

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Chimica e dei Materiali

# **Caratterizzazione di un acciaio bainitico con medio tenore di carbonio e alligato con alluminio**

Tutor universitario:

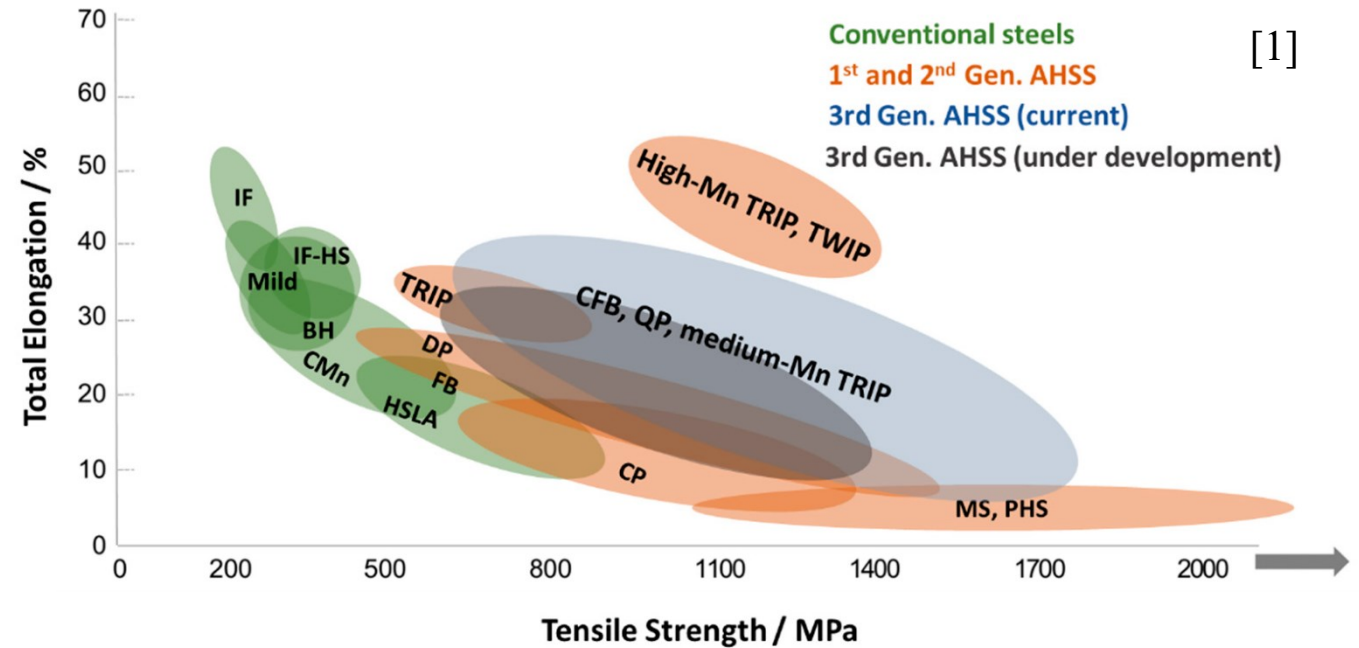
Ing. PhD Luca Pezzato

Padova, 19/09/2023

Laureando: *Alberto Battigelli*

Gli acciai bainitici carbide-free appartengono alla 3<sup>a</sup> generazione di «Advanced High Strength Steels (AHSS)»

- ✓ Ottime combinazioni di forza e duttilità
- ✓ Ridotto costo di alligazione
- ✓ Non sono richiesti trattamenti termici complessi e costosi
- ✗ La trasformazione bainitica può richiedere tempistiche incompatibili con le esigenze industriali

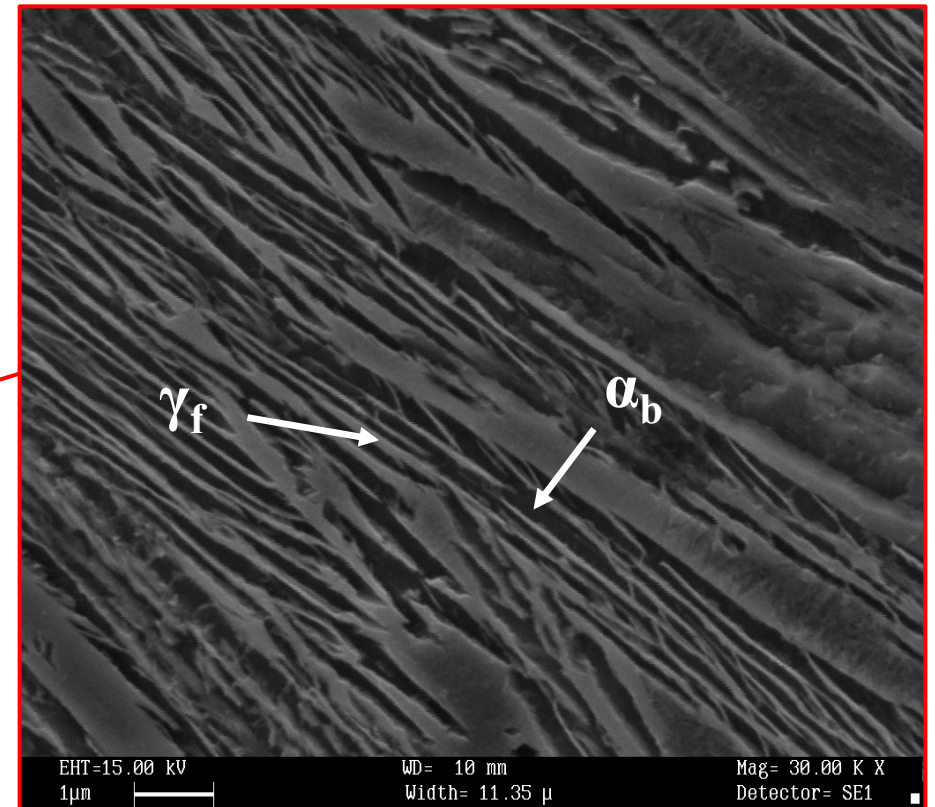
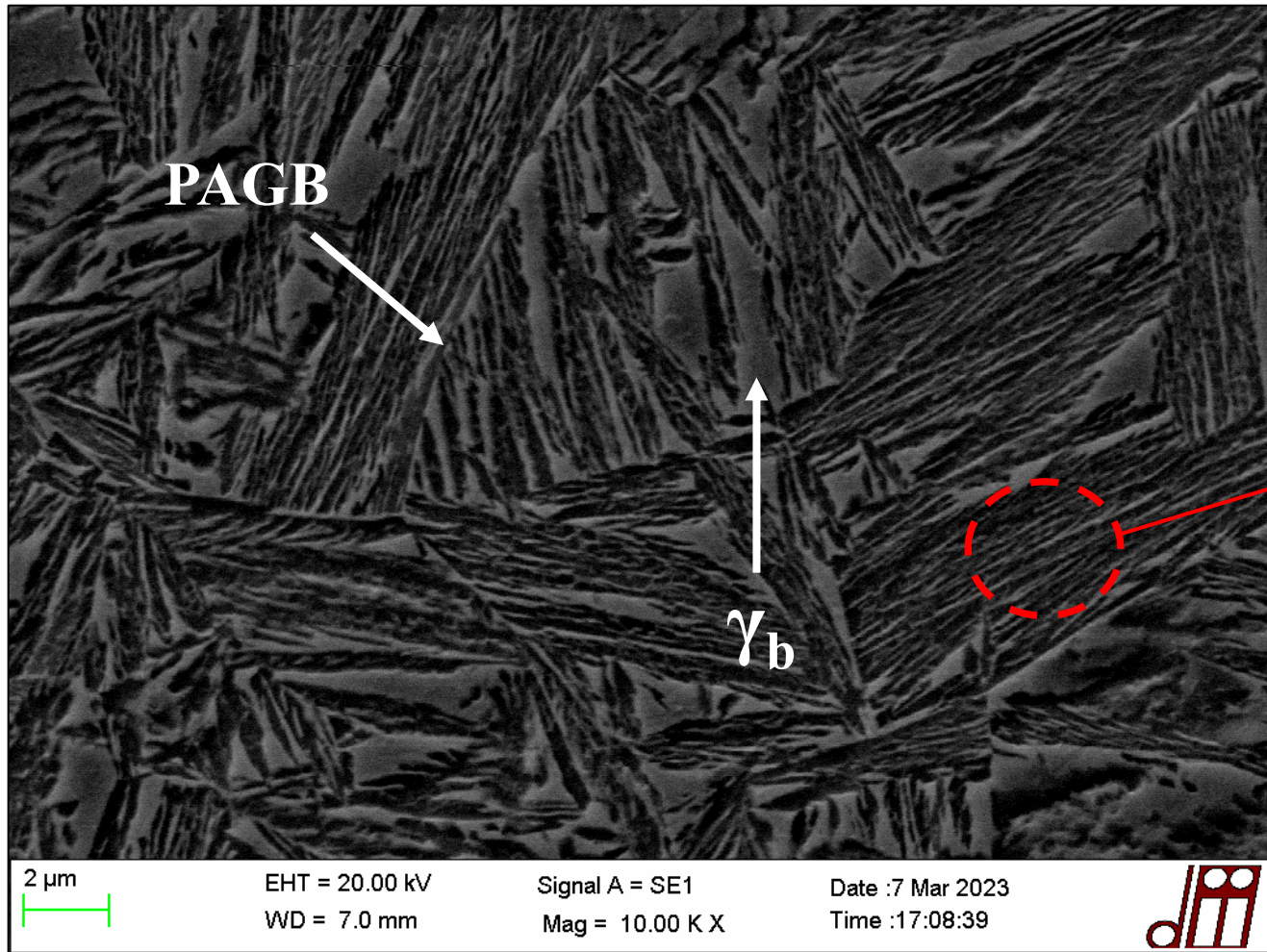


