Dipartimento di Ingegneria Industriale, A.A. 2024-2025

Università degli Studi di Padova

Studio dell'effetto della corrente elettrica nel processo di ricristallizzazione di una lega di alluminio 1050

Tutor Universitario: **Prof. Irene Calliari**

Co-tutor: **Claudio Gennari**

Co-supervisor**: Mirko Pigato**

Candidato: **Marco Masiero**

05/09/2025

L'Alluminio

Le caratteristiche intrinseche dell'**alluminio** gli conferiscono un'importanza notevole nel contesto industriale

Però

Le proprietà meccaniche hanno costituito un vincolo per un suo utilizzo più ampio: per superare la limitazione si ricorre frequentemente all'uso di leghe.

Distinguiamo le leghe in due gruppi:

Le *leghe da deformazione plastica* e Le *leghe per getti*.

Il sistema di designazione delle leghe di alluminio caratterizzato da quattro cifre, fornisce informazioni dettagliate riguardanti la composizione chimica

Serie 1xxx: famiglia comprendente le leghe di alluminio puro che contengono almeno il 99,0% di alluminio.

Quale lega abbiamo trattato quindi?

La lega AA1050-H24

LEGA 1050

UNI 9001/2

EUROPA	*EN 573*	EN AW 1050A Al 99,5
FRANCIA	*AFNOR*	1050A
GERMANIA	*DIN*	Al99,5
GRAN BRETAGNA	*BS*	1050A
USA	*ASTM*	1050A

La serie 1000 non presenta elementi in Lega (99,50% di Alluminio) solo Rame in addizione; in questa serie la lega **1050A** è quella più diffusa ed utilizzata. Presenta un buon compromesso tra i valori di resistenza meccanica, l' idoneità alla deformazione plastica e la proprietà dell' aspetto. I campi di applicazione sono molteplici: imballaggio, edilizia, caldaieria, lattoneria, conduttori elettrici etc. Più "raffinati" sono altre tipologie della serie 1000 con una % di alluminio che arriva fino al 99,99% (Lega 1085 - Lega 1090 - Lega 1199).

CARATTERISTICHE CHIMICHE NORMA UNI EN 573-1

Lega	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	V	Ti	altri
1050	**0,25**	**0,40**	0,05	0,05	0,05			0,07		0,05	0,03

CARATTERISTICHE MECCANICHE NORMA UNI EN 485-2

Stato Fisico	Spessore (mm)		Rm Mpa		Rp0,2 Mpa		A% min	Raggio di piegatura e=s			HBS
	da	a	mini	maxi	mini	maxi	A50	A	180°	90°	
H14	0,2	0,5	105	145	85		2		1,0e	0e	34
	0,5	1,5	105	145	85		3		1,0e	0,5e	34
	1,5	3,0	105	145	85		4		1,0e	1,0e	34
	3,0	6,0	105	145	85		5			1,5e	34
	6,0	12,5	105	145	85		6			2,5e	34
H18	0,2	0,5	140		120		1			1,0e	42
	0,5	1,5	140		120		2			2,0e	42
	1,5	3,0	140		120		2			3,0e	42
H24	0,2	0,5	105	145	75		3		1,0e	0e	33
	0,5	1,5	105	145	75		4		1,0e	0,5e	33
	1,5	3,0	105	145	75		5		1,0e	1,0e	33
	3,0	6,0	105	145	75		8		1,5e	1,5e	33
0/H111	0,5	1,5	65	95	20		22		0e	0e	20
	1,5	3	65	95	20		26		0e	0e	20

La lega di alluminio **1050-H24** è una lega altamente purificata e ampiamente utilizzata.

Proprietà meccaniche:

- *Durezza Brinell* (HB);
- *Resistenza alla Trazione*;
- *Allungamento*.

Perché H24?

H: Indica che la lega è stata trattata termicamente e/o lavorata meccanicamente per ottenere una condizione specifica di durezza e resistenza.

2: sta ad indicare che il metallo è stato parzialmente ricotto dopo un lavoro a freddo.

4: indica una combinazione di trattamenti o un grado di indurimento specifico

Incrudimento e Ricristallizzazione

Processo che porta ad un aumento della durezza e della resistenza meccanica di un metallo attraverso deformazione plastica

Principali conseguenze

- *Aumento della Durezza e della Resistenza;*
- *Diminuzione della Duttilità;*
- *Effetto della Temperatura.*

Ripristino delle proprietà meccaniche e microstrutturali di un materiale metallico che ha subito intense deformazioni plastiche.

La **temperatura** alla quale ha luogo rappresenta un parametro cruciale: da essa dipendono la *velocità del processo* e le *caratteristiche della microstruttura finale*.

La **durata** del trattamento costituisce un ulteriore variabile. Dal punto di vista dei meccanismi, la ricristallizzazione non è un evento unico, ma un fenomeno che si sviluppa in più stadi.

Il risultato finale è fortemente da:

- *Dimensione media dei grani;*
- *Composizione chimica;*
- *Condizioni di riscaldamento e raffreddamento;*
- *Quantità di deformazione.*

Effetto della corrente elettrica

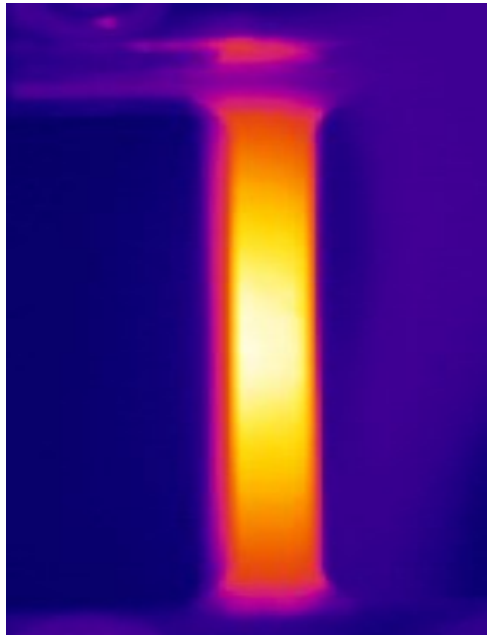
Impulsi di **corrente continua** (DC) possono migliorare la cinetica di ricristallizzazione andando dunque a velocizzare questo importante processo.

