore di 49,65 μm nel NT, 93,77 μm nel GE50 e 99,15 μm nel GE80.

R_{sk} tende al valore 0 (profilo simmetrico rispetto alla linea media) con l'aumentare della durata di bagno (da NT a GE80, da GE80 a GE50). Il trattamento rende il profilo più simmetrico. Il profilo viene modificato dal caso b al caso a.

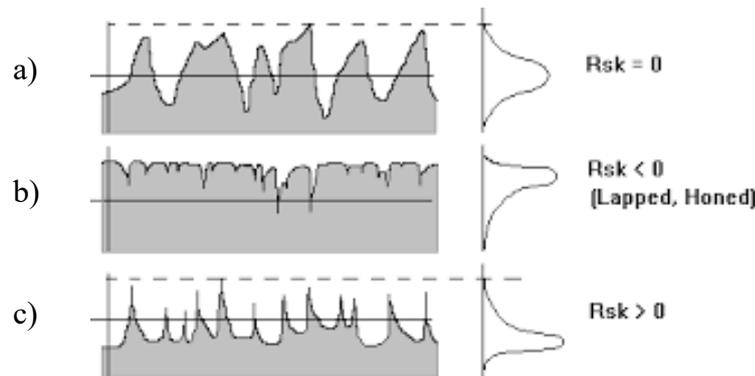


Figura 44: Rugosità R_{sk}

R_{ku} tende al valore 3 con l'aumentare della temperatura (da NT a GE50, da GE50 a GE80). Il trattamento arrotonda il profilo aumentando il raggio di curvatura delle punte dei picchi e del fondo delle valli. Il profilo viene modificato dal caso f al caso d.

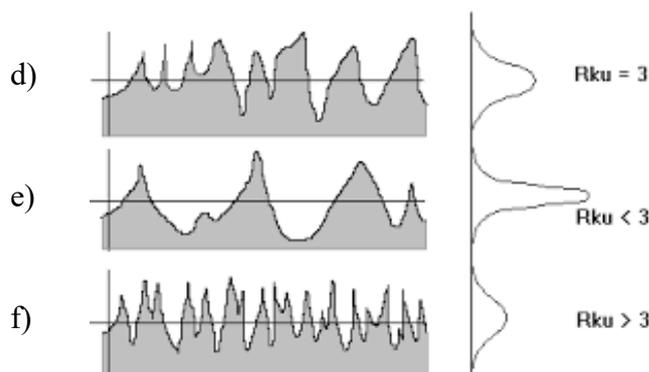


Figura 45: Rugosità R_{ku} [24]

R_{Sm} aumenta con l'aumentare della temperatura (da NT a GE50, da GE50 a GE80). Con temperature di trattamento più elevate si hanno valli con dimensioni orizzontali più elevate, allungate.

Dunque, considerando i valori R_{sk} e R_{ku} (forma profilo) il trattamento di Green Etching® tende ad arrotondare le valli e i picchi e rendere più simmetrico il profilo. Considerando invece le rugosità R_a , R_q , R_t , R_z e R_{Sm} (dimensioni valli e cime) il trattamento di Green Etching® tende ad aumentare lo scostamento del profilo dalla linea media (z) e ad aumentare la larghezza delle valli e delle cime.

Microdurezza

I valori di microdurezza Vickers sono stati misurati per due diversi campioni su zone differenti della superficie lucidata del campione. La zona interna corrisponde al cuore del campione, mentre la zona esterna è la regione in prossimità della superficie trattata chimicamente. Di seguito sono riportati i valori medi di microdurezza.

- Microdurezza di 110,2 HV nella zona esterna del NT
- Microdurezza di 111,8 HV nella zona esterna del GE80
- Microdurezza di 91,9 HV nella zona interna del NT
- Microdurezza di 98,1 HV nella zona interna del GE80

Si nota che la microdurezza del NT aumenta di 18,3 HV passando dalla zona interna alla zona esterna, di 13,7 HV quella del GE80. La zona superficiale presenta una microdurezza maggiore rispetto alla zona interna. Questa variazione molto probabilmente è dovuta all'incrudimento generato durante il processo di laminazione. Un comportamento interessante si nota invece paragonando i valori acquisiti su una stessa zona dei due campioni. Si nota che la microdurezza nella zona interna aumenta di 7,2 HV passando dal NT al GE80 e di 1,6 HV nella zona esterna. Quindi nel complesso il trattamento di Green Etching® tende ad aumentare la microdurezza del provino. La variazione è poco significativa (1,6 - 7,2 HV), per questo potrebbe essere utile uno studio più approfondito analizzando un numero maggiore di campioni e inserendo all'interno dell'analisi di microdurezza anche il campione GE50.