**UTS > 1500 MPa      Elongazione a rottura > 10%**

www.dii.unipd.it

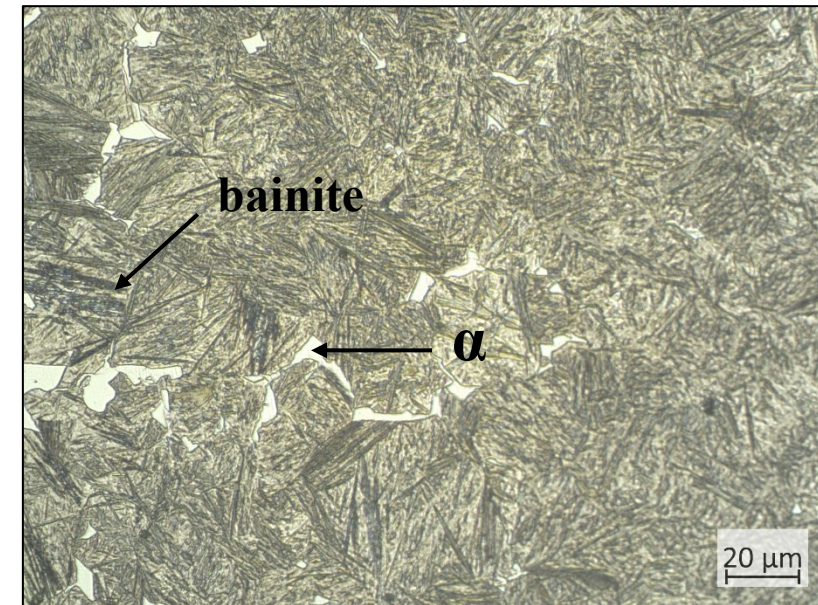
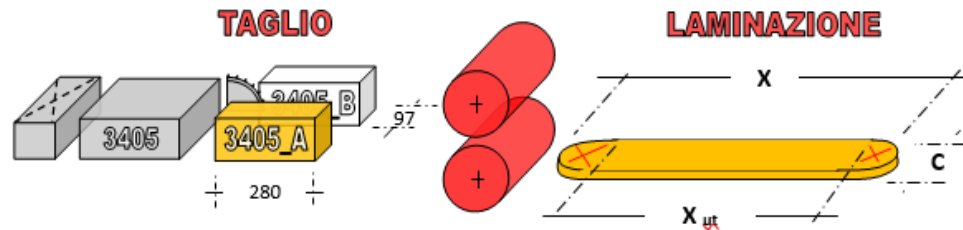
[1]: Lucia Morales-Rivas. Viewpoints on technological aspects of advanced high strength bainitic steels. Metals, 12(2), 2022.

La microstruttura nanostrutturata è composta unicamente da due fasi: **ferrite bainitica** e **austenite residua**



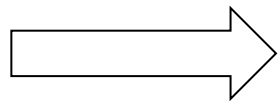
**Composizione elementare di PAD2 (wt.%)**

Fe	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	V	P	S	Mo	Al	Ti
Bal.	0.46	2.8	2.67	0.045	0.042	0.047	0.007	0.007	0.0067	0.019	0.56	0.001



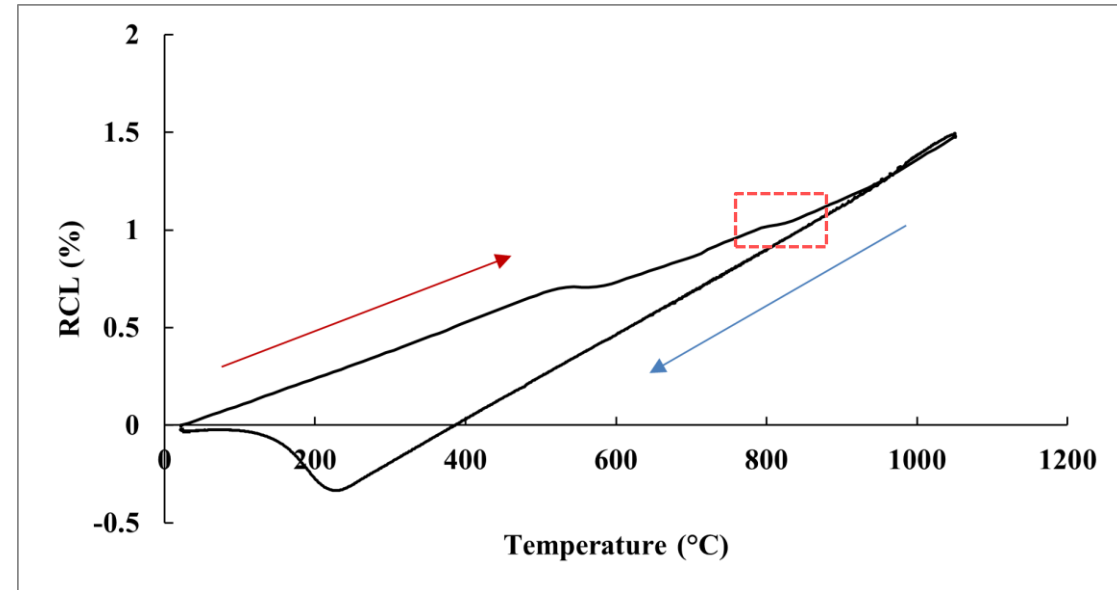
È stata eseguita una analisi dilatometrica preliminare per determinare le temperature di austenitizzazione che prevede:

- 1) riscaldamento da  $T_{amb}$  a  $1050^{\circ}\text{C}$  con heating rate di  $10^{\circ}\text{C/s}$
- 2) mantenimento isoterma a  $1050^{\circ}\text{C}$  per 5 min
- 3) raffreddamento da  $1050^{\circ}\text{C}$  a  $T_{amb}$  con cooling rate di  $10^{\circ}\text{C/s}$