Contributo elettronico → Vento Elettronico

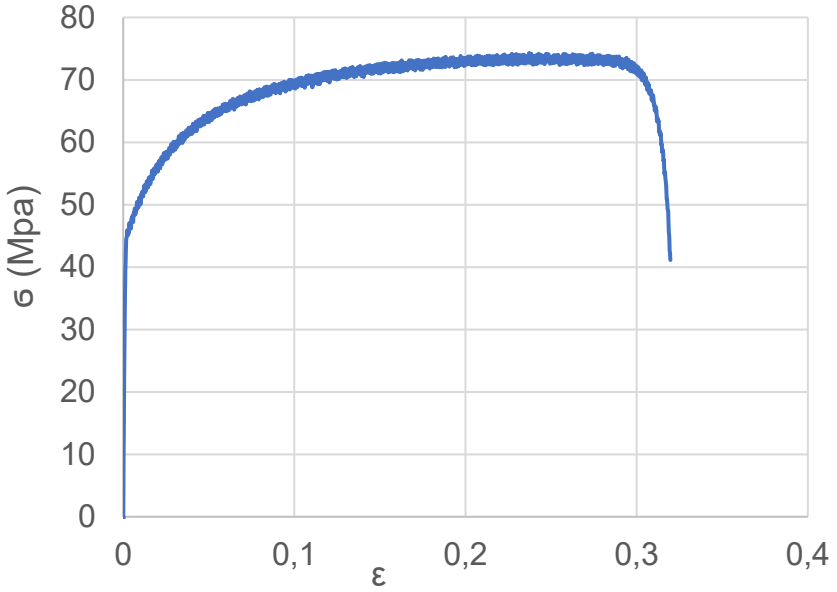
Contributo termico → Effetto Joule

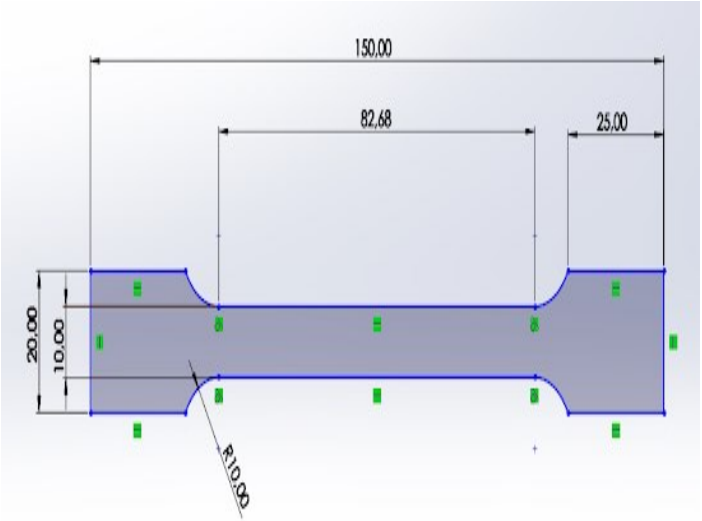
L'incremento della temperatura di un campione causato dall'effetto Joule può essere stimato utilizzando la seguente equazione:

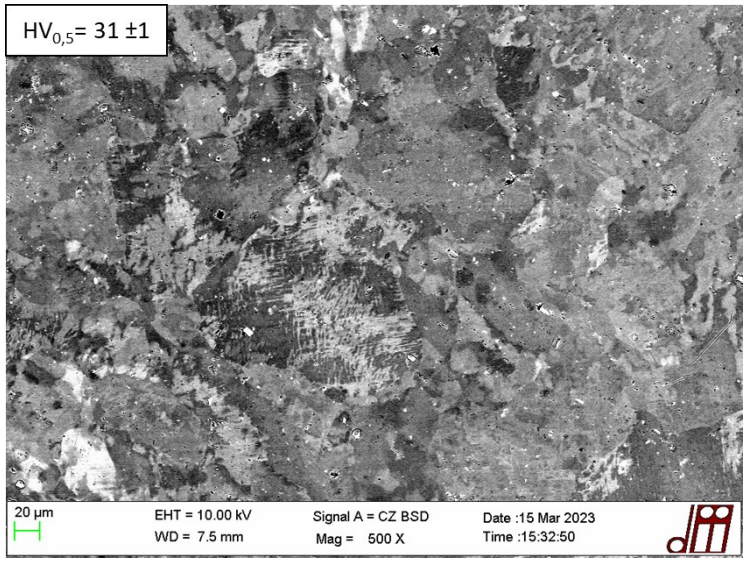
$$\Delta T = \frac{\rho\, J^2\, t}{C_p\, d}$$



Metodi utilizzati e analisi dati raccolti







Step 1) Preparazione materiale di partenza: Si parte da una lamiera di alluminio 1050 H24, spessore 1 mm.

Step 2) Ricavo provini da trazione: Vengono ricavati provini con sezione utile di 5 mm di larghezza e 50 mm di lunghezza.

Step 3) Ricottura: I campioni vengono ricotti in forno a muffola a 475 °C per 1 ora con l'obiettivo di uniformare le condizioni iniziali e annullare gli effetti del precedente stato di incrudimento.

Step 4) Deformazione a freddo controllata: Nella sezione utile viene imposto un allungamento del 20%. La deformazione è applicata tramite macchina di trazione, con velocità di deformazione 0,1 s^{-1}.

Step 5) Suddivisione dei campioni: Dopo la deformazione, i provini vengono divisi in due gruppi (trattamenti termici in forno a muffola e assistiti da corrente pulsata

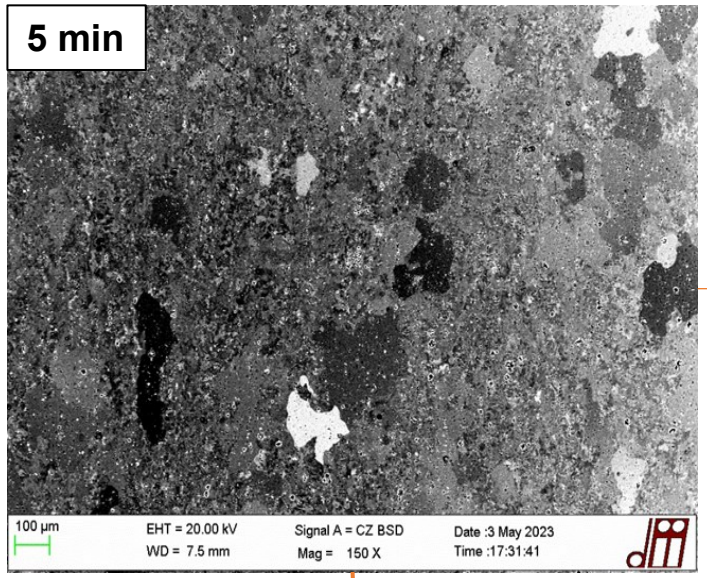
Analisi dati raccolti-Trattamento forno a muffola

