



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli studi di Padova
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Triennale in
Ingegneria dell'energia

Relazione per la prova finale

*Influenza della corrente elettrica sui
processi di sovrainvecchiamento e
solubilizzazione di lega alluminio 6061*

Tutor universitario
Prof.essa Irene Calliari

Laureando
Michele Piccirelli
n° matricola 1223793

Anno Accademico 2021 / 2022

Indice

Indice.....	- 2 -
Sommario	- 3 -
Capitolo 1: Alluminio 6061-T6.....	- 4 -
1.1 Le leghe di alluminio.....	- 4 -
1.2. Composizione chimica	- 4 -
1.3. Meccanismi di rafforzamento.....	- 5 -
1.4. Sequenza di precipitazione in AA-6061.....	- 6 -
Capitolo 2: Ruolo della corrente elettrica.....	- 9 -
Capitolo 3: Strumenti e materiali	- 10 -
3.1. Forma dei campioni.....	- 10 -
3.2. Trattamenti in forno	- 10 -
3.3. Trattamenti con DC.....	- 11 -
3.4. Prove di durezza.....	- 12 -
3.5. Misure delle dimensioni della grana	- 12 -
Capitolo 4: Trattamenti effettuati e analisi dati raccolti.....	- 14 -
4.1. Campione tale e quale	- 14 -
4.2. Trattamenti in forno a muffola	- 15 -
4.3. Trattamenti con corrente continua.....	- 16 -
4.4. Dati ottenuti e osservazioni	- 19 -
Conclusione.....	- 22 -
Bibliografia	- 23 -

Sommario

L'obiettivo principale della tesi è di analizzare il comportamento della lega di alluminio 6061 ai trattamenti di invecchiamento e solubilizzazione e di tracciare un confronto parallelo dei trattamenti tradizionali con i trattamenti con corrente elettrica, e di osservare le differenze in termini di durezza.

Prima vengono brevemente presentate le caratteristiche del materiale utilizzato (AA-6061 T6), poi viene brevemente introdotta la bibliografia già presente attinente all'argomento, infine vengono esposti i metodi e i risultati ottenuti dai test effettuati.

Questi ultimi sono trattamenti termici a diverse temperature, prima con metodo tradizionale (riscaldamento in forno a muffola) e poi con trattamento esclusivo con corrente elettrica continua. Vengono quindi misurate le durezza e confrontate.

Dai dati raccolti si deduce che la presenza della corrente elettrica influenzi i processi di sovrainvecchiamento e di solubilizzazione, in quanto questi accadono precocemente (a temperatura minore) rispetto al trattamento convenzionale, anche se non si ha certezza su quali siano le precise cause.

Capitolo 1: Alluminio 6061-T6

1.1 Le leghe di alluminio

L'alluminio è il secondo metallo più abbondante sulla crosta terrestre, e il suo ruolo nella società moderna è cardinale. È malleabile, leggero, è un eccellente conduttore e ha struttura cristallina CFC. Le sue proprietà meccaniche possono essere migliorate grazie all'aggiunta di altri elementi in lega. Le leghe di alluminio sono da molti anni ampiamente apprezzate e utilizzate in molti settori, tra i quali l'aeronautica, l'automotive, l'edilizia terrestre e marina, grazie all'eccellente rapporto di resistenza-peso e la buona resistenza alla corrosione. [1]

A seconda degli elementi che vengono messi in lega con l'alluminio esso acquista proprietà diverse.

La prima classificazione delle leghe di alluminio si basa sul processo di lavorazione: bisogna distinguere tra leghe da colata e leghe da deformazione plastica. Le leghe da deformazione plastica, a loro volta, si distinguono in base alla loro composizione. (Tabella 1). [2].

Serie	Principali elementi alliganti
1xxx	(Alluminio con purezza minima 99.00%)
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg Si
7xxx	Zn
8xxx	Altre leghe

Tabella 1: Famiglie di leghe da deformazione plastica

La lega presa esame è la 6061-T6, una lega molto utilizzata della serie 6xxx.

1.2. Composizione chimica

La caratteristica principale della lega 6061 è la presenza di Mg e Si come principali elementi alliganti. La ANSI (American National Standard Institute) riporta la norma di composizione (% di peso) per lega di alluminio 6061. [2]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Altri elementi non specificati (tot)	Altri elementi non specificati (caduno)
0,40-0,80	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	0,15	0,05

1.3. Meccanismi di rafforzamento

L'obiettivo predominante nella progettazione delle leghe di alluminio è quello di aumentarne la forza, la durezza e la resistenza all'usura, al creep, allo sforzo e alla fatica. Gli effetti su queste proprietà sono specifici delle diverse combinazioni di elementi di lega, dei loro diagrammi di fase e delle microstrutture di solidificazione, della storia termomeccanica, del trattamento termico e/o della lavorazione a freddo. [2]

La norma (ASTM) specifica le modalità del trattamento termico per lega 6061-T6 (per sheet, bare o Alclad): si esegue una ricottura di solubilizzazione a 516°C/579°C (tempo di mantenimento dipende dalle dimensioni del pezzo), poi una tempra a temperatura massima 43°C (T4) seguita da trattamento termico per la precipitazione (invecchiamento artificiale) a temperatura di 160°C per 18 ore (T6). [3].

Il trattamento di solubilizzazione prevede il riscaldamento al di sopra delle temperature critiche, la permanenza per un determinato periodo di tempo e una rapida tempra. La tempra viene effettuata per intrappolare i costituenti disciolti nella matrice.[1]

Durante il trattamento di invecchiamento, la supersaturazione degli atomi di soluto nella matrice di alluminio si riduce gradualmente, e gli elementi alliganti precipitano.

Il controllo della precipitazione durante l'invecchiamento artificiale è fondamentale per ottenere proprietà meccaniche ottimali delle leghe. [4] [2]

Quando le dislocazioni sono ancorate o intrappolate da cluster coerenti, la lega viene notevolmente rafforzata e indurita. Tuttavia, se i precipitati sono semicoerenti (condividono con la matrice un'interfaccia contenente dislocazioni), o incoerenti (condividono con la matrice un'interfaccia disordinata, simile a un confine di grano a grande angolo) una dislocazione può aggirare le particelle solo incurvandosi in una forma approssimativamente semicircolare tra di esse sotto l'azione di uno sforzo di taglio applicato, come illustrato in Figura 1. [2] [5]

Questo è il caso quando si effettua un trattamento di invecchiamento troppo spinto: i precipitati che prima erano coerenti e/o semi-coerenti possono accrescere le loro dimensioni e quindi diventare incoerenti, causando, ad esempio, una drastica riduzione di durezza.

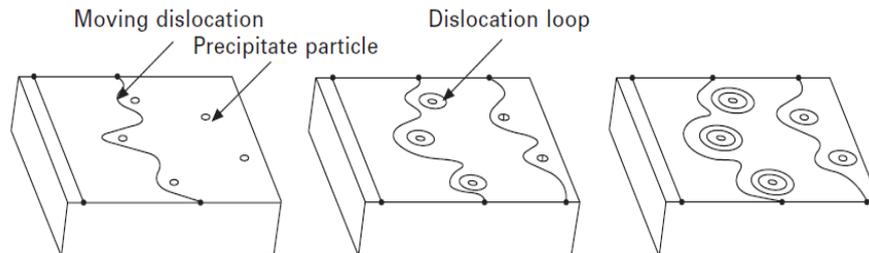


Figura 1: Meccanismo di Orowan

1.4. Sequenza di precipitazione in AA-6061

Il trattamento T6 su AA-6061 mira ad aumentare notevolmente le caratteristiche meccaniche, in particolare ad avere massima durezza e massima tensione di snervamento per la precipitazione dei soluti.