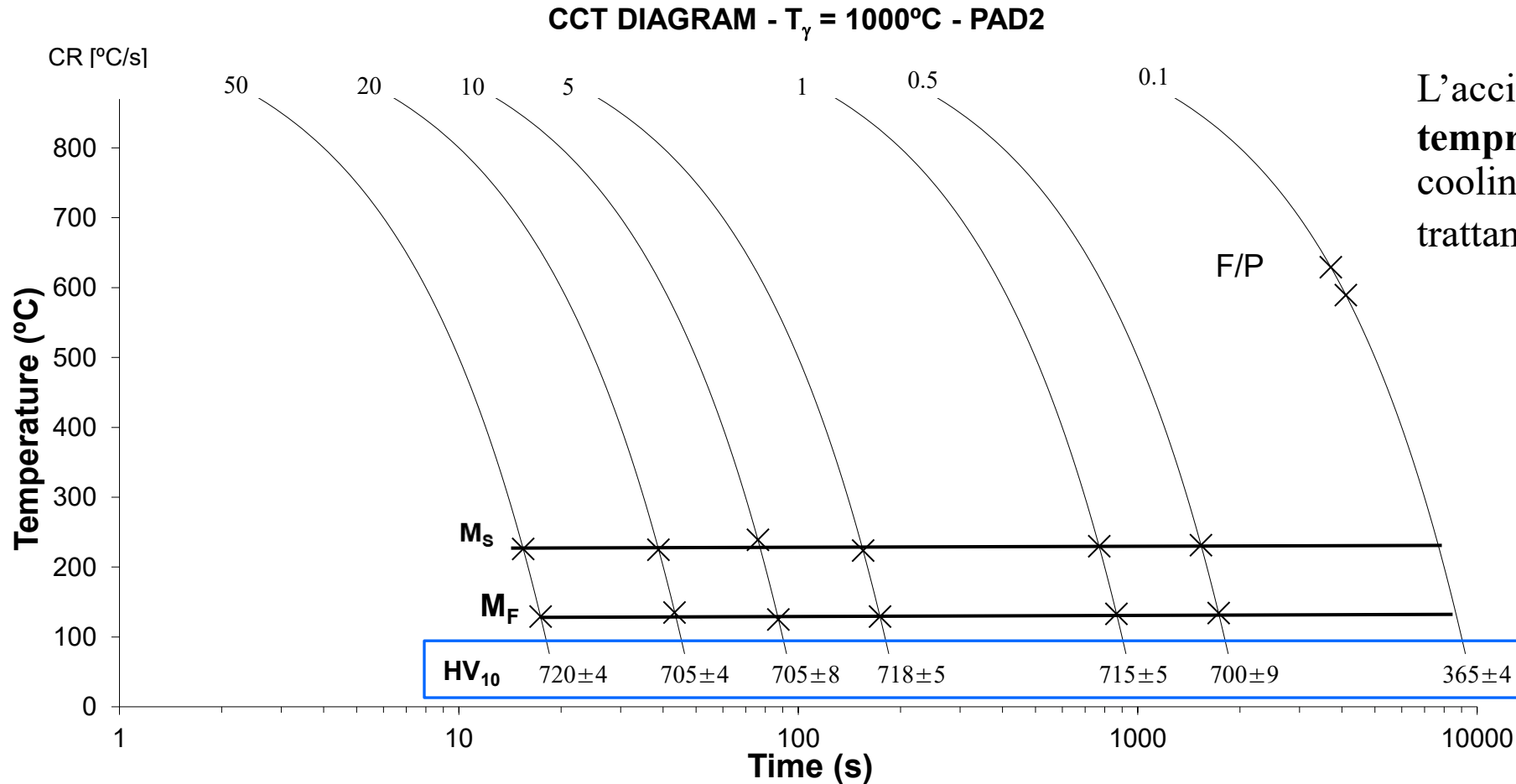
$$Ac_1 = 790^{\circ}\text{C}$$

$$Ac_3 = 823^{\circ}\text{C}$$



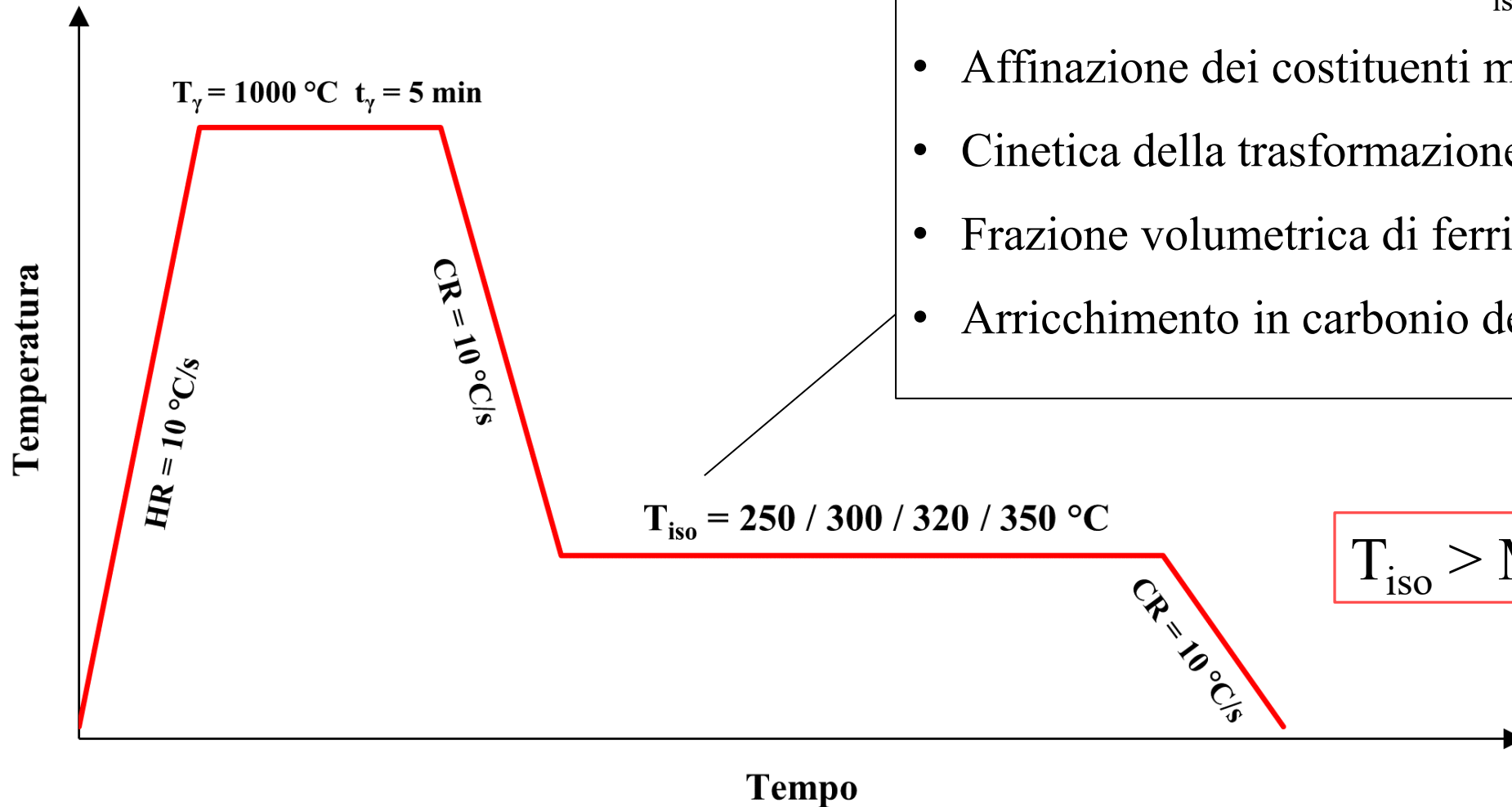
Viene scelta una  $T_{\gamma} = 1000^{\circ}\text{C}$  per garantire completa la austenitizzazione e la presenza di tutti gli elementi in soluzione solida

Al fine di costruire il diagramma CCT, vengono svolte ulteriori analisi dilatometriche con riscaldamento fino a 1000°C e raffreddamento a  $T_{amb}$  con 7 diverse cooling rate: 0.1/0.5/1/5/10/20/50 °C/s



L'acciaio manifesta un'**ottima temprabilità**, si sceglie una cooling rate di **10 °C/s** per il trattamento di austempering

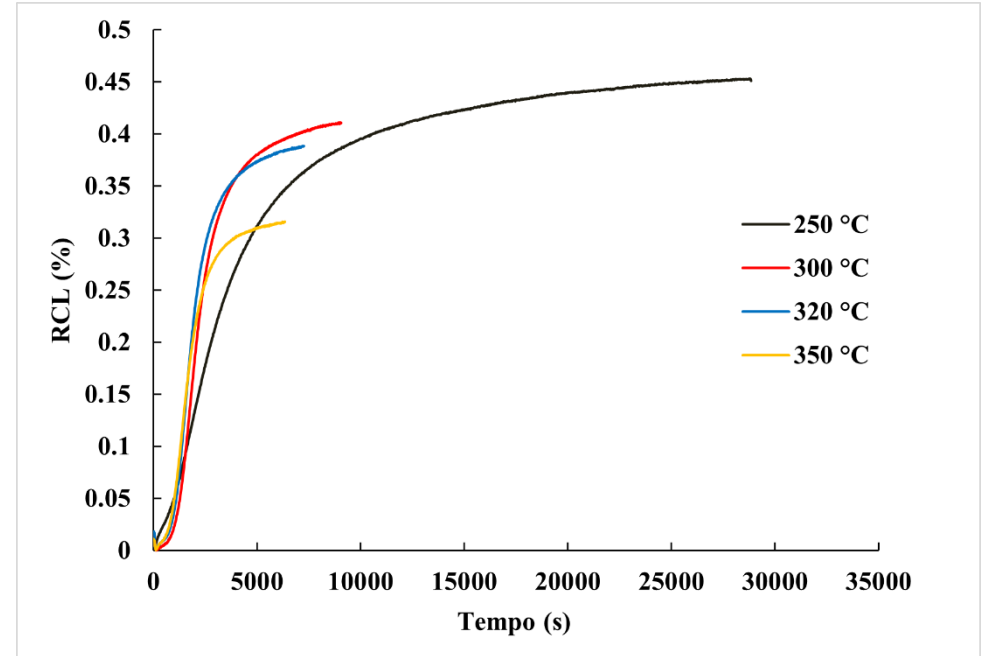
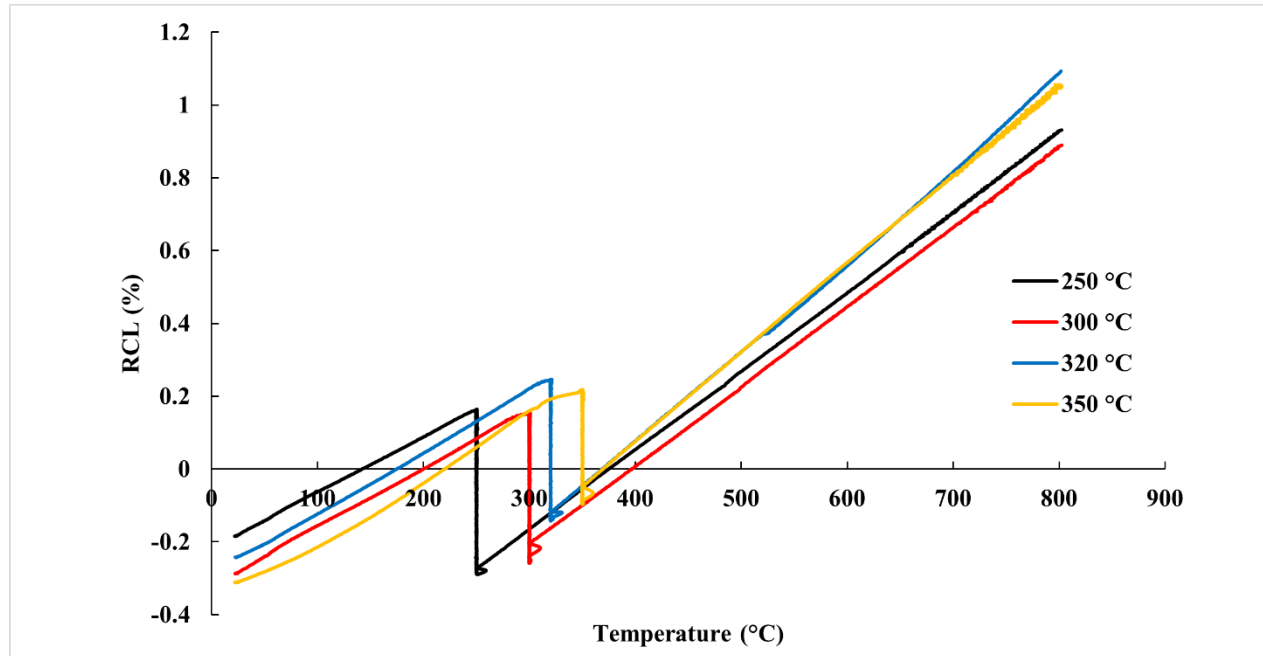
$M_S = 228 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $M_F = 130 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$