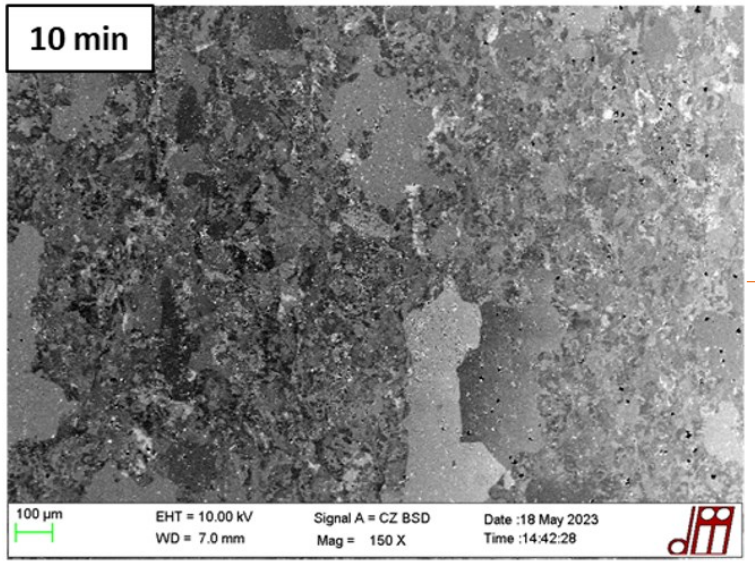
Studio sui campioni di alluminio per analizzare l'effetto della corrente elettrica pulsata sulla ricristallizzazione e sulla dimensione dei grani, confrontandolo con il trattamento termico in un forno a muffola.

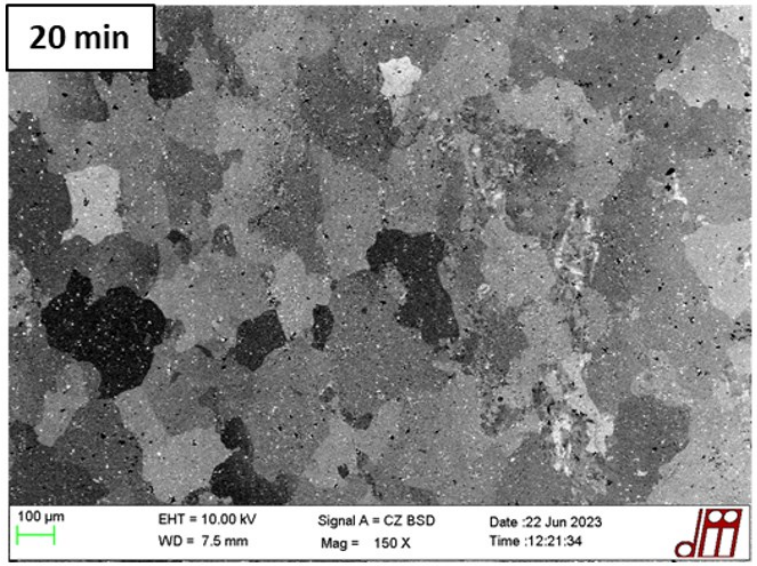
Test a 300°C, 350°C e 400°C con forno a muffola. In base alla temperatura, i tempi di esposizione sono stati variati per ottenere un quadro completo delle modifiche strutturali del materiale

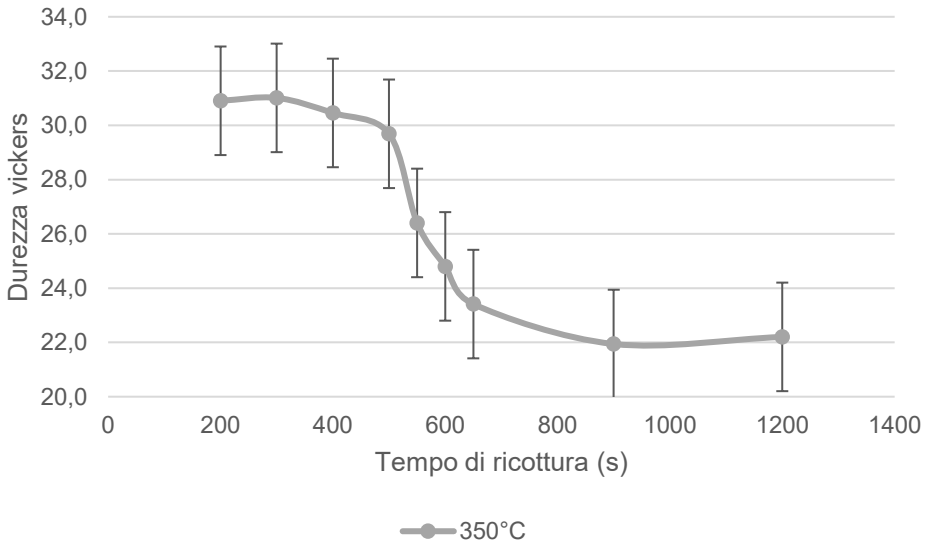
	200s	300s	400s	500s	550s	600s	650s	900s	1200s
300°C	31	30				30			30
350°C	30	31	30	29	26	24	23	21	22
400°C	21	21				21			21