Una sequenza di precipitazione generalmente accettata per una lega Al-Mg-Si trattata con solubilizzazione, tempra e l'invecchiamento artificiale può essere generalmente descritta come segue:

soluzione solida sovrasatura → zone G.P. → precipitati β'' metastabili → precipitati β' metastabili → fase β stabile.

Questa sequenza di precipitazione è stata osservata per la maggior parte delle leghe Al-Mg-Si, studiate in un intervallo di temperature relativamente ampio. [4]

L'inizio dell'indurimento si ha con la formazione delle zone GP, che avviene prima con le zone GP1 e poi con le zone GP2.

In questa fase gli atomi degli elementi leganti formano un gran numero di piccoli cluster (fino a 10^{18} per cm^3) lunghi 10-50 nm e spessi solo uno o due piani atomici. La Figura 2 mostra le zone GP ricche di rame in una lega di alluminio utilizzata nelle strutture degli aerei. [5] In generale, si crede che le zone di G.P. nelle leghe Al-Mg-Si abbiano una forma sferica e siano completamente coerenti con la matrice. [4]

Le particelle poi crescono rapidamente lungo la direzione Al $\{100\}$ in forma aciculare, (la struttura di base sono pilastri di Si_2) di lunghezza compresa tra 2 e 6 nm e larghezza di 2 nm. Esse

determinano un aumento della durezza della lega. Successivamente, si trasformano in aghi lunghi in media 18 nm, senza aumentare di larghezza.

Con il proseguimento della ricottura, gli aghi crescono piuttosto lentamente e non cambiano in modo significativo in larghezza.

Continuando la ricottura, compaiono aghi più grossi di 4nm di larghezza e la durezza diminuisce lentamente. Le particelle della fase finale di tempra sono state identificate come fase Mg_5Si_6 (β''), e sono metastabili generalmente coerenti con la matrice. A temperature basse (circa 70/80°C) la nucleazione di particelle di $Mg_2Si_2Al_7$ e in particolare l'ulteriore evoluzione in $Mg_{2+x}Si_{2+y}Al_{7-x-y}$ rallenta, o addirittura diventa impossibile. [6]

La fase successiva alla fase β'' è la fase β' , ancora metastabile, con forma a bastoncino. Si allinea lungo la direzione Al $\langle 100 \rangle$, e ha struttura esagonale compatta.

La fase β di equilibrio compare nelle fasi di sovrainvecchiamento. Ha una struttura CFC di tipo CaF_2 e appare come piastrine lungo i piani Al $\{100\}$, ed è incoerente con la matrice, [4] quindi è causa di indebolimento.

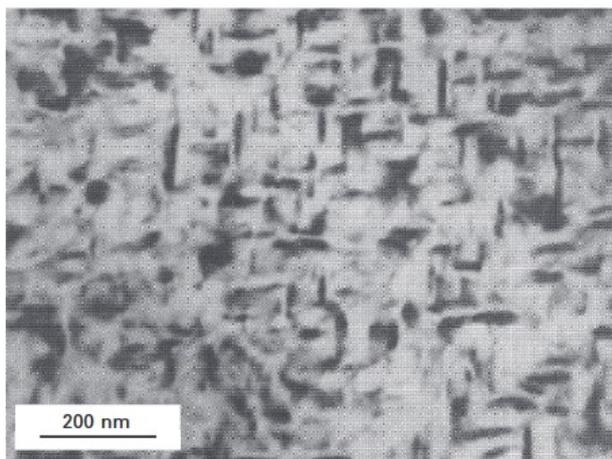


Figura 2: Zone di Guinier-Preston (particelle scure)

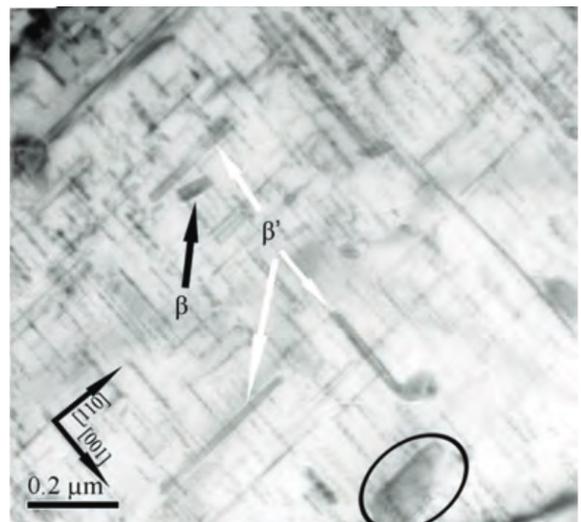


Figura 3: Immagine al TEM di lega serie 6xxx. La particella all'interno del cerchio mostra come una piastra (fase β) si sviluppi da un'asta (fase β') attraverso la crescita in direzione normale alla lunghezza dell'asta.