Che influenza ha la scelta di  $T_{iso}$ ?

- Affinazione dei costituenti microstrutturali
- Cinetica della trasformazione bainitica
- Frazione volumetrica di ferrite bainitica
- Arricchimento in carbonio dell'austenite

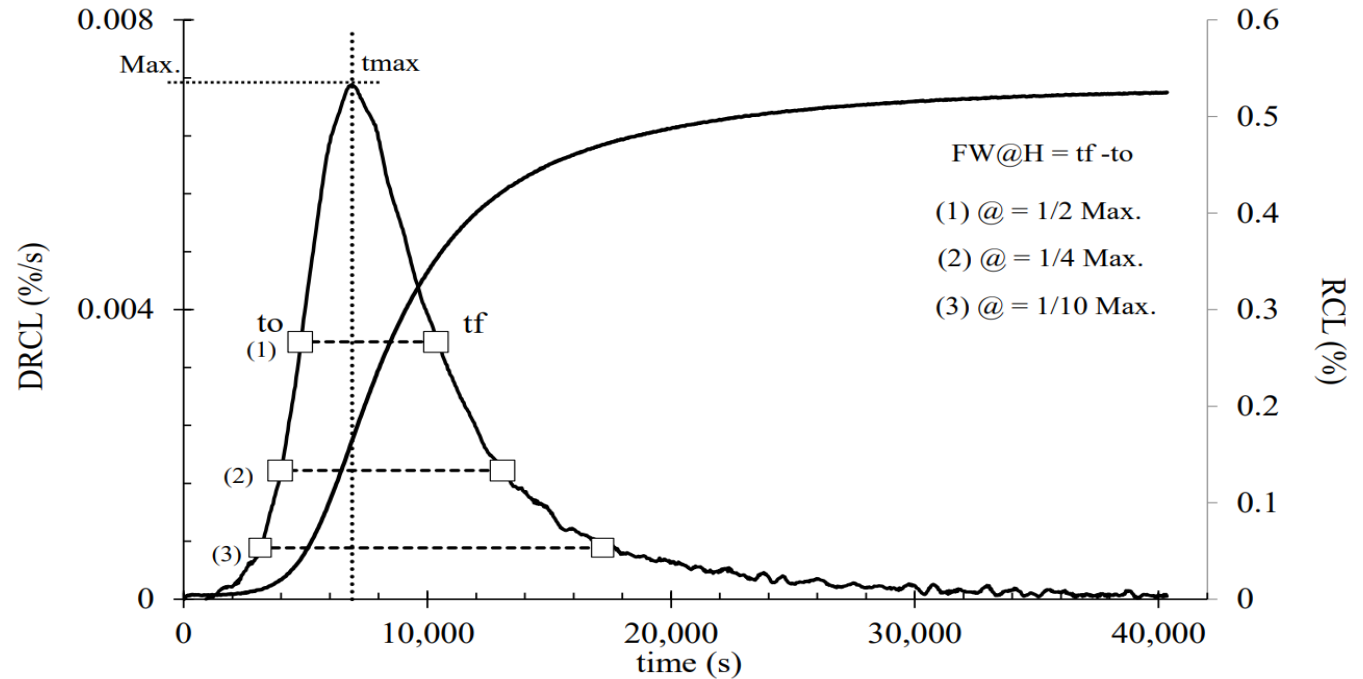
Seguendo il trattamento di austempering, vengono eseguite delle prove dilatometriche con le quattro  $T_{iso}$  scelte



- Nel campione trattato a 350 °C, il tratto di raffreddamento a seguito del mantenimento isoterma non è lineare
- Diminuendo  $T_{iso}$  si registra un aumento del valore di RCL raggiunto al termine della trasformazione bainitica