Prove di fatica

Le prove di fatica uniassiale effettuate secondo il metodo Stair-Case a tensione media di 100 MPa hanno generato un limite di fatica per ogni tipologia di provino. Il limite di fatica si riferisce ai tre diversi casi di probabilità di rottura del 50, 10 e 90 %. Di seguito sono riportati i valori di limite di fatica.

- $\sigma_{D(50\%)}$ ha un valore di 79,29 MPa nel NT, di 69,29 MPa nel GE50 e di 63,57 MPa nel GE80
- $\sigma_{D(10\%)}$ ha un valore di 61,76 MPa nel NT, di 51,76 MPa nel GE50 e di 56,79 MPa nel GE80
- $\sigma_{D(90\%)}$ ha un valore di 96,81 MPa nel NT, di 86,81 MPa nel GE50 e di 70,36 MPa nel GE80

Considerando i limiti di fatica di probabilità di rottura del 50% $\sigma_{D(50\%)}$ si ha una riduzione di 10 MPa dal NT al GE50 e successivamente una riduzione di 5,72 MPa dal GE50 al GE80. Un comportamento simile si riscontra all'interno del caso di probabilità di rottura del 90%. Questo andamento non si ripete nel caso 10% dove il GE50 presenta il valore minore.

Il limite di fatica maggiore con probabilità di rottura del 50% si riscontra nel NT in quanto possiede una rugosità minore. Si riduce nel GE50 e nel GE80, il secondo presenta il valore più basso. Considerando unicamente le due tipologie di provini trattati, il limite di fatica si riduce con la riduzione della rugosità R_a e con l'aumento di R_z . Quello ottenuto è un risultato abbastanza curioso. La rugosità influisce in maniera significativa sulle proprietà a fatica di un qualsiasi materiale, favorendone la nucleazione e propagazione di cricche superficiali. Per questo motivo sarebbe stato più coerente

un aumento del limite di fatica da GE50 a GE80 a causa della riduzione di rugosità Ra e dello smussamento del profilo della superficie, ma ciò non si è verificato. Il limite di fatica invece è stato influenzato dall'andamento della rugosità Rz calcolata come media dei valori di scostamento dei picchi e delle valli rispetto alla linea media.

Ciò nonostante, si percepisce una riduzione del limite di fatica a causa del trattamento di Green Etching® paragonando i risultati ottenuti dal NT con un quelli ottenuti da GE50 o GE80.

Prove di trazione

Le prove di trazione sono state effettuate su due diverse leghe di alluminio, la lega 5754-H111 e la lega 6014-T4. Di seguito sono riportati solo i valori di limite elastico R_{p02} e tensione massima σ_{max} del materiale base (MB) e del materiale trattato tramite Green Etching® nelle condizioni di temperatura di 70 °C e durata di permanenza nel bagno di 60 min (GE).

- R_{p02} ha un valore di 145 MPa nel 5754_MB, di 117 MPa nel 5754_GE
- R_{p02} ha un valore di 140 MPa nel 6014_MB, di 162 MPa nel 6014_GE
- σ_{max} ha un valore di 268 MPa nel 5754_MB, di 247 MPa nel 5754_GE
- σ_{max} ha un valore di 258 MPa nel 6014_MB, di 255 MPa nel 6014_GE

Dunque, secondo questa prima analisi la lega 6014 risponde in maniera positiva al trattamento incrementando R_{p02} di 22 MPa e riducendo σ_{max} di 3 MPa. Al contrario la lega 5754 peggiora le sue proprietà meccaniche riducendo sia R_{p02} che σ_{max} rispettivamente di 28 MPa e di 21 MPa.