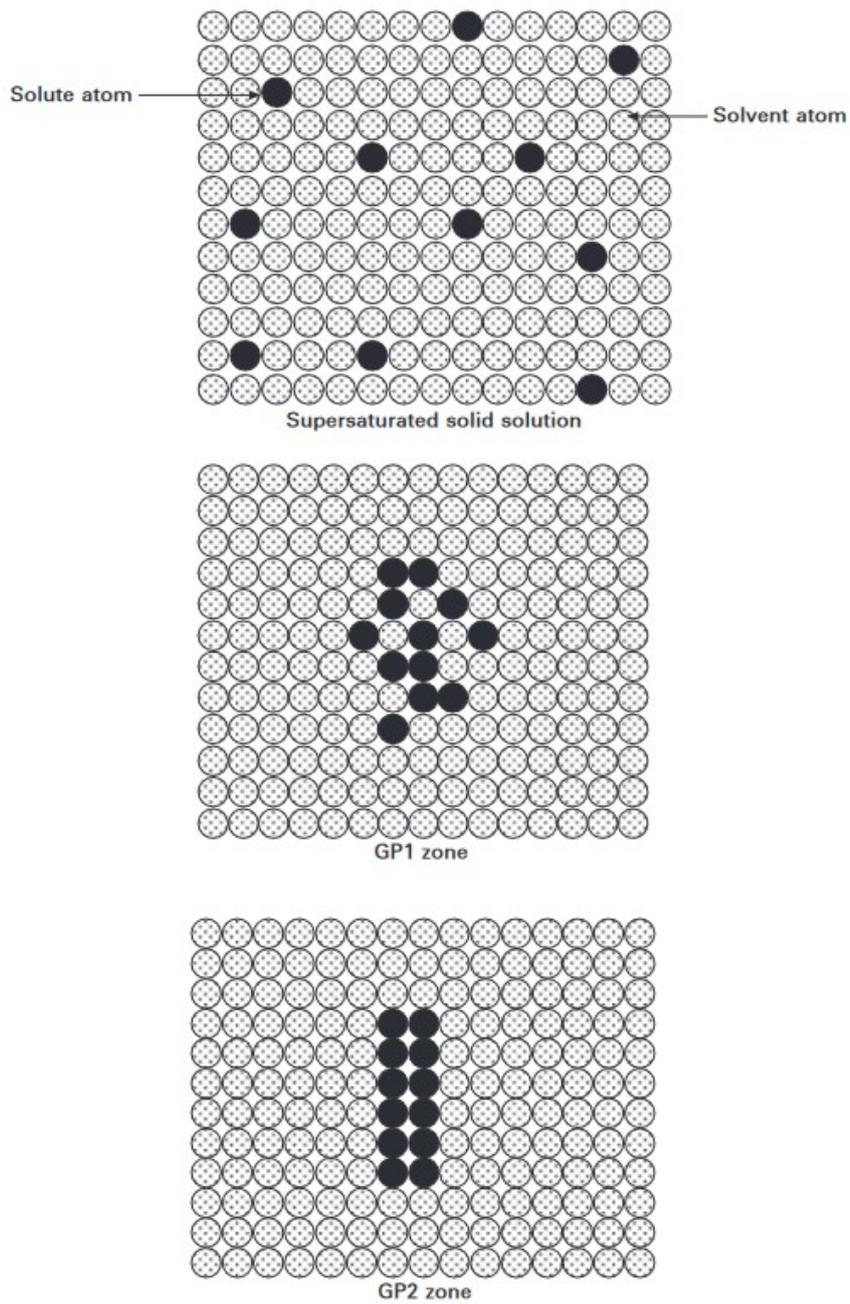


Figura 4: Schema di formazione di zone di Guinier–Preston

1

¹ La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è tratta da Zlateva and Z. Martinova, *Microstructure of metals and alloys*, CRC Press, Boca Raton, 2008.

La Figura 3 è tratta da [4]

La Figura 4 è tratta da [5]

Capitolo 2: Ruolo della corrente elettrica

Il trattamento termico della lega di alluminio è generalmente condotto in apparecchiature di riscaldamento tradizionali, tra cui i forni ad aria. La loro integrazione con i processi di formatura per le strutture in lega di alluminio richiede un sistema complesso di lavorazione e presenta molti svantaggi, tra cui: un elevato consumo energetico, un elevato investimento in attrezzature, una bassa efficienza, e un limite alle dimensioni del pezzo da trattare.

Ad esempio, il trattamento di solubilizzazione richiede una temperatura di 450 °C per 2 ~ 3 ore. L'invecchiamento richiede una temperatura di 120 °C per diverse ore.

Pertanto, è necessario sviluppare nuove tecnologie di trattamento termico. [8]

Tra le nuove tecnologie figurano quelle elettricamente assistite (EAP > Electrically assisted process), e varie ricerche ne evidenziano i vantaggi.

I meccanismi in gioco negli EAP sono complessi, e vari articoli scientifici dimostrano che la corrente elettrica ha effetti sulla struttura del materiale, però lo studio degli effetti individuali non è semplice, infatti, avvengono contemporaneamente molti fenomeni quali il riscaldamento per effetto Joule, il vento elettrico, la dissoluzione dei legami metallici per effetto della corrente elettrica, e gli effetti magnetici, tra cui l'effetto pelle, le interazioni tra dislocazioni e campo magnetico. [8]

Dong et. Al [8] fanno un sommario del ruolo della corrente elettrica nel trattamento termico e nella formatura di lastre di alluminio.

È stato dimostrato che, in leghe di alluminio Mg-Li, rispetto al tradizionale trattamento termico, l'effetto Joule può portare a maggiori temperature in scala microscopica vicino alle vacanze. Ciò significa che viene fornita maggiore energia per la diffusione delle vacanze e il movimento delle dislocazioni, e che a parità di tempo la temperatura necessaria per raggiungere la massima resistenza sia minore. [9]

Per quanto riguarda la letteratura presente per 6061, è stato dimostrato che l'applicazione di DC o AC durante l'omogeneizzazione può favorire in modo significativo la dissoluzione delle fasi AlFeSi e Mg₂Si. [10]

È stato anche studiato l'effetto della corrente pulsata (EPT): rispetto al trattamento convenzionale di solubilizzazione, il trattamento con corrente pulsata migliora molto il tasso di dissoluzione. L'analisi mostra che le dimensioni dei grani ricristallizzati dei campioni EPT sono più fini e uniformi rispetto ai campioni trattati convenzionalmente. [11]

Capitolo 3: Strumenti e materiali

3.1. Forma dei campioni

Tutti i test elencati sono stati effettuati su provini di lega di alluminio 6061, ricavati da lamiere di spessore 1 mm (vedasi Figura 5: Forma campione). Per i test che sono stati effettuati in forno, sono stati sezionati dei provini più piccoli dalla parte centrale, ottenendo così rettangolini di dimensione 1,5cm x 1cm x 1mm. Il motivo di questa scelta è per avere più provini a disposizione, e questi ultimi, date le dimensioni ridotte, hanno meno inerzia termica; perciò, si riscaldano e si raffreddano più velocemente e più uniformemente; quindi, è più facile ottenere una tempra ad aria forzata uniforme per i provini in uscita dal forno a muffola.

Per i trattamenti effettuati con DC sono stati utilizzati i campioni interi.

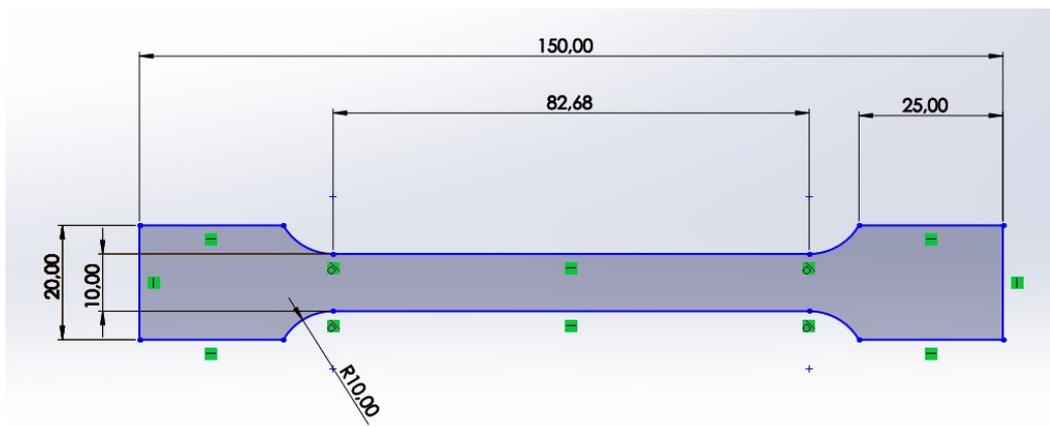


Figura 5: Forma campione

3.2. Trattamenti in forno

I trattamenti di sovrainvecchiamento-ricottura tradizionali sono stati effettuati presso i laboratori di Ingegneria dei Materiali dell'Università di Padova.

È stato usato il forno a muffola, che è dotato di termocoppia interna per la misura della temperatura (posta tra le resistenze del forno). Successivamente è stata utilizzata un'altra termocoppia, di tipo K, saldata su un campione "fantoccio" uguale a quelli utilizzati per misurare la temperatura sul il mattone refrattario dove veniva posato il campione effettivo.