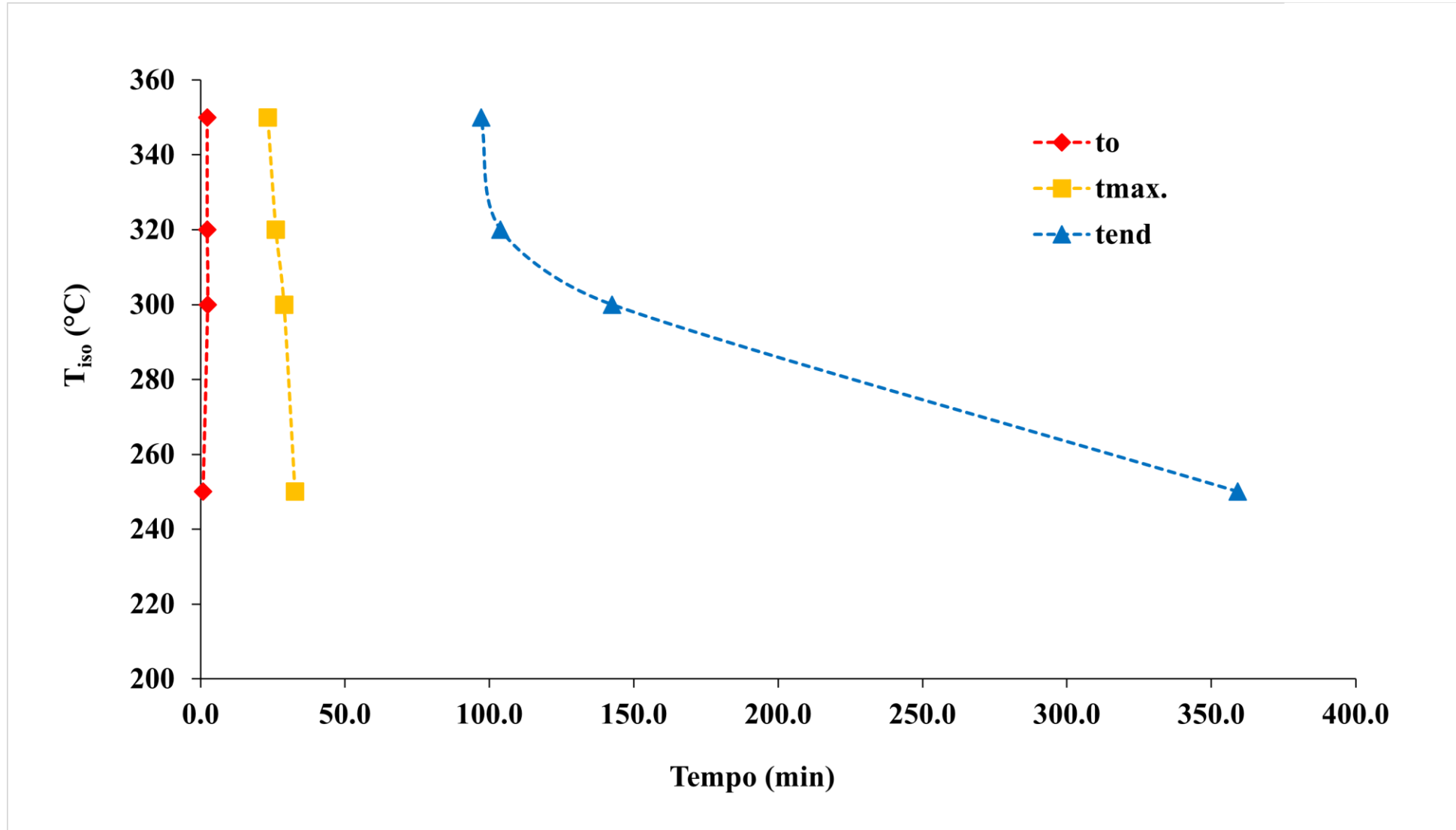


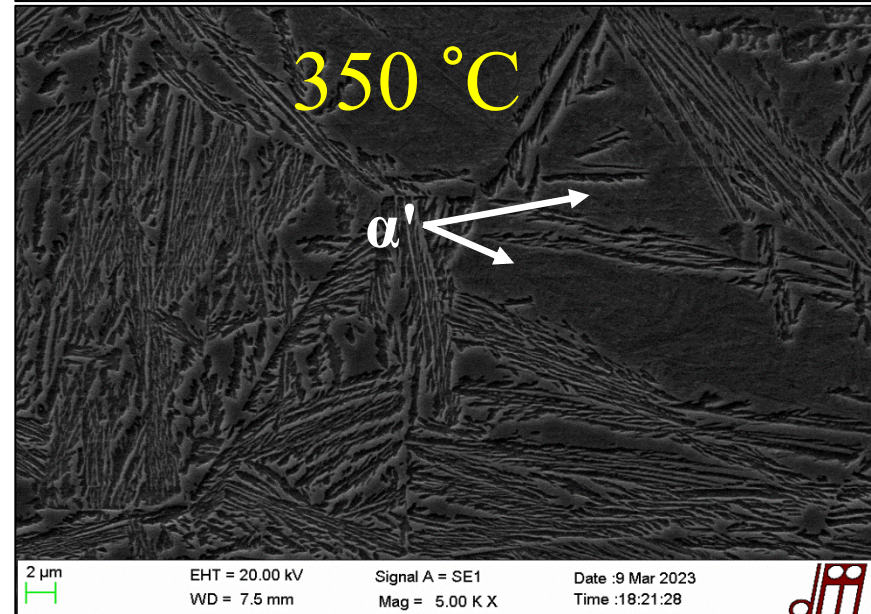
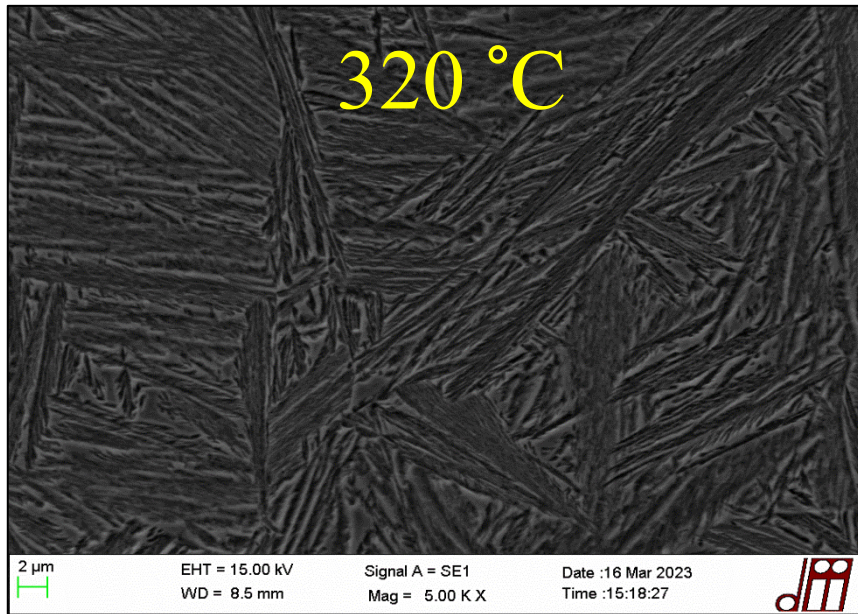
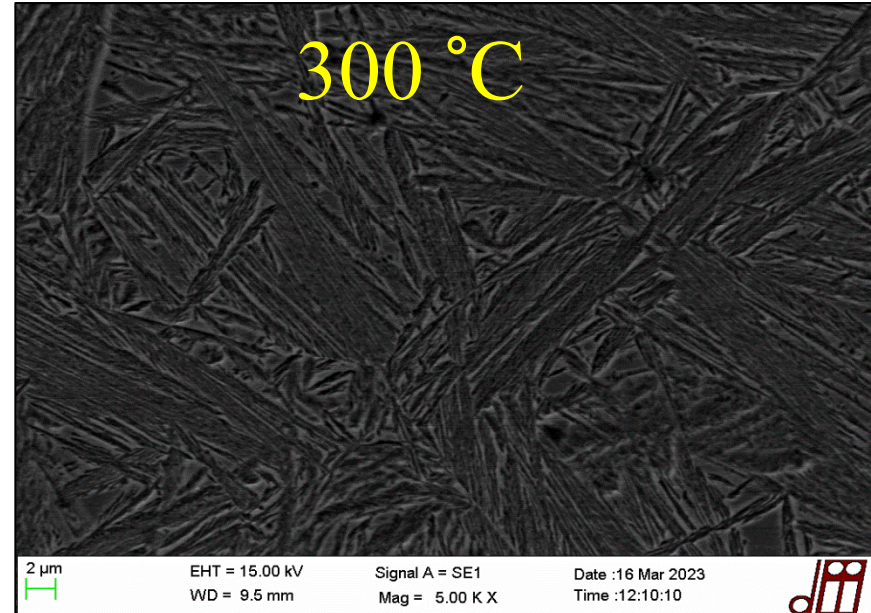
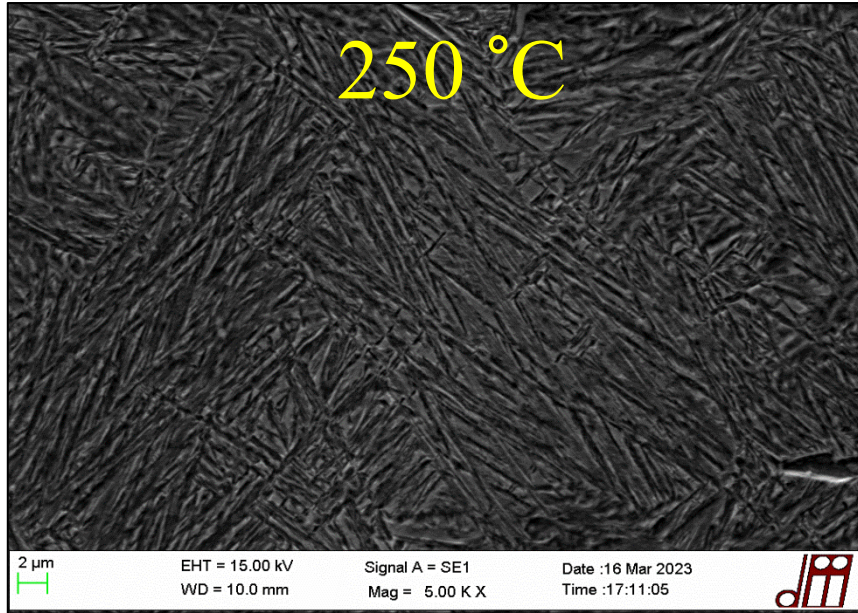
Seguendo un metodo [2] basato sulla determinazione dell'ampiezza delle curve DRCL vs tempo ad un certa altezza @ rispetto al punto di massimo, vengono determinati i tempi caratteristici della trasformazione bainitica