Un risultato molto interessante si ha invece nelle condizioni di temperatura di 55 °C, nelle quali si rileva un picco in quasi tutte le diverse condizioni di durata di permanenza nel bagno. In particolare, per la lega 6014 R_{p02} e σ_{max} del materiale trattato a 55 °C (in alcune condizioni di durata di permanenza nel bagno) superano rispettivamente di circa 20 MPa e 30 MPa i valori del materiale base. Questa situazione non si verifica nella lega 5754, dove i valori di R_{p02} e σ_{max} del materiale trattato non superano mai quelli del materiale base

Ricordando che i risultati sono ottenuti da una media di 2 prove non si può stabilire con certezza che il trattamento di Green Etching migliora o peggiora le proprietà meccaniche delle leghe 5754 e 6014. Ma sicuramente la lega 6014 risponde meglio al trattamento rispetto alla lega 5754. Inoltre, una variazione delle condizioni di trattamento (temperatura del bagno e durata di permanenza nel bagno) sono meno influenti nella lega 5754 in quanto le curve rappresentative mantengono un andamento all'incirca costante. Questa condizione non si verifica nella lega 6014 dove l'andamento delle curve è più altalenante.

Servirebbe un numero maggiore di prove di trazione in modo tale da ridurre il più possibile l'incertezza dei risultati.

7. Conclusione

L'obiettivo di questa ricerca era quello di analizzare gli effetti del trattamento chimico superficiale Green Etching[®] su una lega di alluminio 7075-T6 ottenuta per deformazione plastica. Per fare questo sono state effettuate una serie di misure preliminari che ci hanno permesso di ottenere informazioni riguardo la struttura metallografica, la rugosità e la microdurezza. Queste misure sono state effettuate sui provini di materiale base (NT) e sui provini trattati (GE50 e GE80).

La struttura metallografica non è stata alterata dal trattamento in quanto il Green Etching[®] è un trattamento strettamente superficiale. Sia nel NT che nel GE80 sono presenti grani di forma allungata nella direzione di laminazione e precipitati nei bordi di grano distribuiti in maniera più o meno omogenea. Servirebbe uno studio approfondito tramite analisi XPS per investigare sulla presenza di ossidi sulla superficie.

La rugosità misurata ci ha permesso di capire in che modo agisce la corrosione superficiale. Il trattamento elimina completamente i segni della laminazione e in più genera una serie di crateri le cui dimensioni aumentano con l'efficacia di corrosione del bagno. Nel complesso la rugosità aumenta notevolmente durante il trattamento (da NT a GE) ma non si riscontrano grosse differenze tra i due trattamenti (GE50 e GE80).

Tramite le misure di microdurezza si nota che il trattamento non influisce sulla microdurezza del materiale. Le misure prese sui campioni di NT e di GE80 non si discostano di quantità significative e questo succede sia nella zona interna del campione che nella zona esterna in prossimità della superficie.

L'ultima analisi sulla lega 7075-T6 è stata effettuata tramite il metodo Stair-Case mantenendo una tensione media costante di 100 MPa e variando l'alternanza di 10 MPa dopo ogni prova. In questo modo è stato possibile analizzare in che modo il trattamento di Green Etching[®] andasse a modificare il comportamento a fatica della lega. Il metodo Stair-Case ha fatto emergere dei risultati molto interessanti, il trattamento di Green Etching[®] riduce il limite di fatica della lega di alluminio 7075-T6. Questo risultato è concorde con i valori di rugosità precedentemente ottenuti, una più elevata rugosità riduce la vita a fatica del provino e i provini GE presentano un limite di fatica ridotto rispetto ai provini NT. Il fenomeno di scostamento del profilo dalla linea media (aumento dell'altezza dei picchi, aumento della profondità delle valli) sovrasta il fenomeno di smussamento. Inoltre, si percepisce una ulteriore riduzione del limite di fatica con l'aumento della temperatura del bagno (da GE50 a GE80). I provini trattati ad una più elevata temperatura (GE80) presentano un limite di fatica ridotto rispetto ai provini trattati ad una temperatura minore (GE50). Non è possibile giustificare questo andamento in quanto considerando i valori di rugosità l'andamento sarebbe confermato unicamente da R_Z.