3.3. Trattamenti con DC

I test con corrente continua si sono svolti presso i laboratori di Ingegneria Meccanica dell'Università di Padova. I campioni sono stati fissati su macchina per trazione (Figura 6), sia per supporto, sia per tenerli in leggera tensione, evitando che durante i rapidi riscaldamenti il campione si deformi a causa degli sforzi interni causati dalla dilatazione termica, provocando una deformazione e un cambiamento indesiderato nelle caratteristiche di durezza del materiale.

A questo scopo, la macchina per prove di trazione è stata impostata per mantenere il provino a tensione costante di 0,070kN. Sapendo che la sezione del campione è 1cm x 1mm è immediato calcolare che il campione viene sottoposto a tensione costante di 7MPa.



Figura 6: Macchina per prove di trazione



Figura 7: Dettaglio ganasce

Le teste del provino vengono quindi fissate sulle ganasce (Figura 7).

Da notare che per il passaggio di corrente elettrica è necessario che il campione sia fissato da ganasce in materiale conduttivo; infatti, sono realizzate in rame; questo però rappresenta un problema perché causa dispersione di calore, soprattutto alle estremità del campione.

I campioni sono stati colorati con apposita vernice nera per avere una lettura più precisa dalla termocamera (lo spettro di emissione si avvicina di più a quello ideale di un corpo nero).

Durante la prova sono stati filmati i campioni con la termocamera e così sono state ricavate le curve tempo/temperatura dei provini in vari punti della loro lunghezza.

3.4. Prove di durezza

Per effettuare le prove di microdurezza i campioni sono stati tutti elettrolucidati con Struers, LectroPol-5, ed elettrolita Struers A2. Questo non altera le durezze per incrudimento superficiale, come potrebbe avvenire nel caso in cui si facesse una convenzionale lucidatura con carte e poi con sospensioni di polvere di diamante.

Le prove di durezza sono state effettuate con metodo Vickers, con carico 0,5 kgf, per 15 secondi di applicazione, tutte un'ora dopo che il campione viene rimosso dal forno/macchina per trazione.

3.5. Misure delle dimensioni della grana

Per rivelare i bordi grano abbiamo è stato usato il reagente di Weck. La composizione è: 4 g di KMnO_4 , 1 g di NaOH in 100 mL di acqua distillata. Il tempo consigliato per la prova è di 12 secondi, anche se si è dimostrato più efficace fare brevi immersioni ripetute (circa 5 secondi) e controllare il campione, fino ad avere una colorazione giallo acceso. [12]

La misura della grana è stata effettuata conformemente alla norma ASTM con metodi mediante intersezioni lineari:

$$D = \frac{L}{N}$$

dove D è la dimensione media dei grani, L è la lunghezza nota su un segmento nell'immagine del campione, e N è il numero di grani intersecati dal campione.

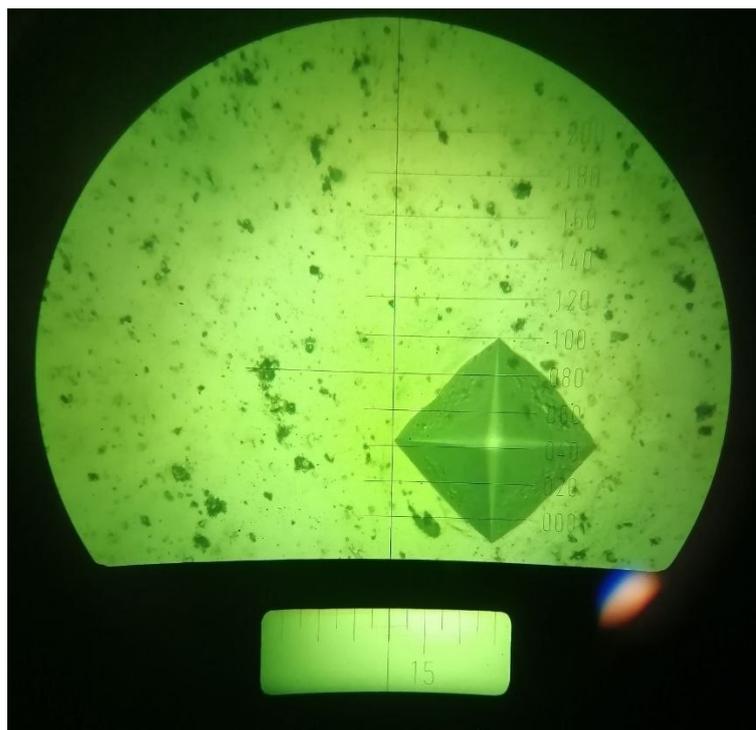


Figura 8: Impronta di prova di microdurezza Vickers. Vista all'oculare del microscopio.



Figura 9: Grana cristallina di campione TQ attaccato con Weck.

Capitolo 4: Trattamenti effettuati e analisi dati raccolti

4.1. Campione tale e quale

Una prima analisi è stata effettuata sul campione tale e quale. Suddetto campione viene lucidato e attaccato con reagente di Weck per calcolare le dimensioni dei grani (Figura 9). Successivamente un altro campione viene lucidato e viene misurata la durezza tramite prova Vickers, poi viene analizzato al SEM del Laboratorio di ricerca di Metallurgia di UNIPD. Tramite l'analisi degli elettroni di backscattering è stata studiata la composizione della matrice e dei precipitati. Fasi con numero atomico più elevato compariranno più chiare, mentre quelle con uno minore appariranno più scure.

Si può notare che il precipitato sia ricco in Si e Mg, ma siano anche presenti impurità come Fe. Si ipotizza che quindi sia presente una fase di AlFeSi (Spettro 2), insieme agli altri precipitati (la fase Mg_2Si dovrebbe apparire più scura).

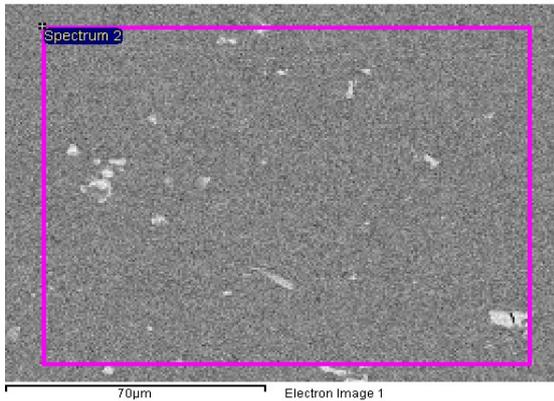


Figura 10: Immagine al SEM della matrice di 6061. Si può notare l'area sulla quale è stata misurata la composizione.