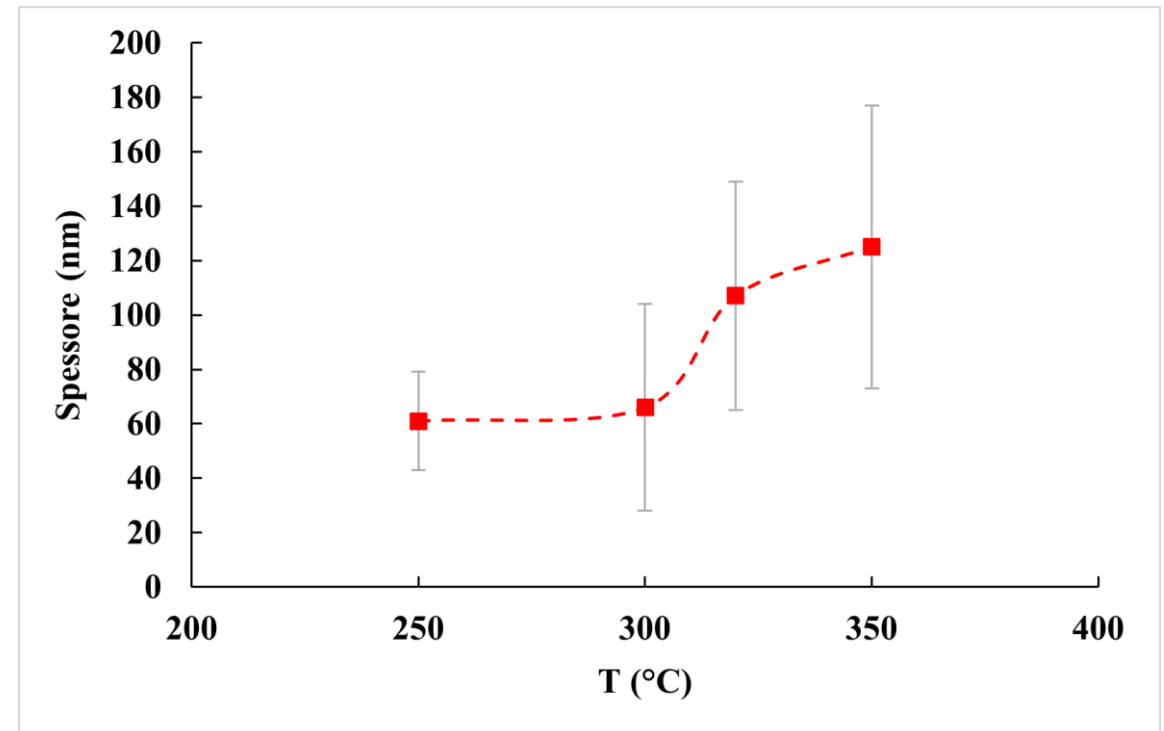
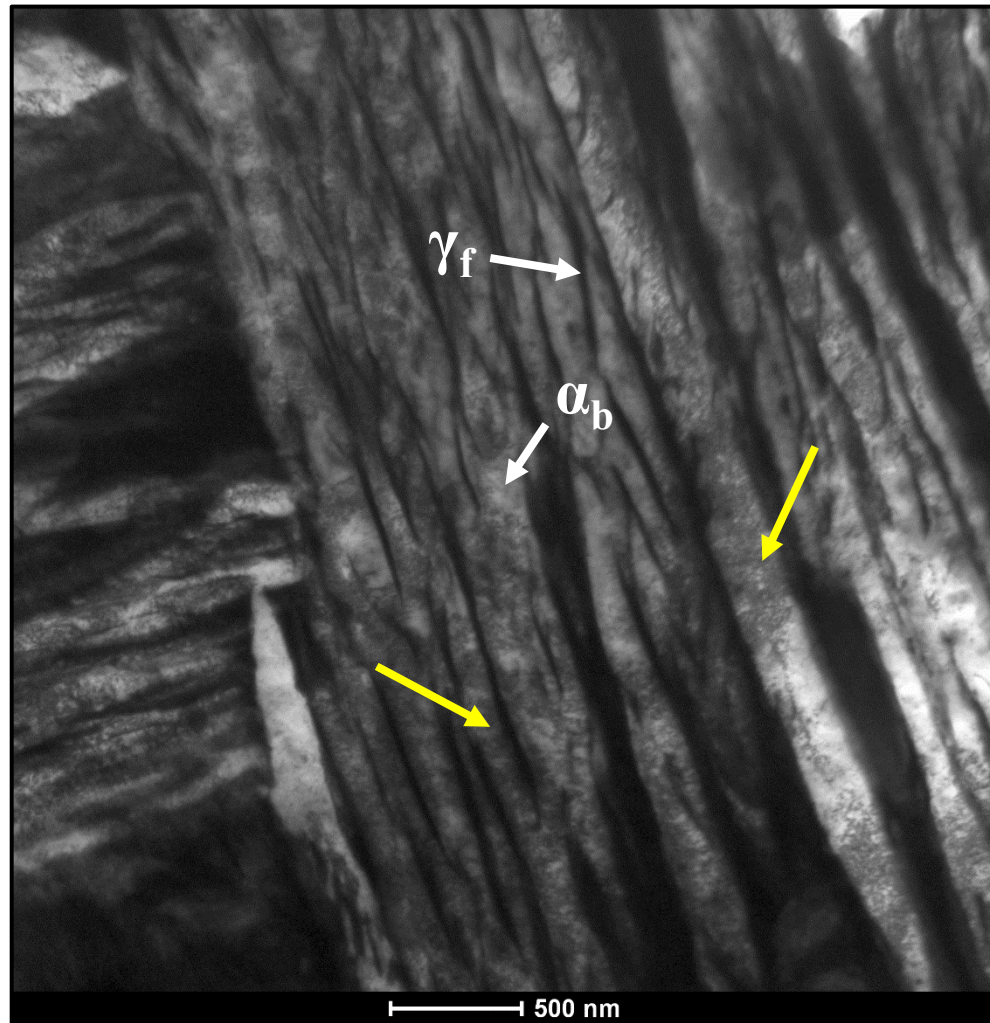


$T_{iso}$ (°C)	$t_0$ (min)	$t_{max}$ (min)	$t_f$ (min)
250	0.9	32.7	359.2
300	2.4	28.9	142.4
320	2.3	26.1	103.9
350	2.3	23.3	97.1

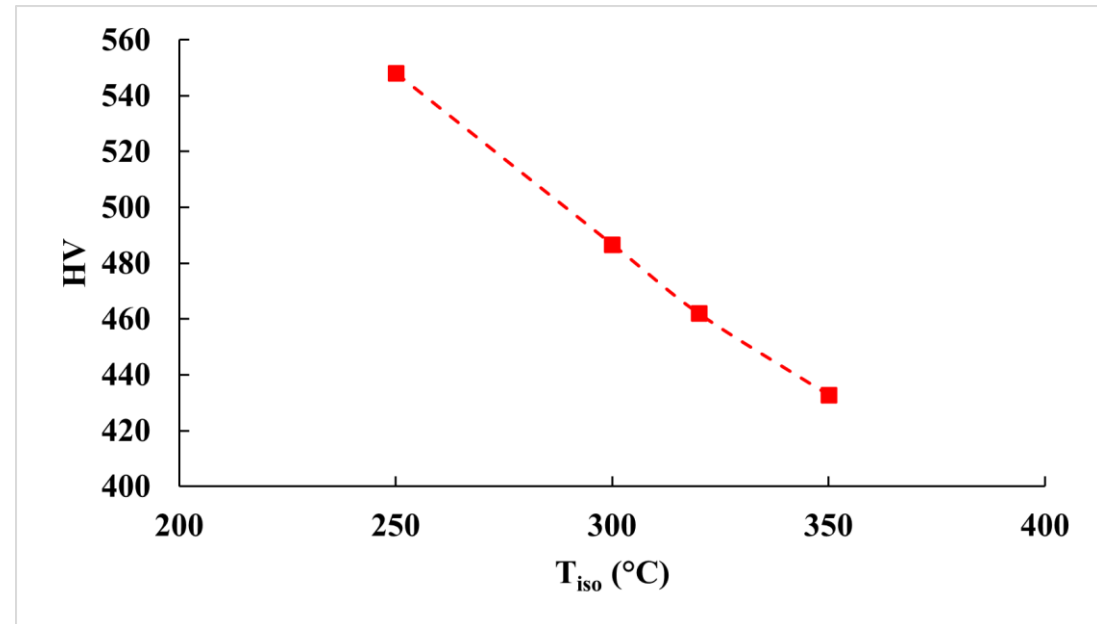
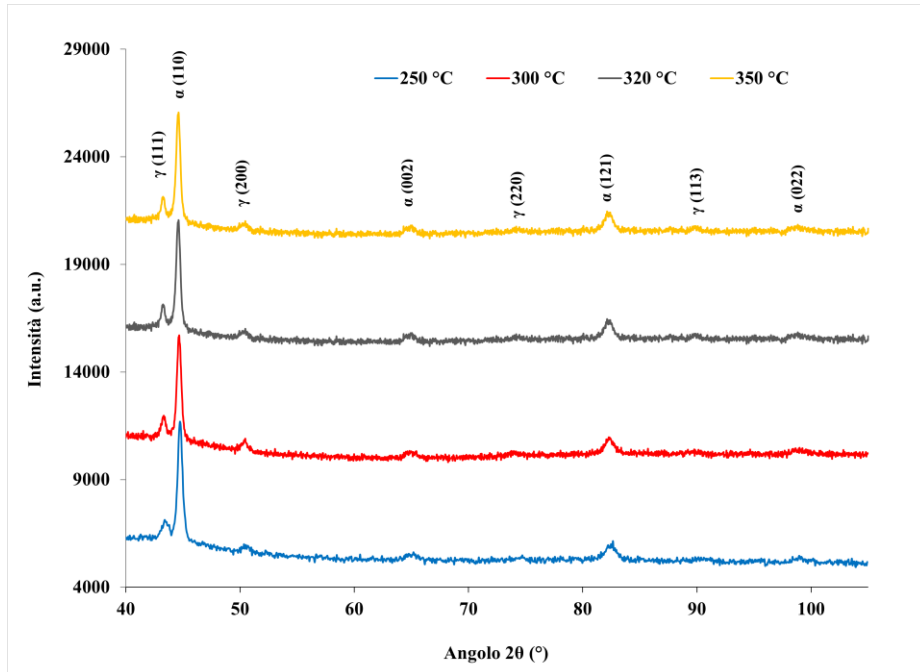
La cinetica della trasformazione bainitica viene rallenta diminuendo  $T_{iso}$