Microstruttura e Durezza a 350 °C con forno a muffola





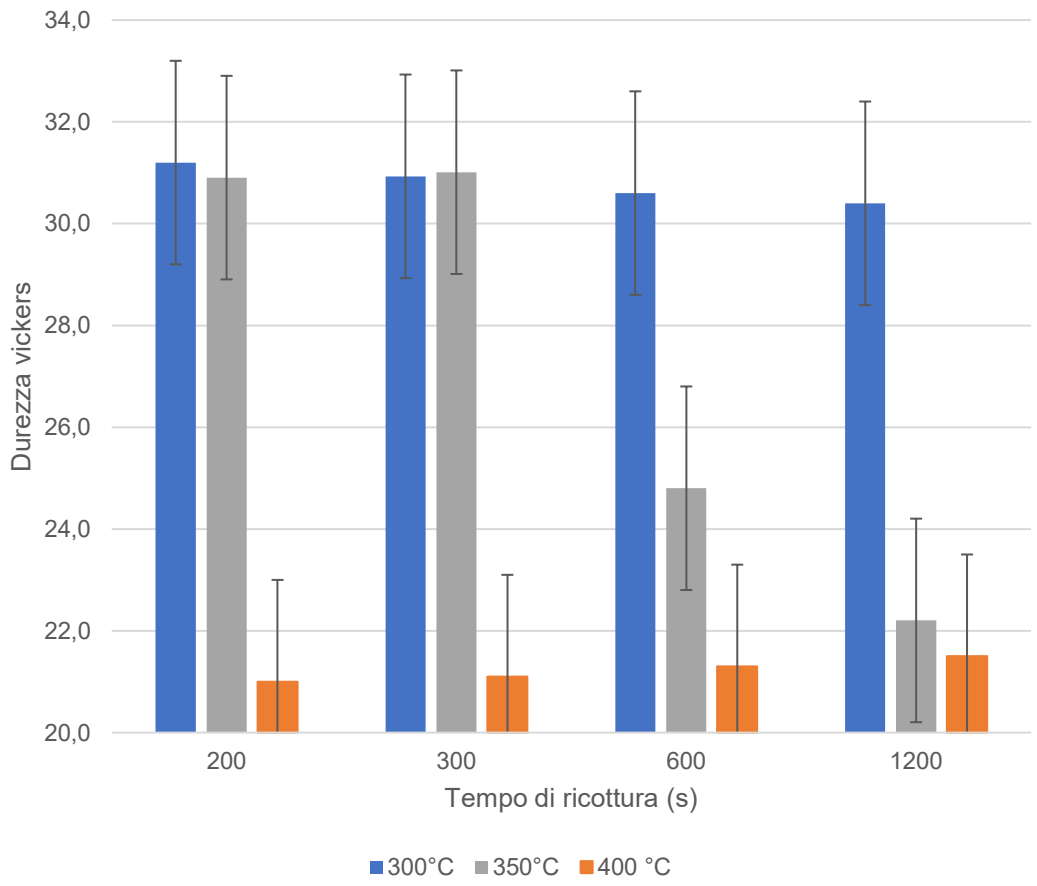




A 350 °C la ricristallizzazione non è immediata, ma presenta un tempo di incubazione, seguito da una transizione rapida e da un plateau finale che rappresenta la condizione di equilibrio microstrutturale.

Andamento durezza – Forno

I dati confermano che l'aumento della temperatura accelera in maniera significativa la cinetica di ricristallizzazione.



•Trattamento a 300 °C (blu):
•La durezza rimane praticamente costante (≈ 31 HV) anche al crescere del tempo.
•Indica che a questa temperatura si ha solo **recupero** e non ricristallizzazione.
•La microstruttura resta quella incrudita, con alta densità di dislocazioni.

•Trattamento a 350 °C (grigio):
•Inizialmente i valori sono simili a 300 °C (≈ 31 HV).
•Dopo 600 s si osserva un **calo netto della durezza** (≈ 25 HV).
•Dopo 1200 s la durezza cala ulteriormente (≈ 22 HV).
•Questo evidenzia la **ricristallizzazione progressiva**: inizialmente c'è un periodo di incubazione, poi avviene un brusco calo associato alla formazione di nuovi grani equiassici.

•Trattamento a 400 °C (arancione):
•La durezza è già bassa fin da subito (≈ 21 HV).
•Rimane stabile con il tempo → significa che la **ricristallizzazione è completata molto rapidamente**, praticamente già nei primi minuti.
•Il materiale raggiunge subito la condizione ricotta e non cambia ulteriormente.

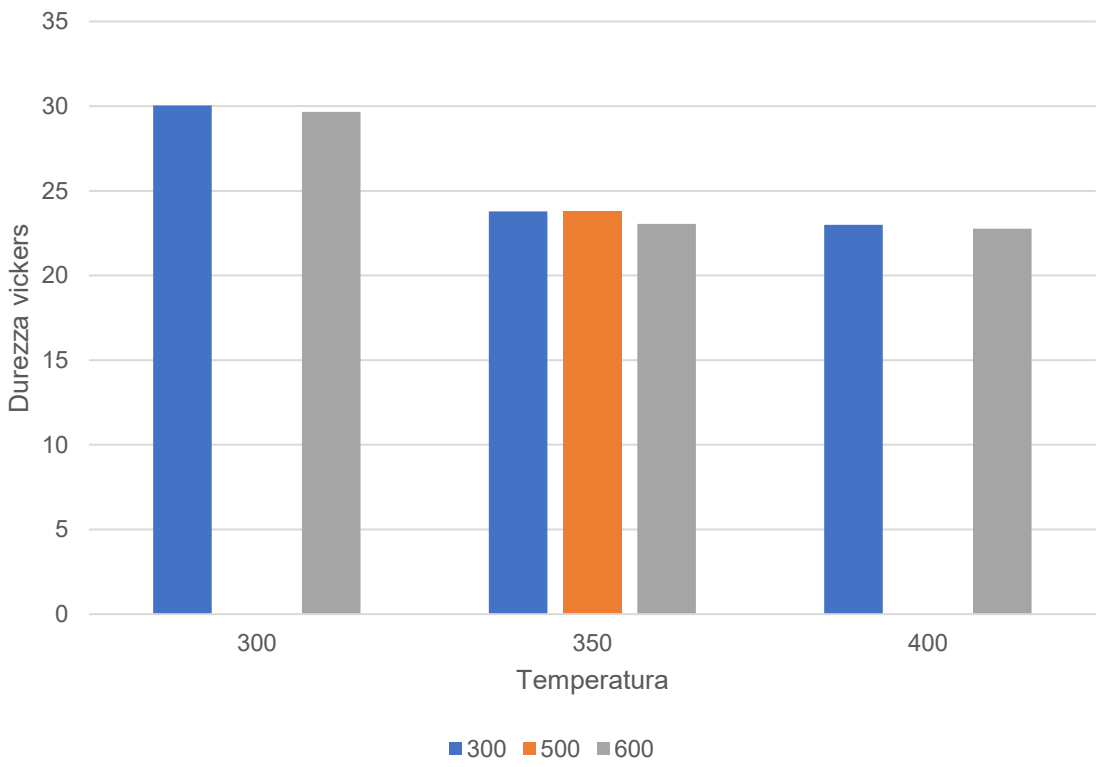
Analisi dati raccolti-Corrente elettrica

Nel caso dei campioni trattati con corrente elettrica pulsata, è stata seguita una metodologia specifica che prevede tempi di esposizione di 300s e 600s per tutte le temperature prese in esame.