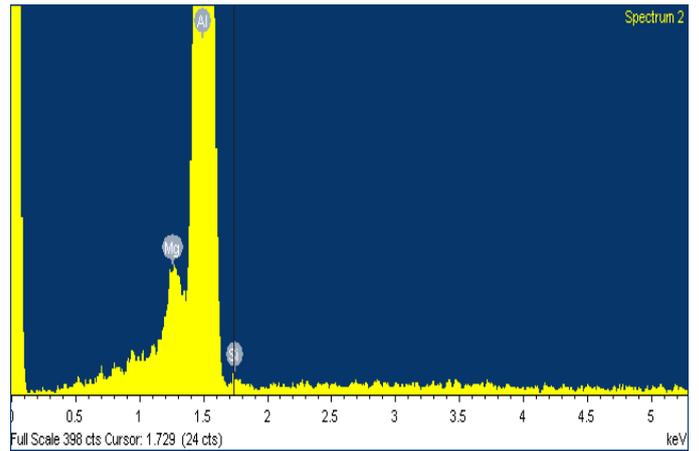


Figura 11: Composizione relativa allo Spettro 2

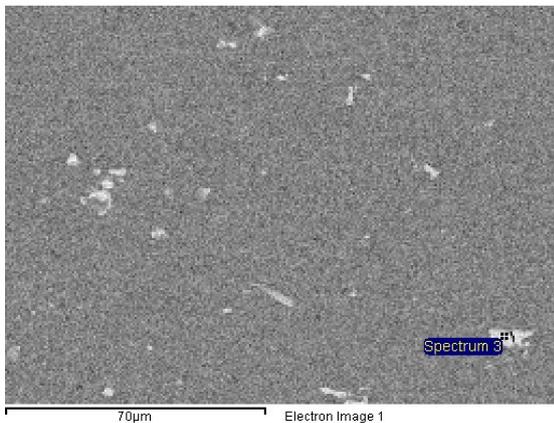


Figura 12: Lo spettro 3 deriva dall'elemento evidenziato dal puntatore

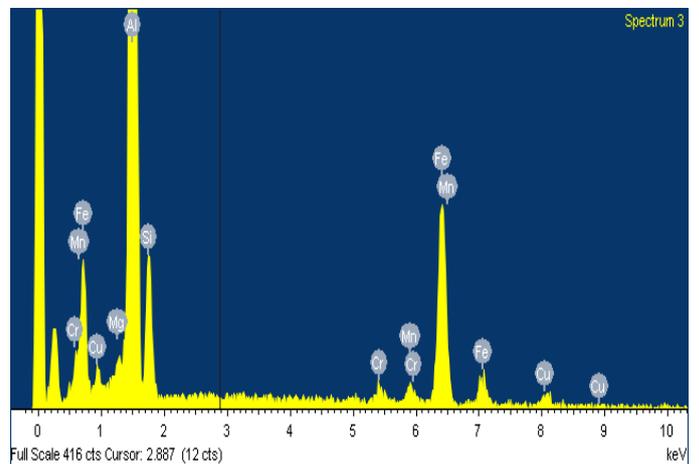


Figura 13: Composizione relativa allo Spettro 3

4.2. Trattamenti in forno a muffola

Prima vengono effettuati 5 test a 5 diverse temperature (200, 300, 400, 500, 550°C) ciascuno con tre campioni per tre diversi tempi di permanenza (5, 10 e 20 min). In uscita i campioni (di dimensione 1,5cm x 1cm x 1mm) vengono temprati con aria forzata a temperatura ambiente (circa 20°C). Viene poi misurata la durezza dei campioni un'ora dopo il trattamento. Durante il tempo di attesa i campioni rimangono a temperatura ambiente.

Da questi trattamenti si è verificato che i diversi tempi di permanenza nel forno, essendo vicini tra loro, non modificano significativamente i valori di durezza dei campioni, e che il maggior discriminante è la temperatura di permanenza. [Figura 14]

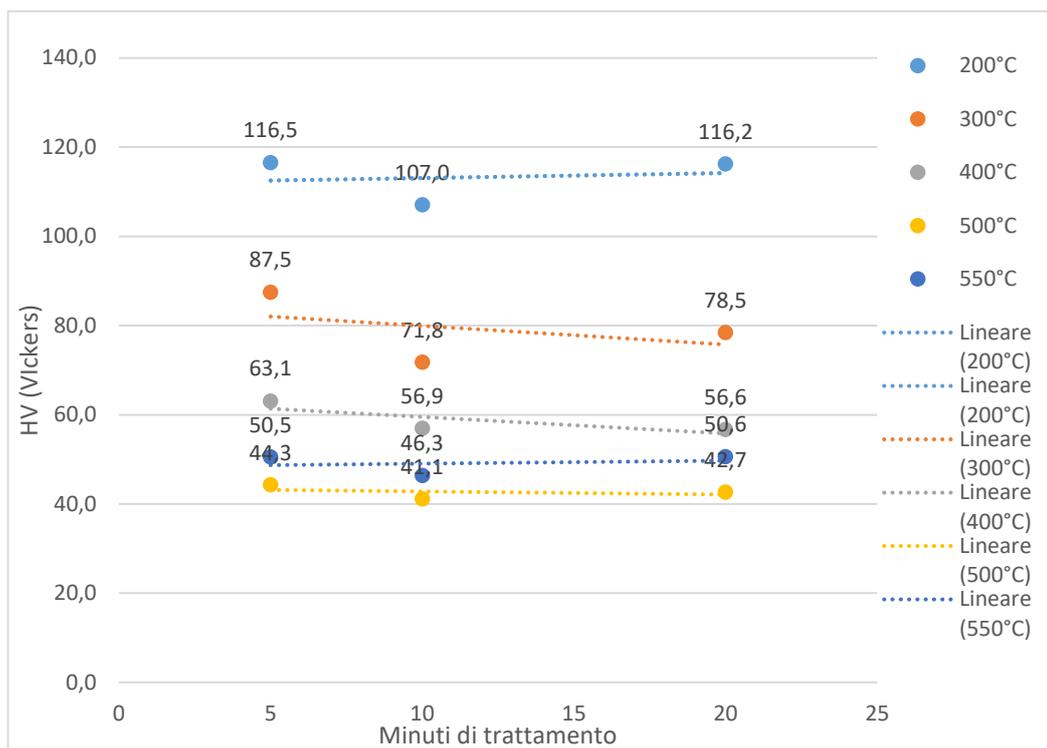


Figura 14: trattamenti in forno a muffola

Si ripetono quindi altri test, con altri 9 campioni a 9 temperature diverse (100, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550°C) con tempo di permanenza di 10 min, e per avere una maggiore precisione sulla misura della temperatura viene usata una termocoppia posizionata nel forno adiacente ai campioni. Le misure di durezza vengono effettuate con metodo analogo a prima.

4.3. Trattamenti con corrente continua

Con metodo simile, si effettuano i trattamenti con DC: vengono utilizzati 6 campioni (100, 200, 250, 300, 400, 500°C) posti nella macchina a trazione e sottoposti a tensione costante di 7MPa. La misura di temperatura viene effettuata tramite termocamera (Figura 15). La corrente viene imposta all'inizio del test e durante la durata (10 min) viene leggermente modificata manualmente (circa +2A) per mantenere il provino a temperatura più costante possibile.

Temperatura[°C]	100	200	250	300	400	500
Corrente DC [A]	143	205	237	256	290	302
Densità[A/mm ²]	14,3	20,5	23,7	25,6	29	30,2

Questo non è semplice poiché con il sovrainvecchiamento la struttura cristallina dei precipitati nel materiale cambia e con essa cambia la resistenza elettrica, e le reazioni di

precipitazione o solubilizzazione avvengono rispettivamente con produzione/assorbimento di calore.