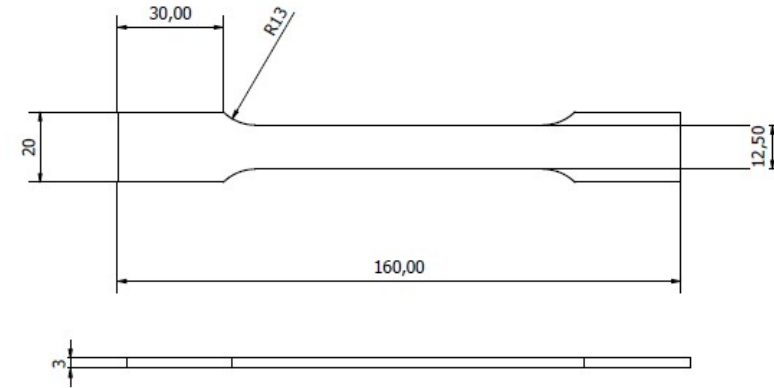
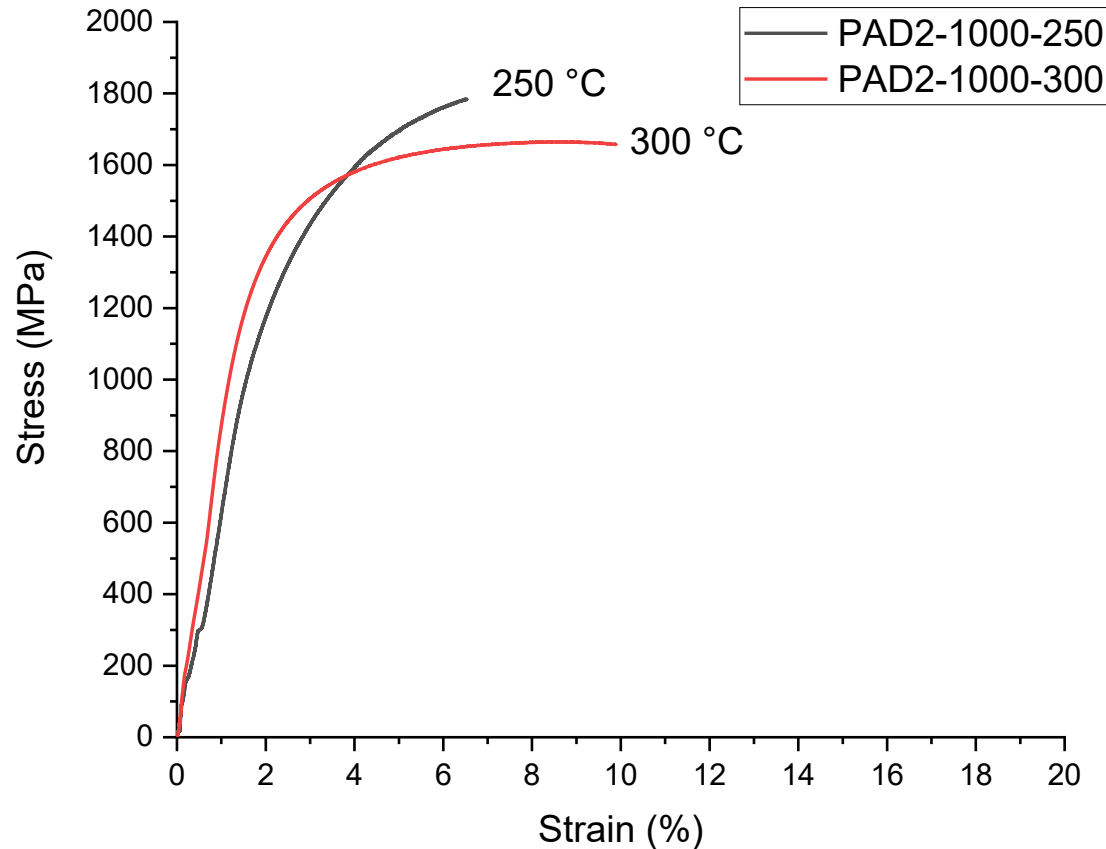
Foreste di dislocazioni (frecche gialle) nelle subunità ferritiche osservate tramite TEM nel campione trattato a 300 °C



$T_{iso}$ (°C)	$V_{\gamma}$ (%)	$C_{\gamma}$ (wt.%)	$V_{\alpha}$ (%)	$C_{\alpha}$ (wt.%)	$\rho$ (m <sup>-2</sup> )
250	21.3	1.19	78.7	0.19	$1.28 \cdot 10^{17}$
300	24.6	1.42	75.4	0.14	$1.05 \cdot 10^{17}$
320	27.5	1.38	72.5	0.12	$8.63 \cdot 10^{16}$
350	31.9	1.22	68.1	0.13	-

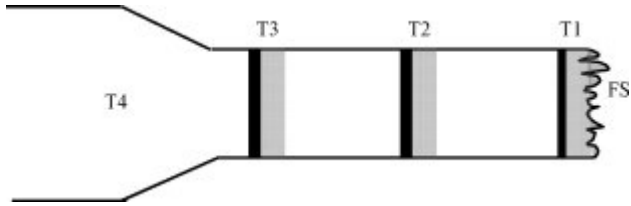
Sulla base delle precedenti considerazioni, si ritiene che le microstrutture ottenute da trattamento a 250°C e 300°C siano in grado di esibire il comportamento meccanico migliore

Vengono sottoposti a prova di trazione 3 provini con geometria ad osso di cane per ciascuna microstruttura



$T_{iso}$ (°C)	$\sigma_y$ (MPa)	UTS (MPa)	Elongazione a rottura (%)
250	1193 ± 67	1775 ± 25	6.7 ± 2.5
300	1224 ± 12	1665 ± 2	9.7 ± 1.4

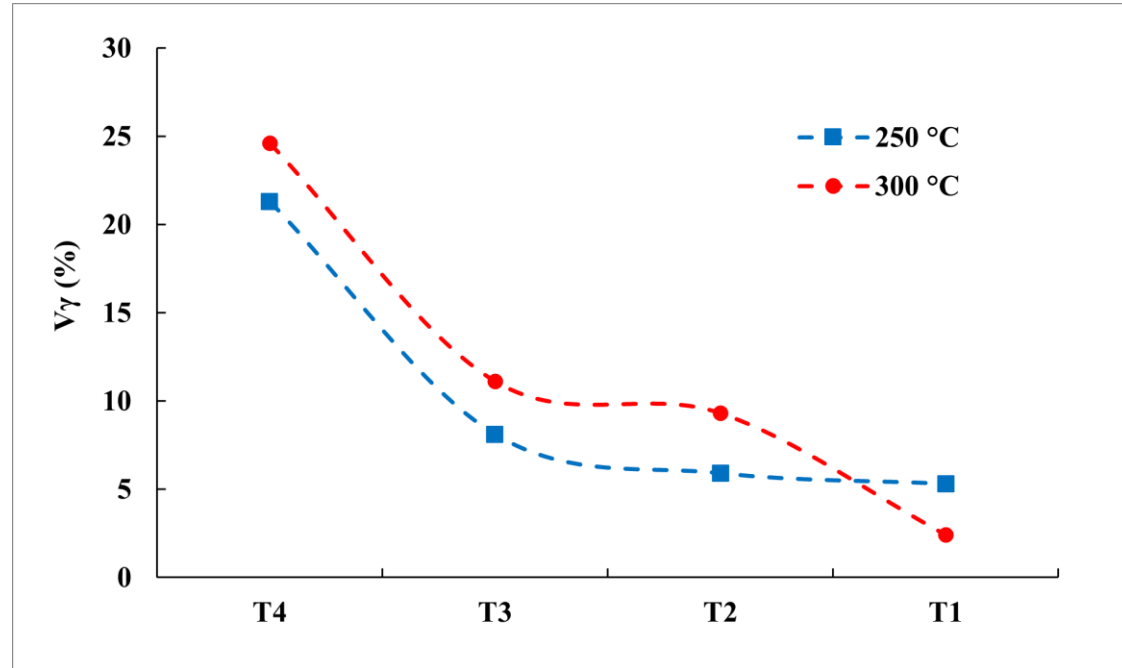
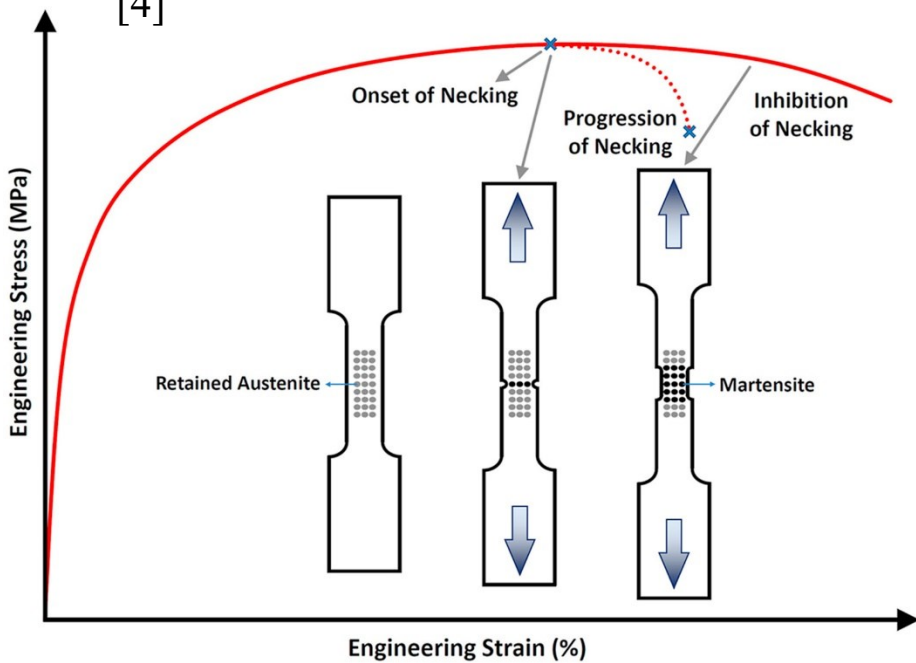
[3]