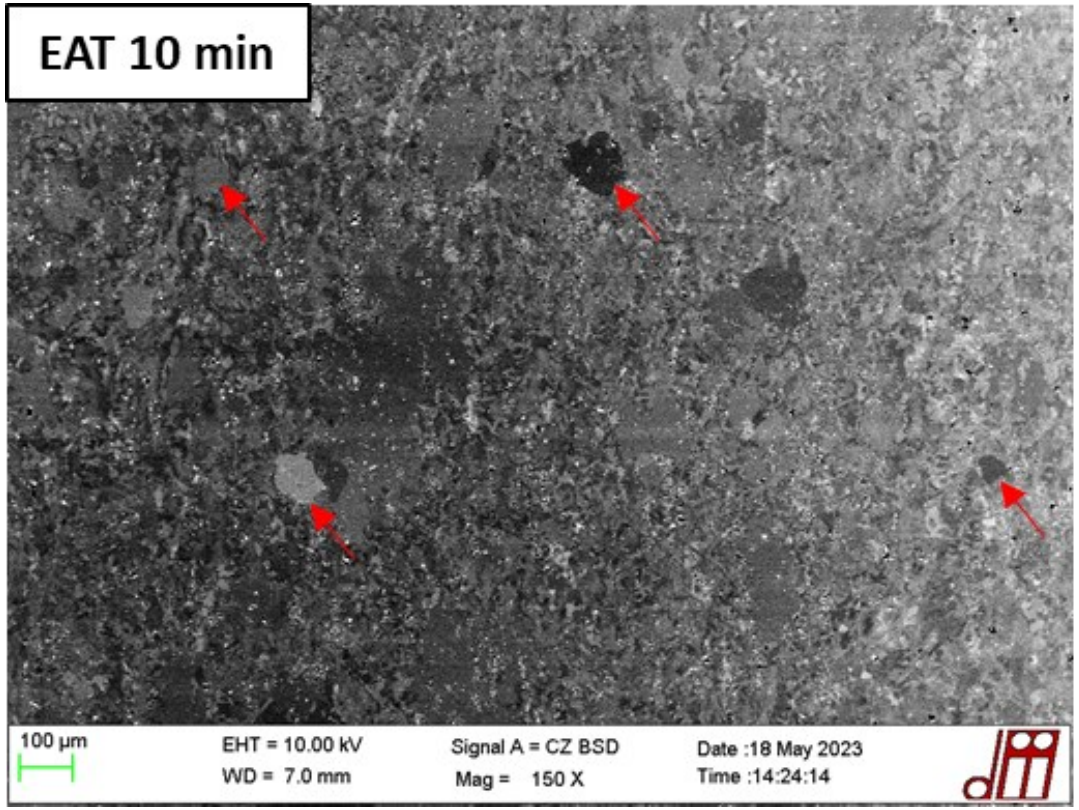
In aggiunta, per i campioni trattati a una temperatura di 350°C sono stati condotti ulteriori test con un tempo di esposizione intermedio di 500s.

	300s	500s	600s
300°C	30	-	29
350°C	23	23	23
400°C	22	-	22

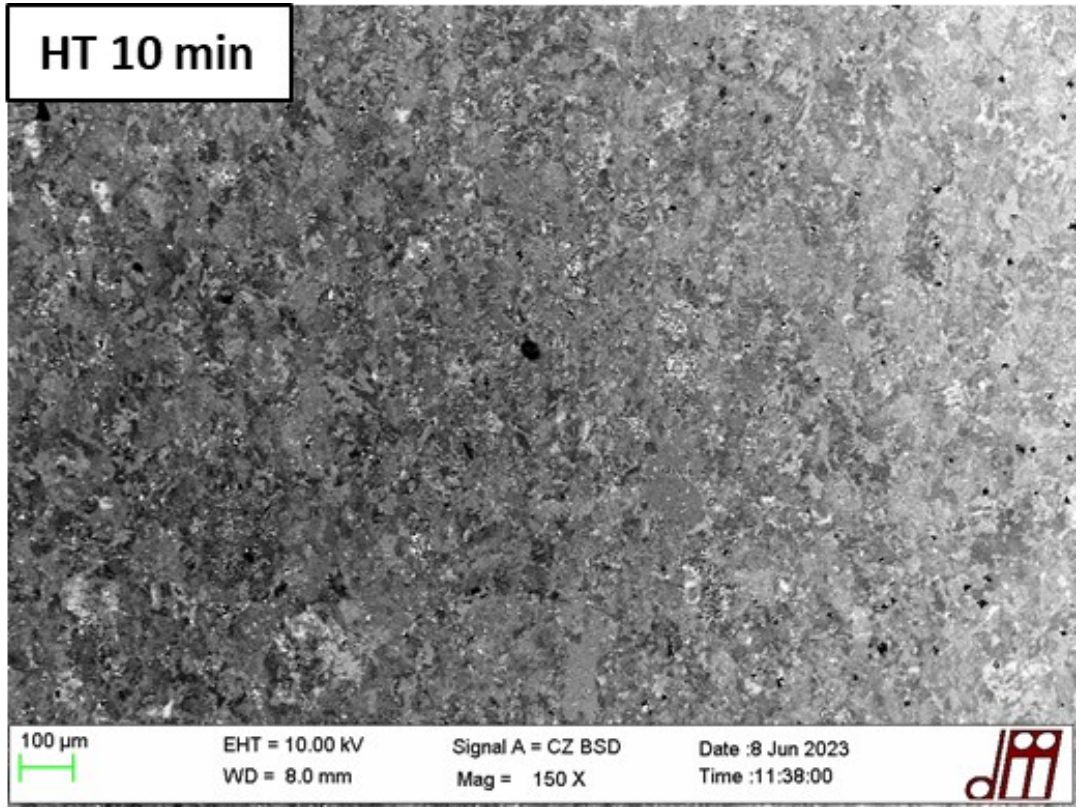
Parametri impostati con il generatore:
Frequenza: 1 Hz
Durata impulso: 100 ms
Corrente: 738 A a 300 °C
768 A a 350 °C
788 A a 400 °C