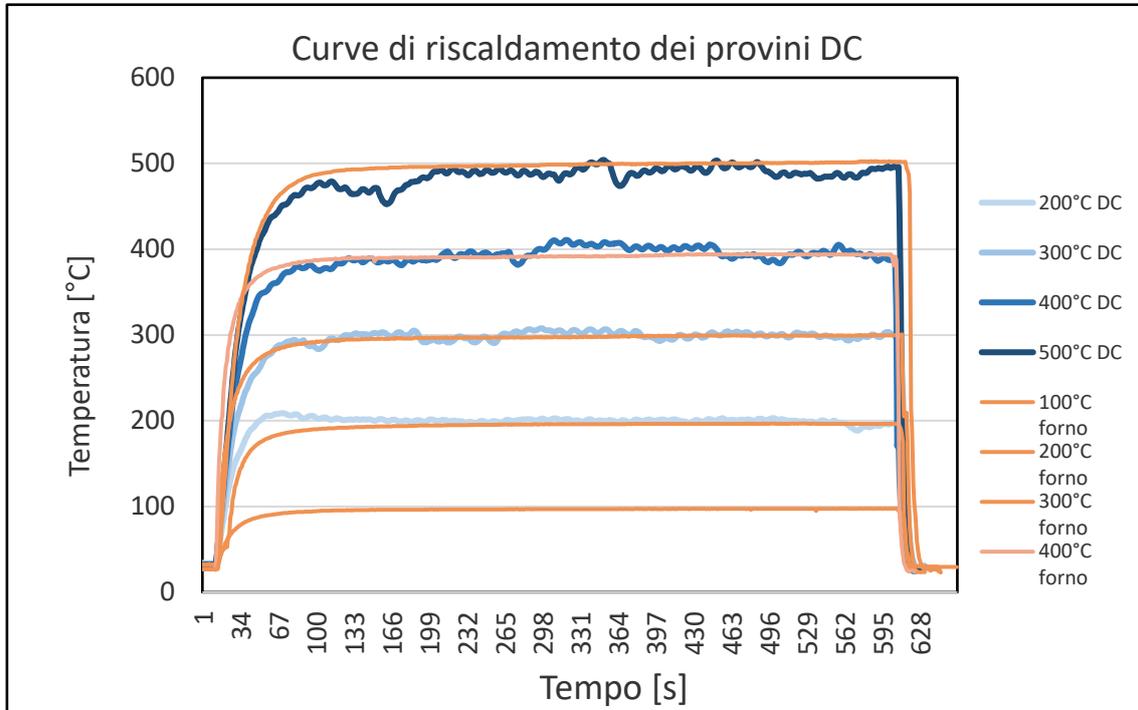


Figura 15: curve tempo-temperatura per trattamenti con DC e in forno muffola. Si può notare come i tempi di riscaldamento siano comparabili.

I campioni dopo il test vengono sottoposti a tempra in aria forzata e poi la parte centrale viene elettrolucidata.

Dopo un'ora di permanenza a temperatura ambiente vengono effettuati i test di durezza, sempre sulla parte centrale. Questo è essenziale poiché i campioni non si riscaldano uniformemente, ma il calore viene disperso dalle ganasce di rame, creando un gradiente. Allo scopo di quantificare la differenza di temperatura sono state fatte delle misurazioni di temperatura in punti diversi del provino: in particolare al centro e poi a un quarto di lunghezza sopra il centro e a un quarto sotto. Come si può quindi vedere da Figura 16 e Figura 17, la parte superiore è notevolmente più calda dell'inferiore (di circa 50°C), perché l'aria calda sale verso l'alto, riscaldando maggiormente la parte superiore del provino.

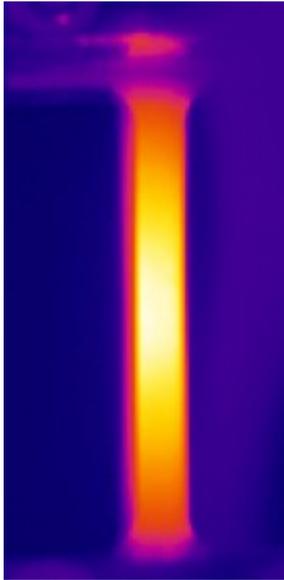


Figura 16: Immagine a infrarossi di un provino

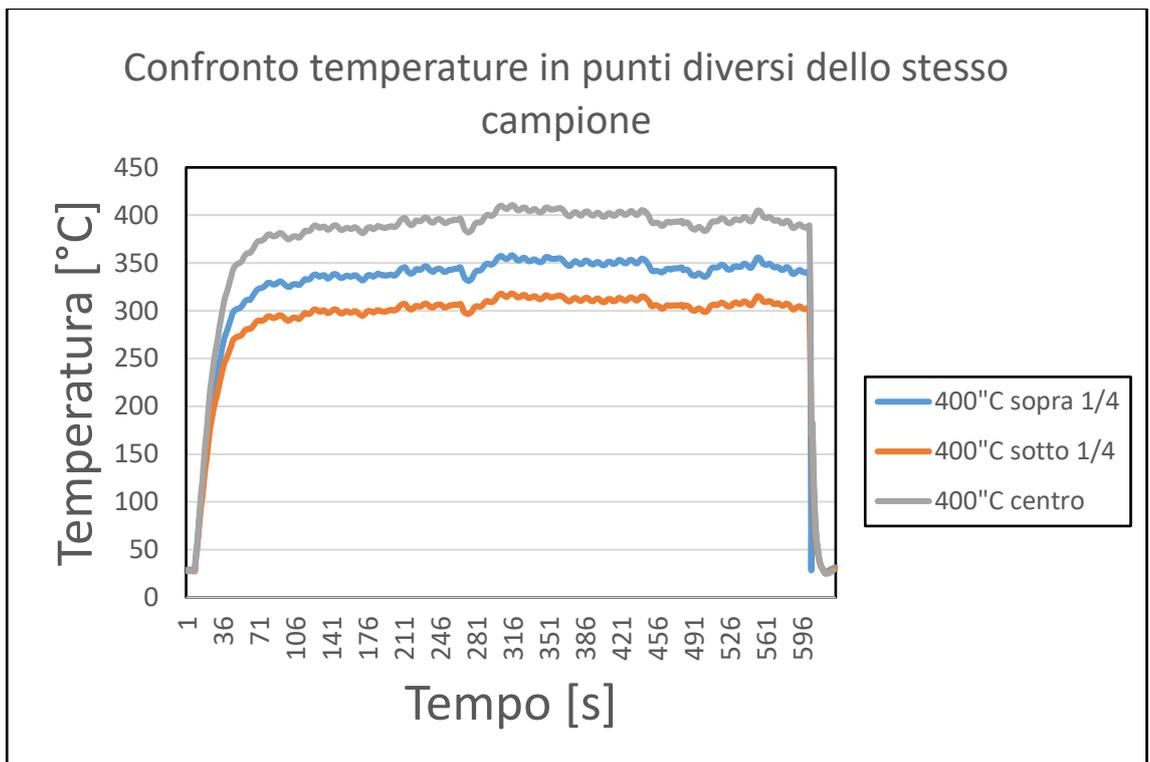


Figura 17: Temperatura in punti diversi del campione a 400°C. Curva blu: 1/4 di lunghezza sopra il centro geometrico. Curva rossa: 1/4 sotto.

4.4. Dati ottenuti e osservazioni

Raccogliendo così tutti i dati relativi alle prove di durezza, abbiamo potuto tracciare le curve durezza/temperatura (Figura 18).