Infine, all'intero della ricerca sono stati inseriti i valori di limite elastico e tensione massima delle leghe di alluminio 5754-H111 e 6014-T4 ottenuti tramite prove di trazione. Nella lega 5754-H111 il Green Etching[®] ha ridotto i valori di R_{p02} e σ_{max} , tutti i valori si mantengono al di sotto dei valori del materiale base. Per quanto riguarda invece la lega 6014-T4, si è riscontrato un comportamento anomalo all'interno del quale particolari condizioni di trattamento generano un miglioramento delle proprietà meccaniche, aumento di R_{p02} e σ_{max} . A causa del numero ridotto di prove effettuate non si è in grado di dare informazioni dettagliate sugli effetti del Green Etching[®] sui valori di R_{p02} e σ_{max} .

In conclusione, è possibile affermare che il trattamento chimico superficiale di Green Etching[®] non migliora le proprietà meccaniche della lega di alluminio 7075-T6, ma al contrario ne peggiora il comportamento a fatica aumentando considerevolmente la rugosità superficiale. Nonostante tutto, bisogna considerare che la rugosità iniziale (NT) è molto ridotta in quanto ci riferiamo ad una lega

ottenuta per laminazione. Dunque, sarebbe interessante effettuare uno studio sull'effetto del trattamento applicato a leghe ottenute tramite colata o additive manufacturing dove la rugosità superficiale è decisamente più elevata.

Converrebbe inoltre utilizzare temperature più elevate durante il processo corrosivo in modo tale da ridurre la durata di permanenza nel bagno in quanto non si notano differenze significative negli effetti del trattamento nelle due diverse condizioni (GE50 e GE80). In questo modo si ridurrebbero notevolmente i tempi di produzione mantenendo più o meno invariati gli effetti del trattamento sulla lega.

Si potrebbe effettuare un'analisi più approfondita della struttura metallografica e della microdurezza analizzando un numero maggiore di campioni. Sarebbe necessario un ulteriore studio riguardo le proprietà della lega 7075-T6 tramite una serie di prove di trazione. Infatti, dallo studio effettuato sulle leghe di alluminio 5754-H111 e 6014-T4 è emerso che il Green Etching[®] non agisce allo stesso modo su leghe di diverso tipo.

Questa ricerca ci pone dunque due quesiti molto importanti: “cosa scegliere tra efficacia di un processo e rispetto dell'ambiente?” e “quali sono i limiti di una tecnologia green?”.

Rispondendo alla prima domanda, non si può e non si deve scegliere. Solo il tempo potrà risolvere questa divergenza in quanto tramite la ricerca e la sperimentazione si può procedere in entrambe le direzioni senza mai trascurare il processo, senza mai trascurare l'ambiente. Per quanto riguarda la seconda, i limiti di una tecnologia green si definiscono nel momento in cui si smette di sperimentare ed investire in essa. Nessuna ricerca è vana se ha come obiettivo il miglioramento del processo, un miglior controllo degli effetti e una riduzione degli sprechi.

8. Appendice rugosità

Qualsiasi superficie di ogni componente possiede una forma ed una finitura che variano in accordo con la struttura della superficie stessa ed al ciclo di lavorazione che l'ha generata. Tali caratteristiche possono essere separate in tre grandi categorie:

- Rugosità
- Ondulazione
- Forma

Per poter predire il comportamento del componente durante il normale utilizzo o per tenere sotto controllo il processo produttivo, è necessario quantificare queste caratteristiche delle superfici. Questa caratterizzazione avviene tramite i parametri di finitura superficiale. I parametri di rugosità più conosciuti ed utilizzati nelle lavorazioni meccaniche sono i parametri di ampiezza, rugosità Ra, Rq (Rms), Rt, Rz, i cui valori numerici sono espressi in μm .

Rugosità Ra

La rugosità Ra viene definita come valore medio aritmetico degli scostamenti (presi in valore assoluto) del profilo reale della superficie rispetto alla linea media. Quindi viene preso in esame il valore medio, espresso in micron, delle ordinate $y_1, y_2, y_3 \dots y_n$ del profilo rispetto alla linea media.