Il fenomeno di decomposizione dell'austenite residua in martensite durante la deformazione prende il nome di **effetto TRIP** (TRansformation Induced Plasticity)

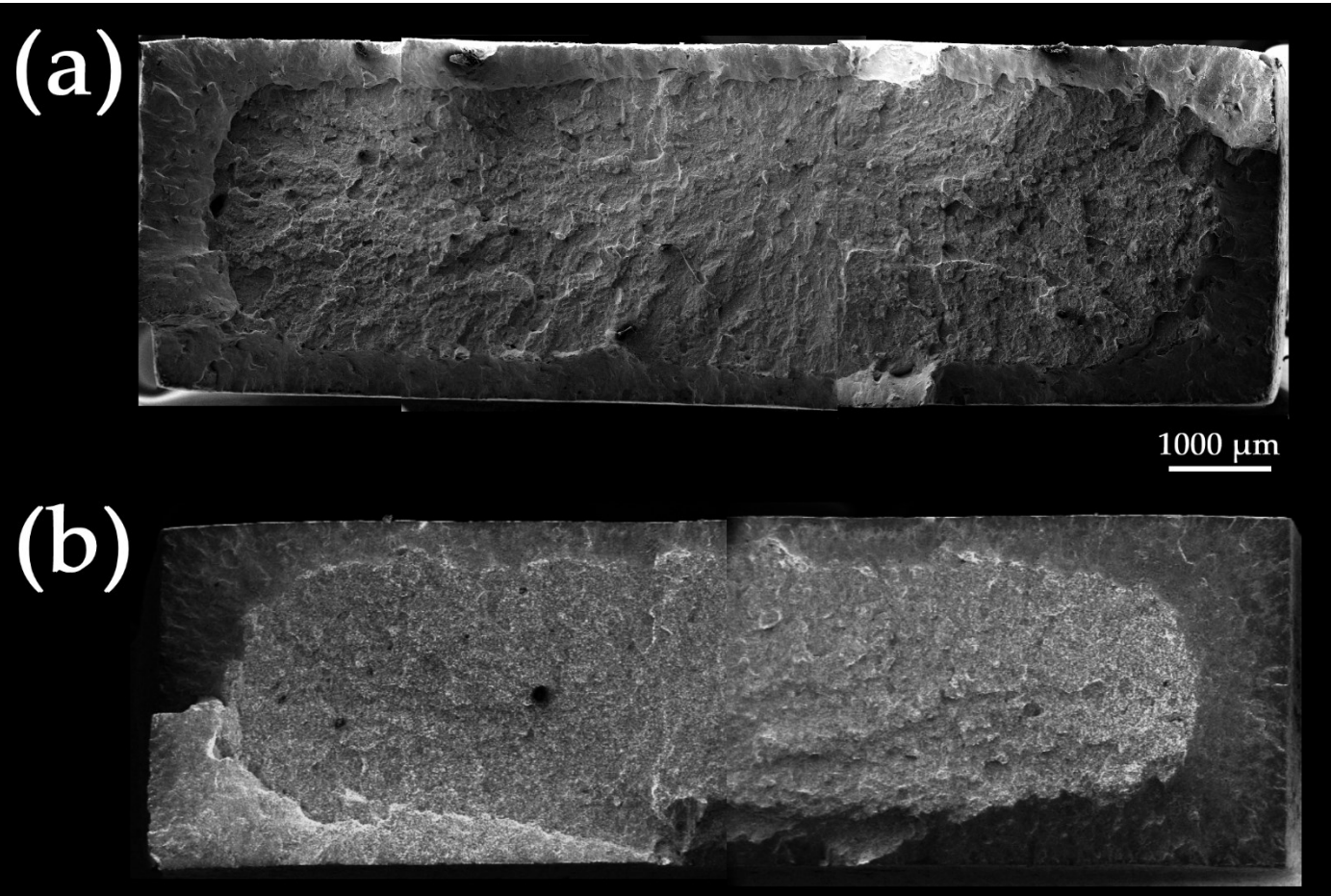
L'austenite residua controlla la duttilità dell'acciaio

[4]

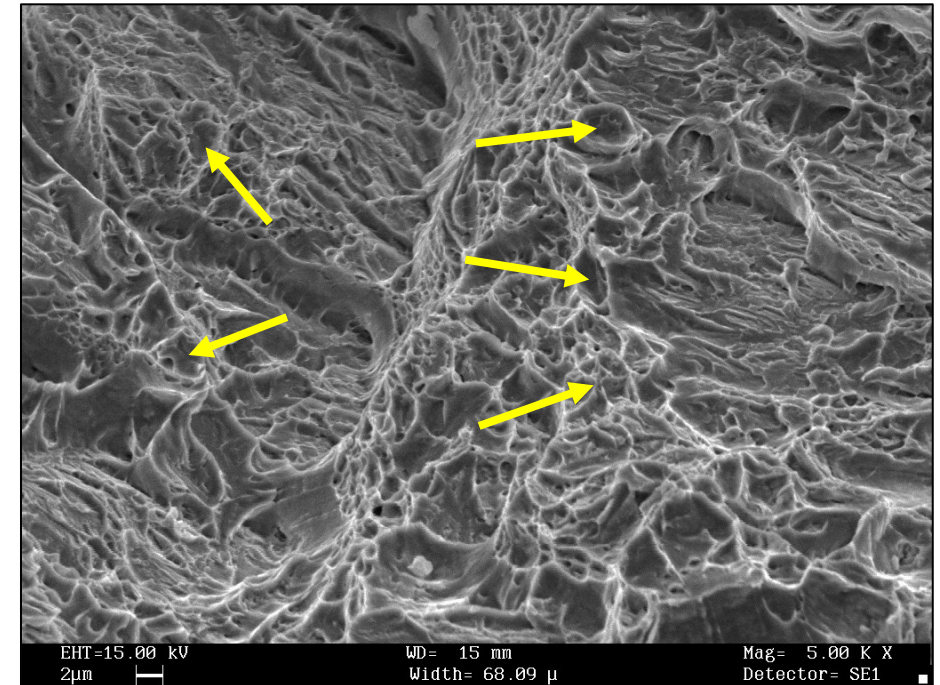


[3]: C. Garcia-Mateo, F.G. Caballero, T. Sourmail, M. Kuntz, J. Cornide, V. Smanio, and R. Elvira. Tensile behaviour of a nanocrystalline bainitic steel containing 3wt% silicon. Materials Science and Engineering: A, 549:185–192, 2012.

[4]: Maryam Soleimani, Alireza Kalhor, and Hamed Mirzadeh. Transformation-induced plasticity (trip) in advanced steels: A review. Materials Science and Engineering: A, 795:140023, 2020.



- Frattura di tipo **coppa-cono**
- **Dimples** sulla superficie di frattura





- Diminuendo  $T_{iso}$  si raggiungono microstrutture più fini, riuscendo ad ottenere subunità ferritiche di spessore mediamente inferiore ai 100 nm effettuando il trattamento a 250°C e 300°C.
- Il tempo necessario a raggiungere il completamento della trasformazione bainitica aumenta al diminuire di  $T_{iso}$ .
- La frazione volumetrica di ferrite bainitica aumenta diminuendo  $T_{iso}$ .
- L'arricchimento in carbonio della fase austenitica viene smorzato a basse temperature di trattamento a causa della grande densità di difetti che si accumula nella microstruttura.
- Il valore di UTS è influenzato dalla frazione volumetrica e dalle caratteristiche della fase ferritica presente.
- La duttilità dell'acciaio è controllata dalla fase austenitica tramite l'effetto TRIP.