Tramite il loro confronto si nota che il trattamento di sovrainvecchiamento con corrente elettrica produce gli stessi risultati del trattamento convenzionale a temperature minori.

Si può notare che a 550°C (trattamento convenzionale, 10 min) e che a 500°C (trattamento con DC, 10 min) c'è un aumento della durezza. Questo ci suggerisce che sia avvenuta una solubilizzazione dei precipitati. Per questo sono state effettuate delle prove di durezza una settimana dopo il trattamento termico, su tutti i provini sottoposti a corrente DC, e queste ultime hanno evidenziato un aumento della durezza 58% nel provino a 500°C (Figura 19) e del 54% nel provino trattato termicamente a 550°C. Ciò suggerisce che i precipitati siano andati in soluzione e che poi sia avvenuto un invecchiamento naturale (T4), riportando il provini al 69% (elettrico 500°C) e al 65% (termico 550°C) della loro durezza originale (110HV-T6).

La struttura dei precipitati non è stata indagata direttamente quindi sono richieste ulteriori analisi, magari con l'ausilio di SEM o TEM.

I risultati della misura della grana cristallina hanno evidenziato un aumento dimensione del diametro medio dei grani, come riportato nella tabella sottostante.

Campioni (tutti durezza iniziale 110HV)	Tale e quale	550°C forno 10 min	500°C DC 10 min
Diametro medio grani (um)	14	31	30

L'apparente aumento della dimensione dei grani potrebbe essere causato dai trattamenti, però potrebbe anche nativo del materiale base: i grani potrebbero variare nello spessore del provino oppure potrebbero variare a seconda della loro posizione sulla lamiera iniziale da cui sono stati ricavati i campioni a osso di cane. Ulteriori analisi sono necessarie.

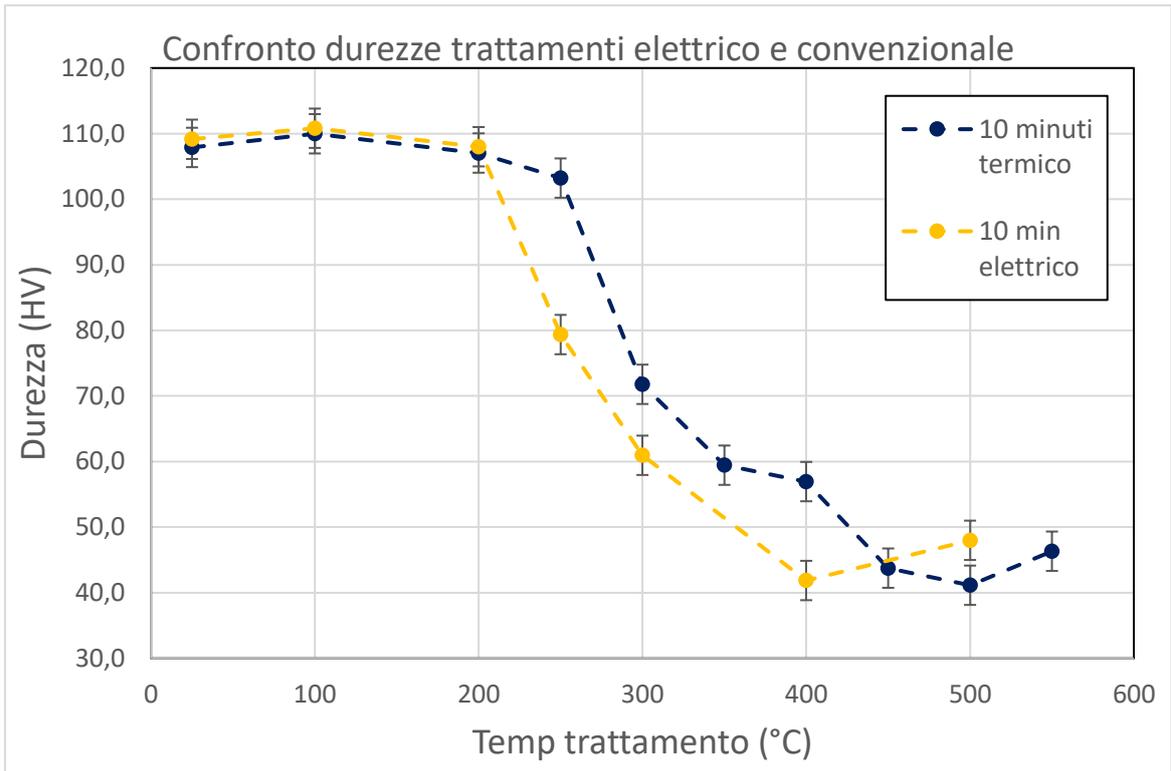


Figura 18: confronto tra le curve temperatura/durezza dei provini trattati convenzionalmente e con DC. Tutte le durezza sono state misurate 1 ora dalla fine del trattamento.

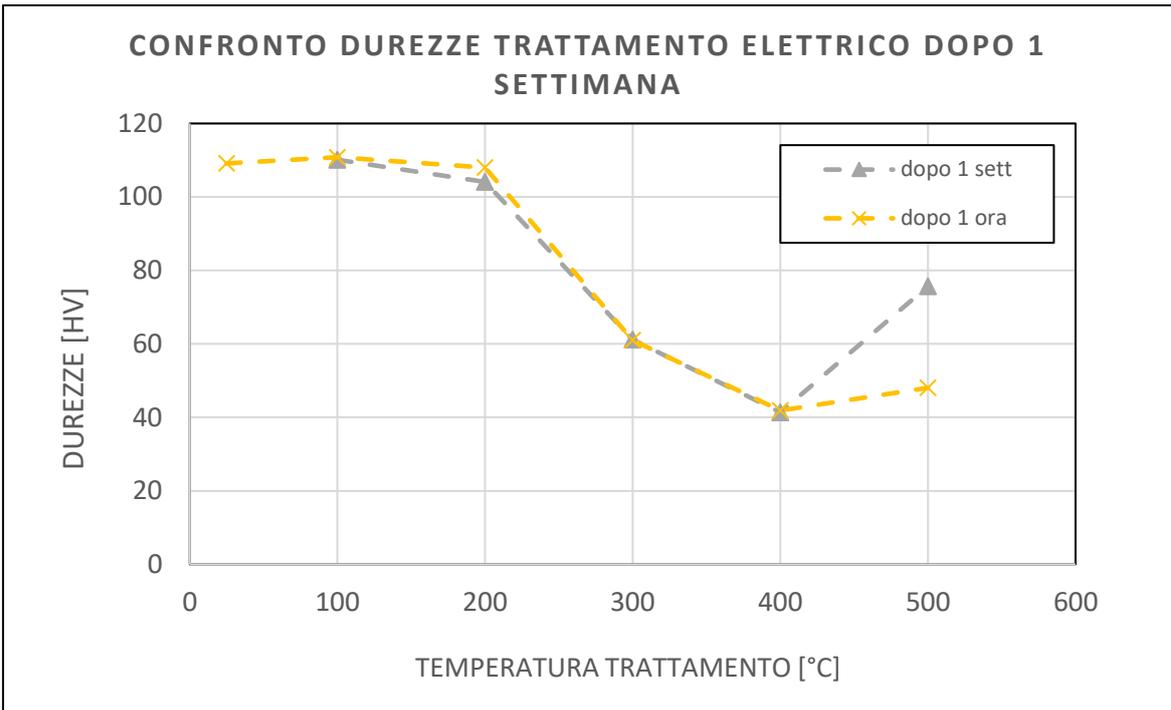


Figura 19: Curve temperatura/durezza dei provini testati con corrente elettrica. Le durezze sono state misurate 1 ora dopo il trattamento e poi 1 settimana sugli stessi provini