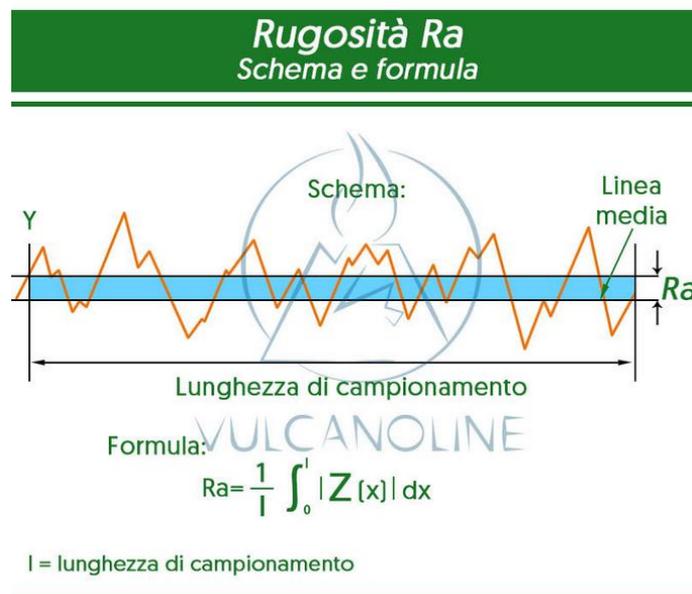


Figura 46: Rugosità Ra

Rugosità Rz

La rugosità Rz viene definita come la distanza tra due linee parallele alla linea media passanti mediamente fra i cinque picchi più alti e le cinque valli più basse, entro i limiti della lunghezza di base. Per calcolare il parametro Rz viene preso in esame il valore assoluto medio dell'altezza, Y_p ,

dei cinque picchi più alti misurati dalla linea media (quindi: y_{p1} , y_{p2} , y_{p3} , y_{p4} , y_{p5}), ed il valore assoluto medio dell'altezza, Y_v , delle cinque valli più profonde (quindi: y_{v1} , y_{v2} , y_{v3} , y_{v4} , y_{v5}), sommati assieme formano il parametro di rugosità R_z che in pratica è una media su dieci punti di irregolarità massima.

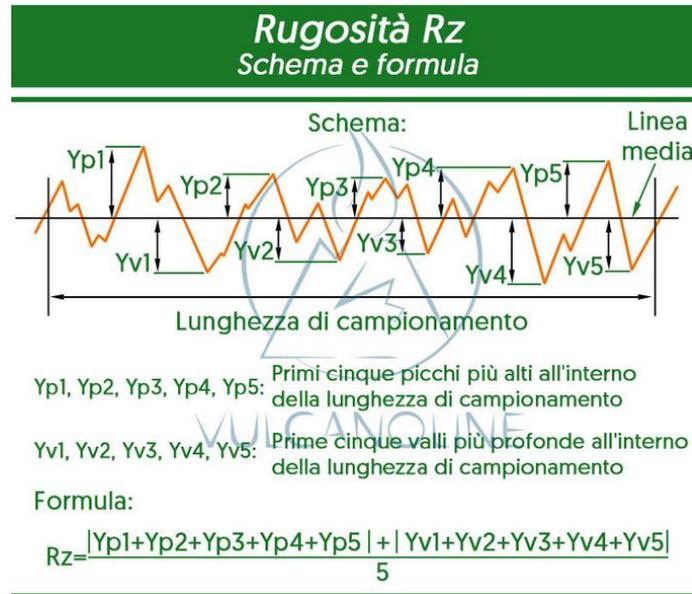


Figura 47: Rugosità R_z

Rugosità R_q

La rugosità R_q viene definita come media quadratica degli scostamenti dei punti del profilo dalla linea media. Il parametro R_q fornisce una gestione statistica semplice e consente risultati stabili in quanto il parametro non è influenzato in modo significativo da graffi e contaminazioni.

R_q è uno dei parametri più utilizzati e viene indicato anche come valore RMS.