Microstruttura SEM – 300 °C per 10 minuti

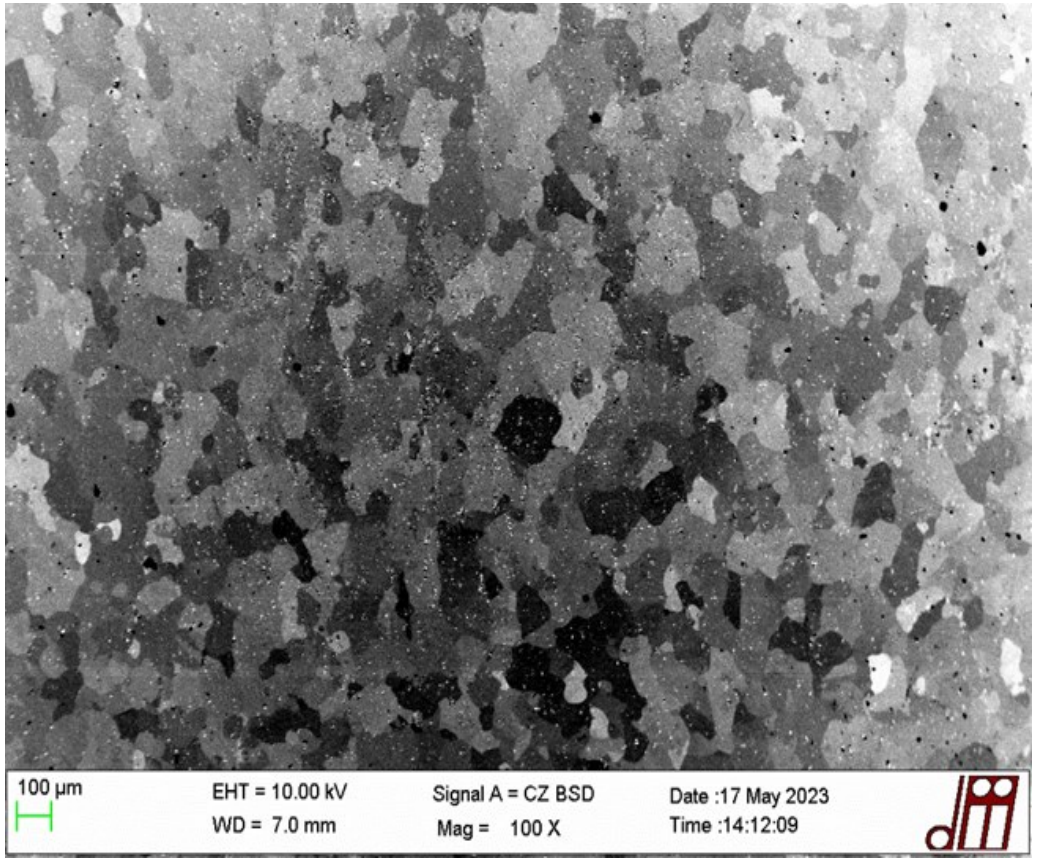


Corrente elettrica

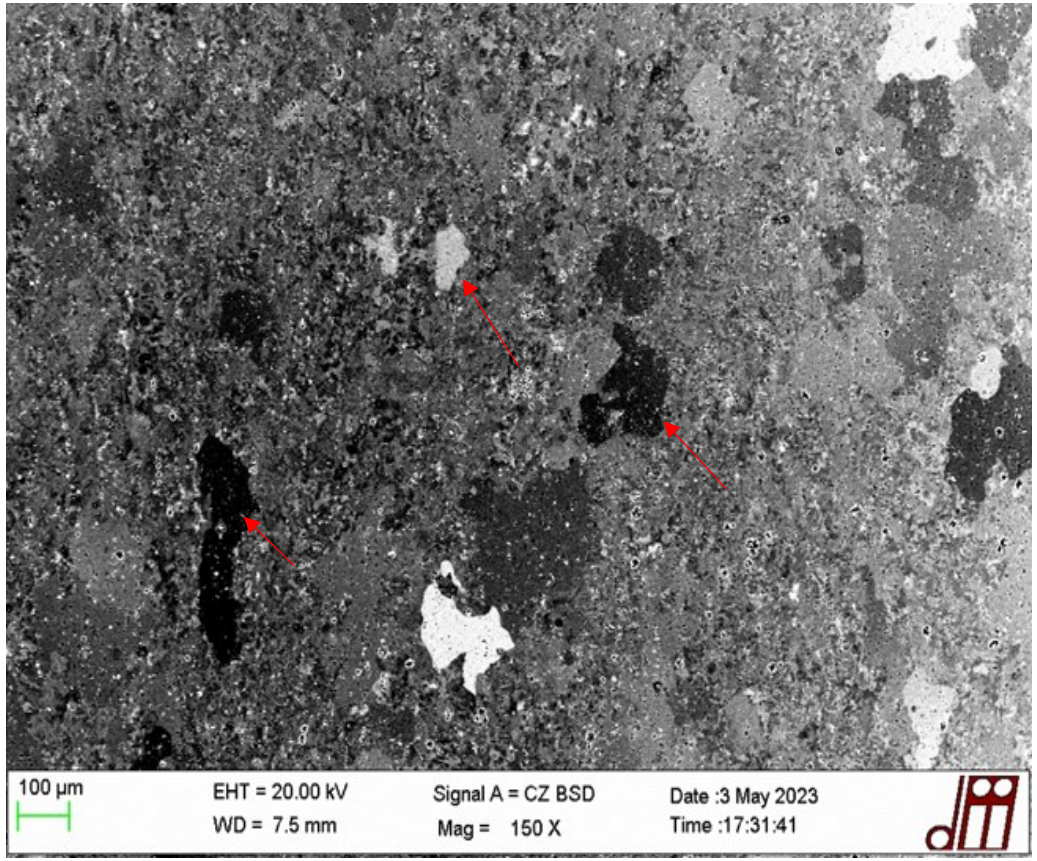


Forno convenzionale

Microstruttura SEM – 350 °C per 5 minuti

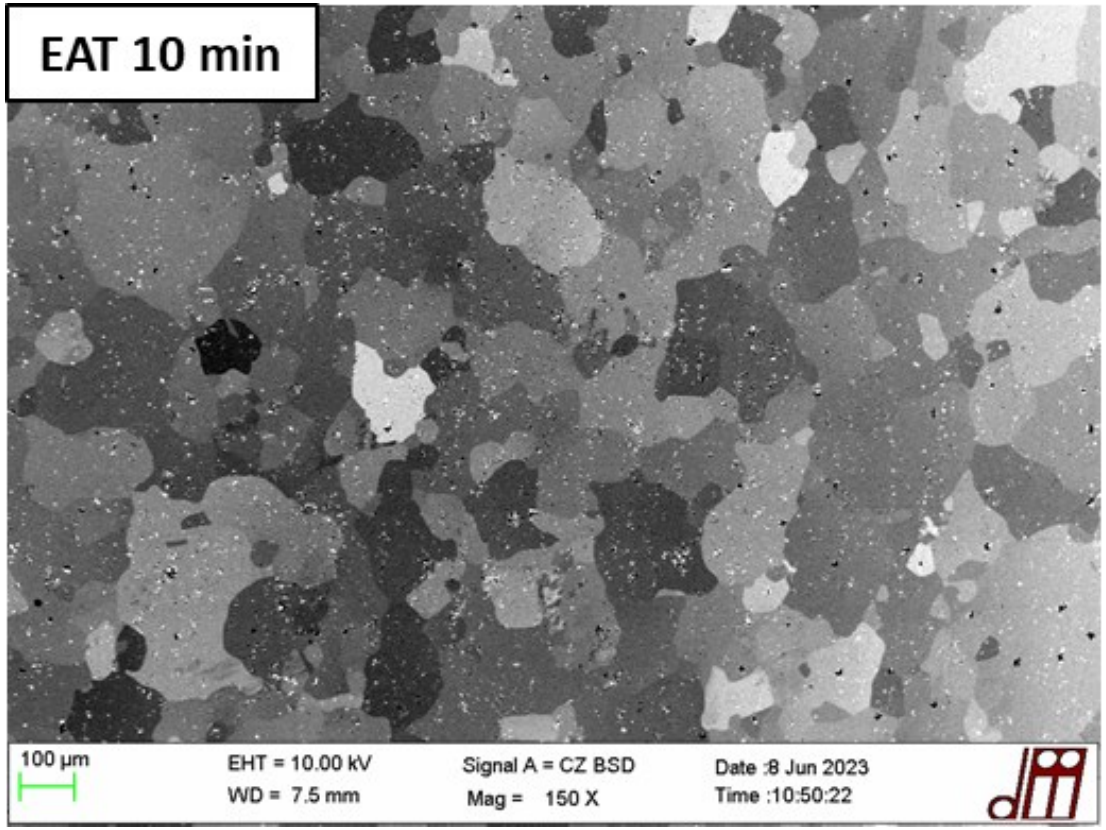


Corrente elettrica

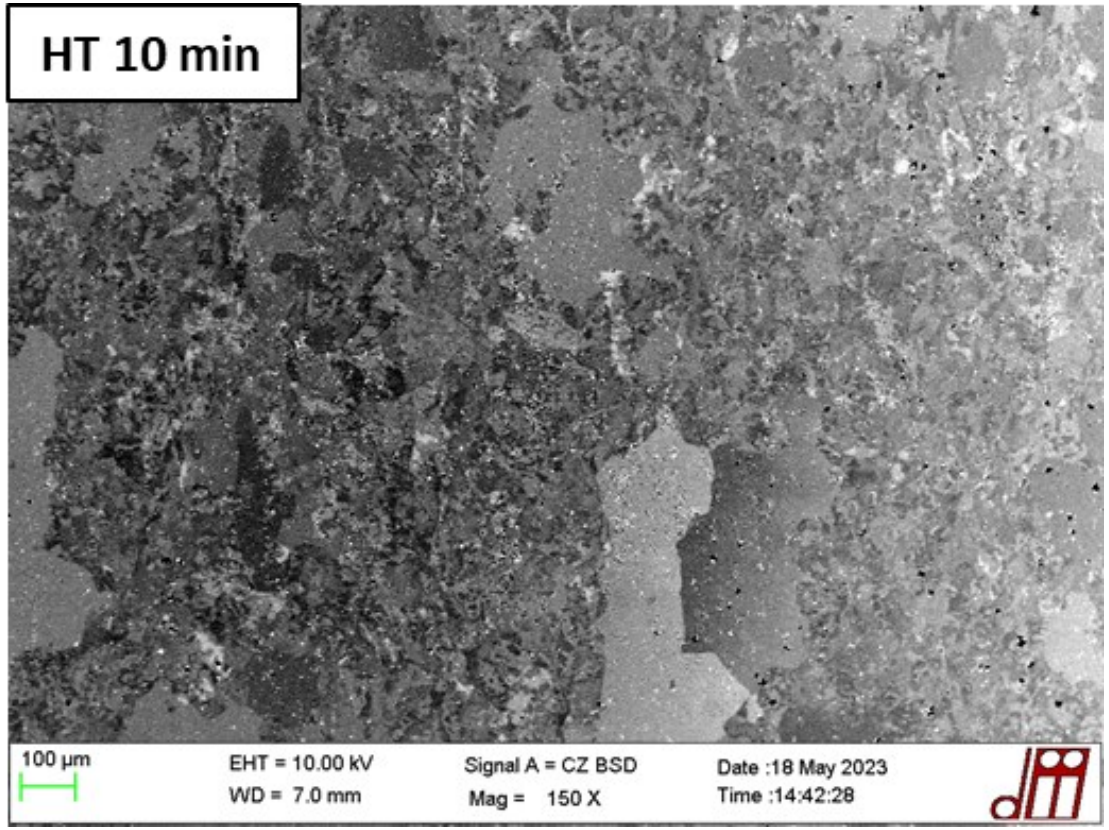


Forno convenzionale

Microstruttura SEM – 350 °C per 10 minuti

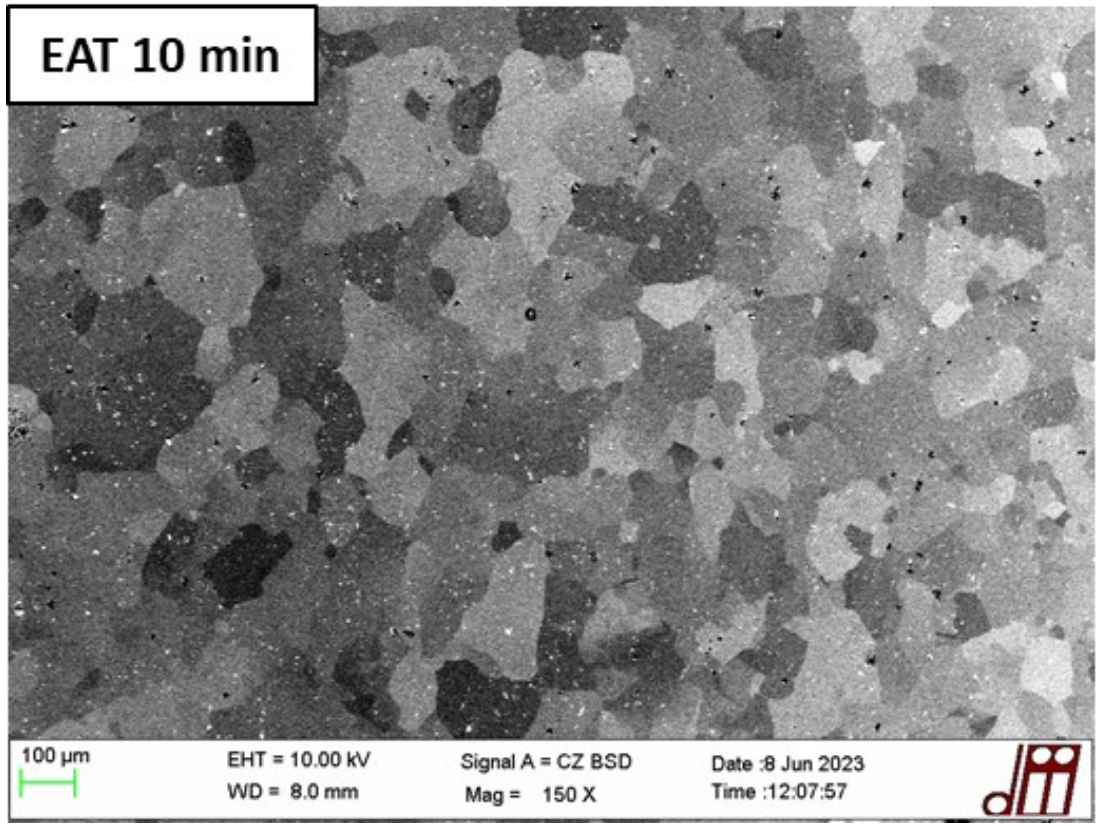


Corrente elettrica