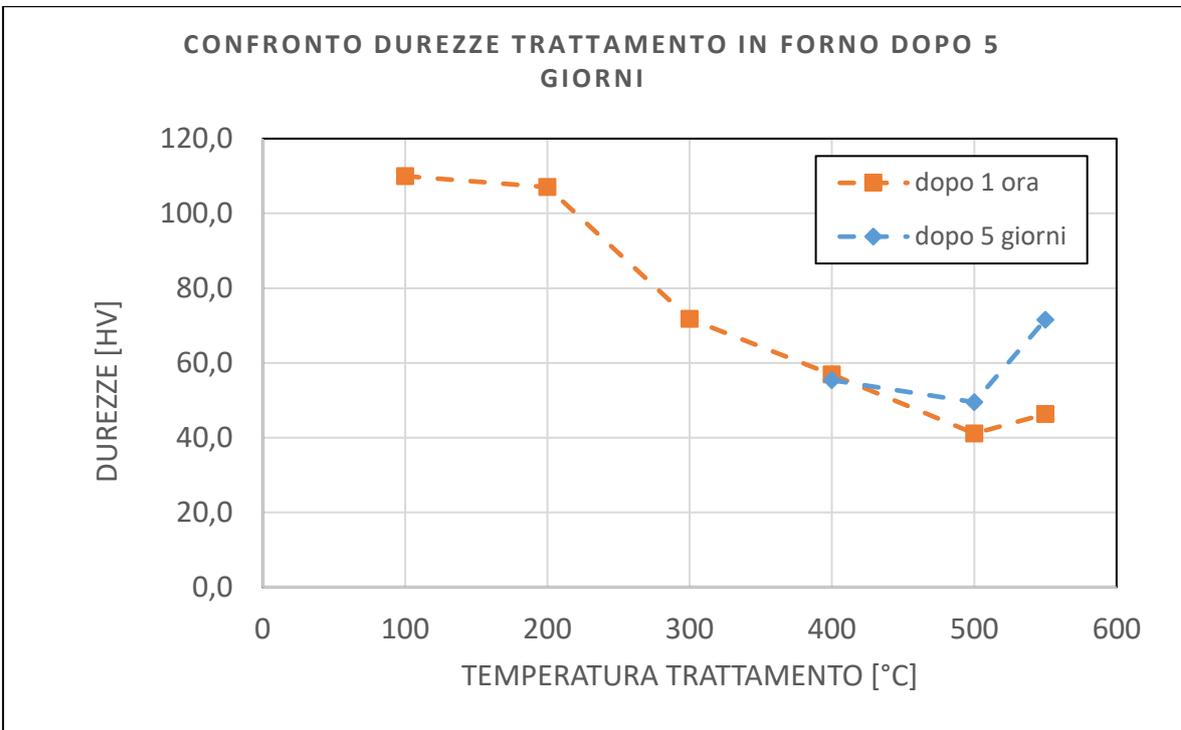


Figura 20: Curve temperatura/durezza dei provini trattati convenzionalmente. Le durezze sono state misurate 1 ora dopo il trattamento e poi 5 giorni sugli stessi provini.

Conclusione

L'analisi delle curve di durezza ottenute suggerisce che i trattamenti con corrente elettrica continua favoriscano il sovrainvecchiamento, che avviene a temperature minori rispetto al trattamento termico convenzionale, a parità di tempo di permanenza. Questo potrebbe avvenire perché la corrente fornisce maggiore energia ai precipitati rispetto al puro riscaldamento, ma i precisi motivi (che potrebbero essere effetto Joule localizzato, effetti magnetici o effetti dovuti allo spostamento di cariche, o una combinazione di questi) vanno indagati ulteriormente.

Maggiori analisi sono necessarie per capire se ed eventualmente come cambia nella dimensione della grana.

Con l'aumentare delle dimensioni del pezzo il trattamento esclusivo con corrente elettrica ad alta densità diventa sempre più difficile, sia perché è necessaria una quantità sempre maggiore di corrente, sia perché il pezzo non si scalda uniformemente.

Bibliografia

- [1] M. Kumar, M. M. Baloch, M. I. Abro, S. A. Memon, e A. D. Chandio, «Effect of Artificial Aging Temperature on Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy», *Mehran Univ. res. j. eng. technol.*, vol. 38, fasc. 1, pp. 31–36, gen. 2019, doi: 10.22581/muet1982.1901.03.
- [2] J. R. Davis & Associates e ASM International, A c. di, *Aluminum and aluminum alloys*. Materials Park, OH: ASM International, 1993.
- [3] «ASTM-B918B918M-20a-Standard-Practice-for-Heat-Treatment-of-Wrought-Aluminum-Alloys.pdf».
- [4] X. Fang, M. Song, K. Li, e Y. Du, «Precipitation sequence of an aged Al-Mg-Si alloy», *J min metall B Metall*, vol. 46, fasc. 2, pp. 171–180, 2010, doi: 10.2298/JMMB1002171F.
- [5] «Strengthening of metal alloys», in *Introduction to Aerospace Materials*, Elsevier, 2012, pp. 57–90. doi: 10.1533/9780857095152.57.
- [6] J. H. Chen, E. Costan, M. A. van Huis, Q. Xu, e H. W. Zandbergen, «Atomic Pillar-Based Nanoprecipitates Strengthen AlMgSi Alloys», *Science*, vol. 312, fasc. 5772, pp. 416–419, apr. 2006, doi: 10.1126/science.1124199.
- [7] «Low cycle fatigue in precipitation-strengthened AA6016 alloy.pdf».
- [8] H.-R. Dong *et al.*, «A review of electrically assisted heat treatment and forming of aluminum alloy sheet», *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 120, fasc. 11–12, pp. 7079–7099, giu. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08996-6.
- [9] H. Xiao, S. Jiang, C. Shi, K. Zhang, Z. Lu, e J. Jiang, «Study on the microstructure evolution and mechanical properties of an Al-Mg-Li alloy aged by electropulsing assisted ageing processing», *Materials Science and Engineering: A*, vol. 756, pp. 442–454, mag. 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.04.049.
- [10] L. He, W. Fei, M. Wei, Q. Ning, X. Wang, e J. Cui, «Microstructures and properties of 6061 alloy homogenized with electric current», *Mater. Res. Express*, vol. 6, fasc. 8, p. 086525, mag. 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab1bf6.
- [11] Y. S. Zheng, G. Y. Tang, J. Kuang, e X. P. Zheng, «Effect of electropulse on solid solution treatment of 6061 aluminum alloy», *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 615, pp. 849–853, dic. 2014, doi: 10.1016/j.jallcom.2014.07.062.
- [12] L. Gao, Y. Harada, e S. Kumai, «Microstructural characterization of aluminum alloys using Weck's reagent, part I: Applications», *Materials Characterization*, vol. 107, pp. 426–433, set. 2015, doi: 10.1016/j.matchar.2015.01.005.