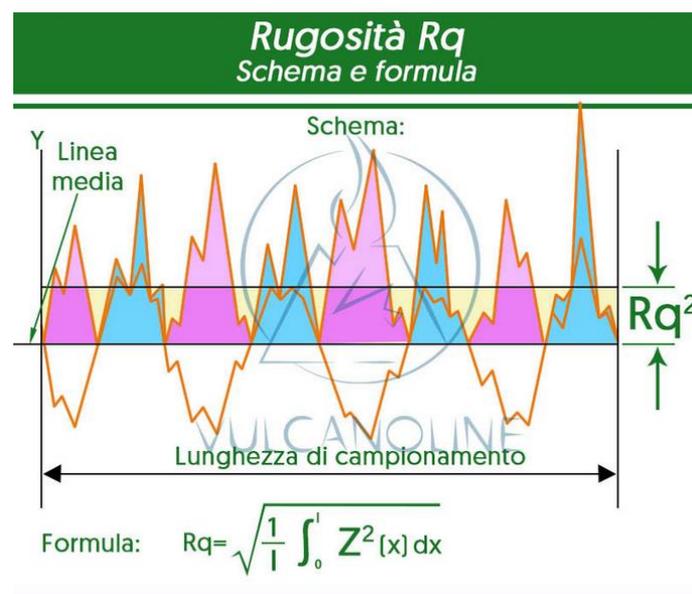


Figura 48: Rugosità R_q

Rugosità R_t

La rugosità R_t viene definita come la somma della massima altezza di picco (Z_p) e della misura massima della valle più profonda (Z_v) nella lunghezza di valutazione (non della lunghezza di campionamento).

Il parametro R_t è influenzato significativamente da graffi e contaminazioni a causa dell'utilizzo dei valori massimi (picco più alto e valle più profonda).

Nota: La relazione $R_t \geq R_z$ vale per tutti i profili.

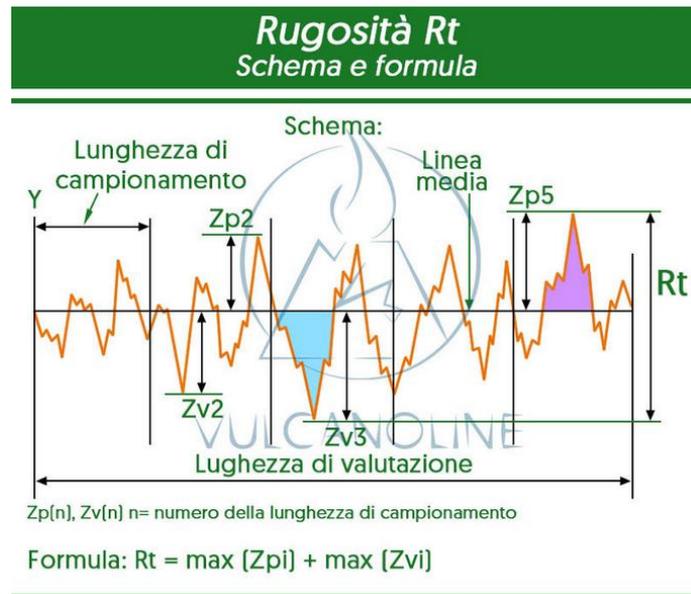


Figura 49: Rugosità R_t

I rugosimetri adottano molteplici parametri per definire la rugosità, tra questi vi sono le rugosità R_{sk} R_{ku} : parametri medi di ampiezza che prendono in esame caratteristiche verticali del profilo di rugosità rispetto alla linea media.

Rugosità R_{sk} – Skewness

La rugosità R_{sk} è la misura della simmetria del profilo rispetto alla linea media. Questo parametro adimensionale identifica le differenze di simmetria su profili aventi il medesimo valore di R_a o R_q .

$R_{sk} = 0$: simmetrico rispetto alla linea media (distribuzione normale)