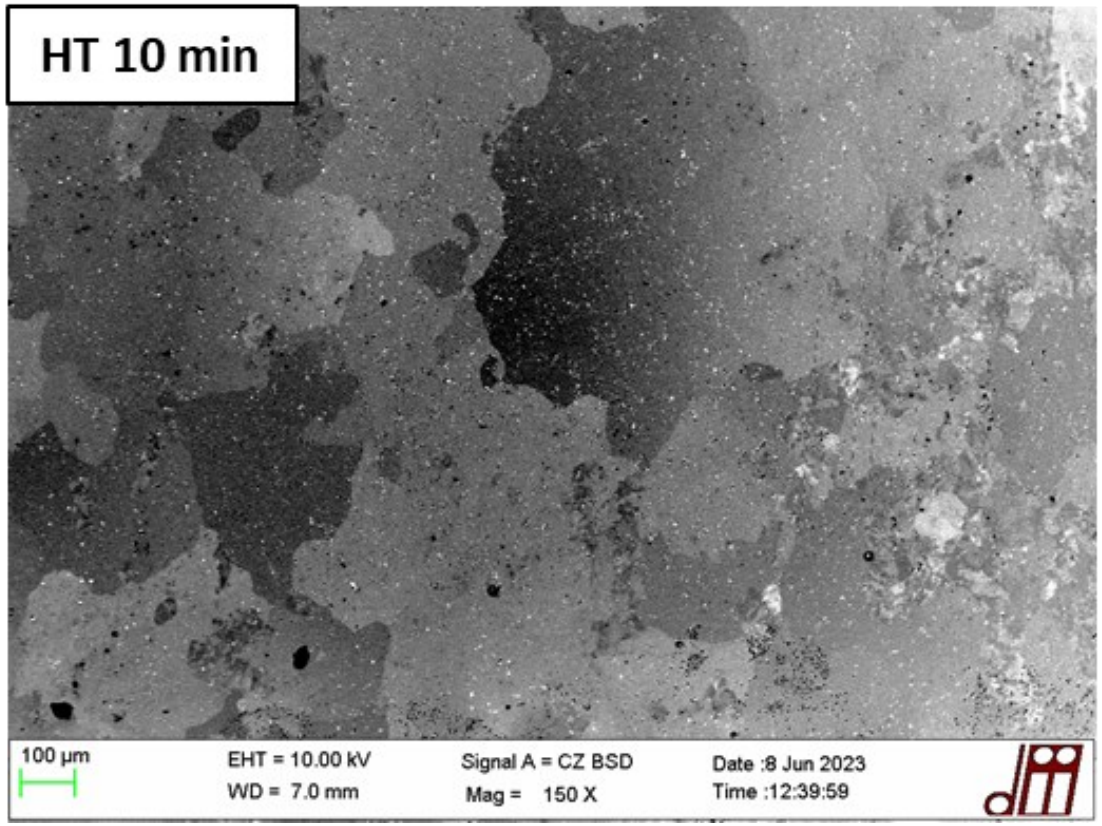


Forno convenzionale

Microstruttura SEM – 400 °C per 10 minuti



Corrente elettrica



Forno convenzionale

Confronto finale: Forno vs Corrente elettrica

Forno: ricristallizzazione più lenta, grani più grossi e distribuzione meno uniforme

Corrente elettrica: ricristallizzazione accelerata, grani più fini ed equiassici

- A 300 °C → solo recupero (riassestamento delle dislocazioni; riassetto dei difetti)
- A 350 °C → La corrente anticipa la trasformazione, microstruttura più avanzata
- A 400 °C → entrambi ricristallizzati, ma corrente limita la crescita dei grani

Conclusione: la corrente elettrica non permette soltanto di ridurre i tempi dei cicli termici tradizionali accelerando il processo di ricristallizzazione, ma di modulare anche la microstruttura in funzione delle specifiche esigenze progettuali.

Università
degli Studi
di Padova