$R_{sk} > 0$: deviazione al di sotto della linea media

$R_{sk} < 0$: deviazione sopra la linea media

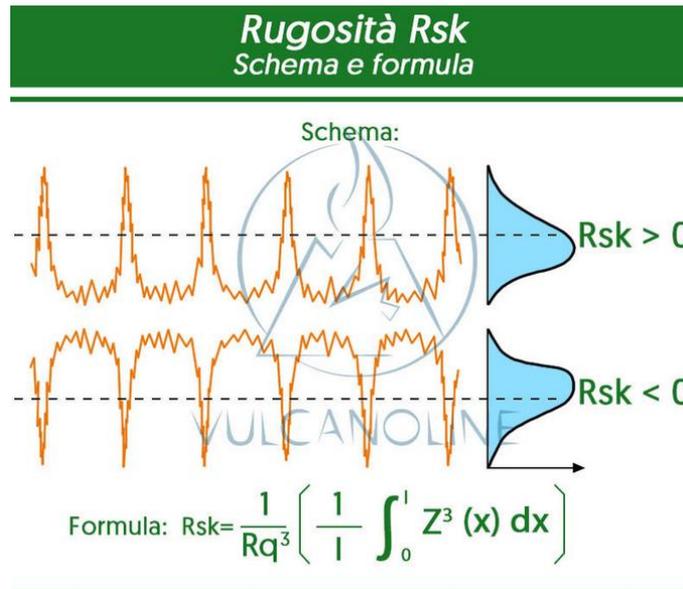


Figura 50: Rugosità Rsk

Rugosità Rku – Kurtosis

La rugosità Rku è il quoziente del valore quadratico medio di $Z(x)$ e la quarta potenza di Rq entro una lunghezza di campionamento. Questo parametro adimensionale misura dell'acutezza del profilo, si riferisce alla geometria della punta di picchi e valli ed è adottato per analizzare il grado di contatto tra due oggetti.

Rku = 3: distribuzione normale dei picchi e valli sulla lunghezza di campionamento

Rku > 3: distribuzione di picchi e valli nette ed appuntite sulla lunghezza di campionamento

Rku < 3: la distribuzione di picchi e valli uniforme sulla lunghezza di campionamento

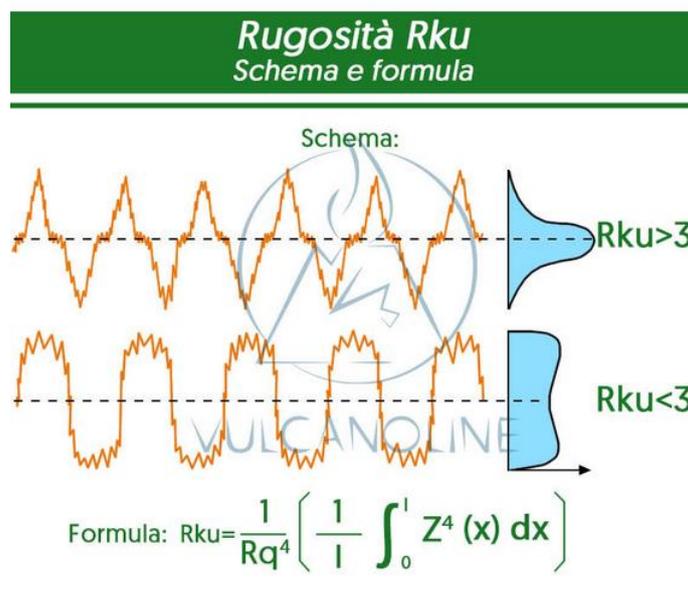


Figura 51: Rugosità Rku

I parametri di spaziatura (rugosità R_{Sm} R_{HSC} R_{Pc}) misurano le caratteristiche orizzontali delle deviazioni della rugosità superficiale. I parametri di spaziatura sono molto importanti in alcune operazioni di produzione, come ad esempio la lavorazione della lamiera d'acciaio. Uno dei parametri di spaziatura principalmente verificato è la spaziatura dei picchi, che può essere un fattore importante nelle prestazioni delle superfici di attrito. Controllando i parametri di spaziatura è possibile ottenere una migliore uniformità.

Rugosità R_{Sm} – Larghezza media

La rugosità R_{Sm} rappresenta la media della lunghezza (X_s) degli elementi del profilo misurati sulla linea media all'interno della lunghezza di campionamento. Questo parametro viene utilizzato per valutare le dimensioni orizzontali di solchi paralleli al posto dei parametri di altezza [25].

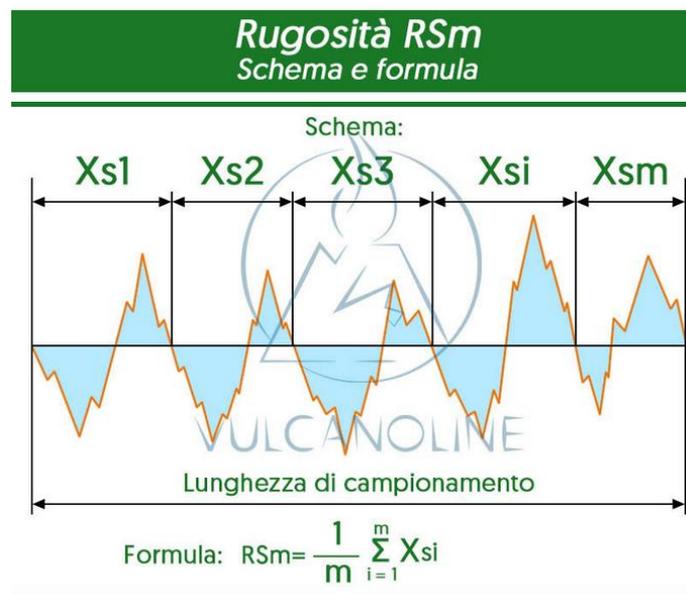


Figura 52: Rugosità R_{Sm}

9. Bibliografia

3. Çakır O. (2007). Chemical etching of aluminium. Department of Mechanical Engineering, Dicle University, 21280 Diyarbakir, Turkey.
4. Monno M.. Asportazione di materiale: principali metodi tradizionali e innovativi di lavorazione.
5. Tajally M., Emadoddin E. (2010). Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets. Dept. of Materials, Faculty of Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
6. Mahathaninwonga N., Plookphola T., Wannasina J., Wisutmethangoon S. (2011). T6 heat treatment of rheocasting 7075 Al alloy. Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand.
7. Li J., Peng Z., Li C., Jia Z., Chen W., Zheng Z. (2007). Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminum alloy with various aging treatments. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China
8. Smithells C. J. (2004). Metals Reference Book (Eighth Edition). Metallography.
15. Antonelli D. (2006). Sistemi di produzione – Lezione A4.
17. Si-Plan Electronics Research Ltd: vibrophore Amsler 10 HFP 422.
18. Lampman S. R. (1996). Fatigue and fracture ASM Volume 19.
19. UNI 3964 (1985). Prove meccaniche dei materiali metallici. Prove di fatica a temperatura ambiente. Principi generali.
20. Dixon W. J., Mood A. M. (1948). A method for obtaining and analyzing sensitivity data. Journal of the american statistical association.
24. Concheri G. (2007). GPS – Stato della superficie: Definizioni e indicazioni sui disegni. Università degli studi di Padova.

10. Sitografia

1. Agenzia europea dell'ambiente. Industria. www.eea.europa.eu/it/themes/industry/intro.
2. Simet S.r.l.. www.simet-torino.it.
9. Remet. Troncatrici. www.remet.it/it/solidografia/metallografia/troncatrici/medio.
10. Leco. Presse inglobatrici. www.leco.com/products/metallography-science/mounting/pr36-mounting-press.
11. Remet. Lucidatrici. www.remet.it/?p=1919.
12. Leica. Prodotti. www.leica-microsystems.com/it/prodotti.
13. Reichert-Jung MeF3. www.qsl.net/k/k0ff/Home%20Lab/Main%20Microscope%20Table/Microscope%20Manuals/Reichert/Me%20F/Me%20F3/.
14. RTP80 Metrology System, portable roughness tester. www.sm-instruments.com/en/products/roughness-testers/rtp-80.
16. Remet. Microdurometri. www.remet.it/it/solidografia/metallografia/microdurometri.
21. MakeItFrom. Lega di alluminio 5754. www.makeitfrom.com/material-properties/5754-AlMg3-3.3535-A95754-Aluminum.
22. MakeItFrom. Lega di alluminio 6014. www.makeitfrom.com/material-properties/6014-AlMg0.6Si0.6V-A96014-Aluminum.
23. Instron. 8801. www.instron.it/it-it/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems/servo-hydraulic-fatigue/8801-floor-model.
25. Vulcanoline. Rugosità. www.vulcanoline.it.