

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Chimica e dei Materiali

«Studio del comportamento a tribo- corrosione di un acciaio TRIP con microstruttura bainitica»

Relatore: Ing. PhD Pezzato Luca

Correlatori: Ing. Franceschi Mattia

Ing. Zin Valentina (*Istituto di Chimica della
Materia Condensata e di Tecnologie per
l'Energia - ICMATE*)

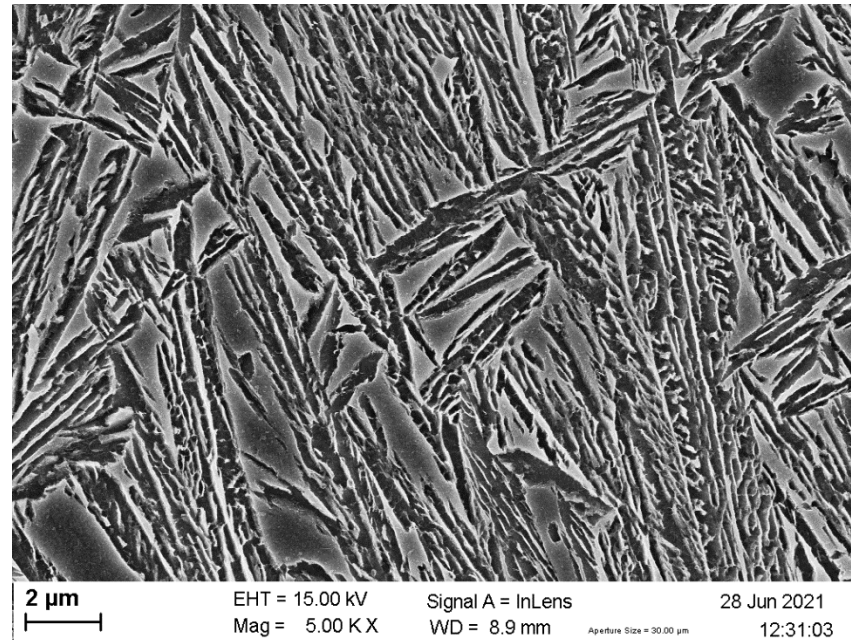
Laureando: *Garbelotto Giacomo*

1196264

Padova, 15/03/2023

Gli acciai bainitici sono una categoria di acciai la cui microstruttura è costituita da ferrite bainitica e austenite residua. Le eccezionali proprietà meccaniche di questi acciai derivano dall'effetto TRIP (Transformation-Induced Plasticity) la trasformazione dell'austenite residua in martensite, indotta dall'applicazione di uno sforzo, e dalla dimensione nanometrica dei costituenti microstrutturali.

Tale microstruttura viene ottenuta tramite il trattamento di *Austempering*.



L'obiettivo di questo lavoro è descrivere il legame presente tra resistenza a tribocorrosione e la microstruttura dell'acciaio, ottenuta variando la temperatura del processo di *Austempering* tra 250 e 350 °C.

Lo studio ha coinvolto le seguenti attività sperimentali:

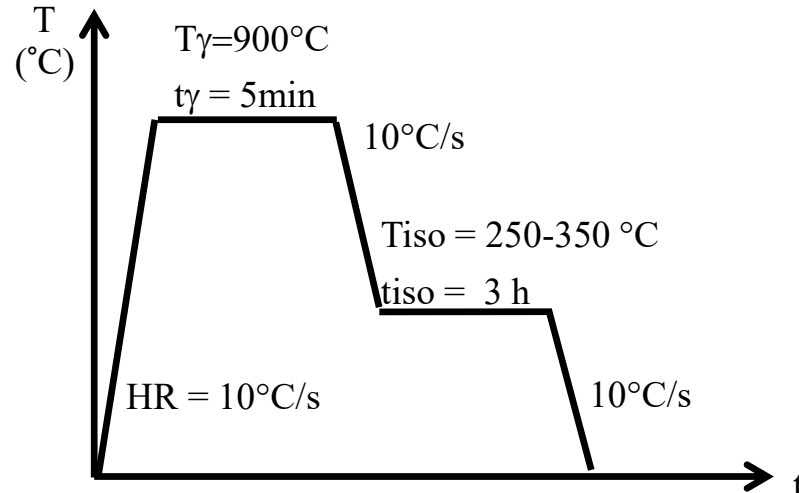
- analisi della resistenza a corrosione mediante prove di polarizzazione anodica in soluzione elettrolitica;
- prove di tribocorrosione per verificare l'usura del materiale dovuta all'effetto sinergico di attrito e corrosione in condizioni di lavoro simulate;
- analisi delle piste di usura mediante profilometro e stereomicroscopio sulla sezione mediana;
- analisi SEM delle piste di usura per analizzare il comportamento del materiale e i meccanismi responsabili dell'usura.

Per lo studio si è scelto un acciaio bainitico con composizione definita riportata in tabella.

Fe	C	Si	Mn	Al
Bal.	0.38	3.20	2.65	0.10

L'aggiunta di manganese, elemento gammageno, stabilizza l'austenite, mentre silicio ed alluminio prevengono cementite.

I campioni sono stati sottoposti a ricottura alla temperatura di 900°C, seguita da trattamento di austempering in sali fusi alle temperature di 250°C, 300°C e 350°C. Come riferimento si è scelta la microstruttura ottenuta con ricottura a 900°C e raffreddamento naturale a forno spento.



Le prove sono state eseguite su provini quadrati 20x20x2 mm tagliati per elettroerosione a filo e lucidati con passaggi su carte abrasive e panni con sospensioni diamantate per minimizzare la rugosità superficiale.



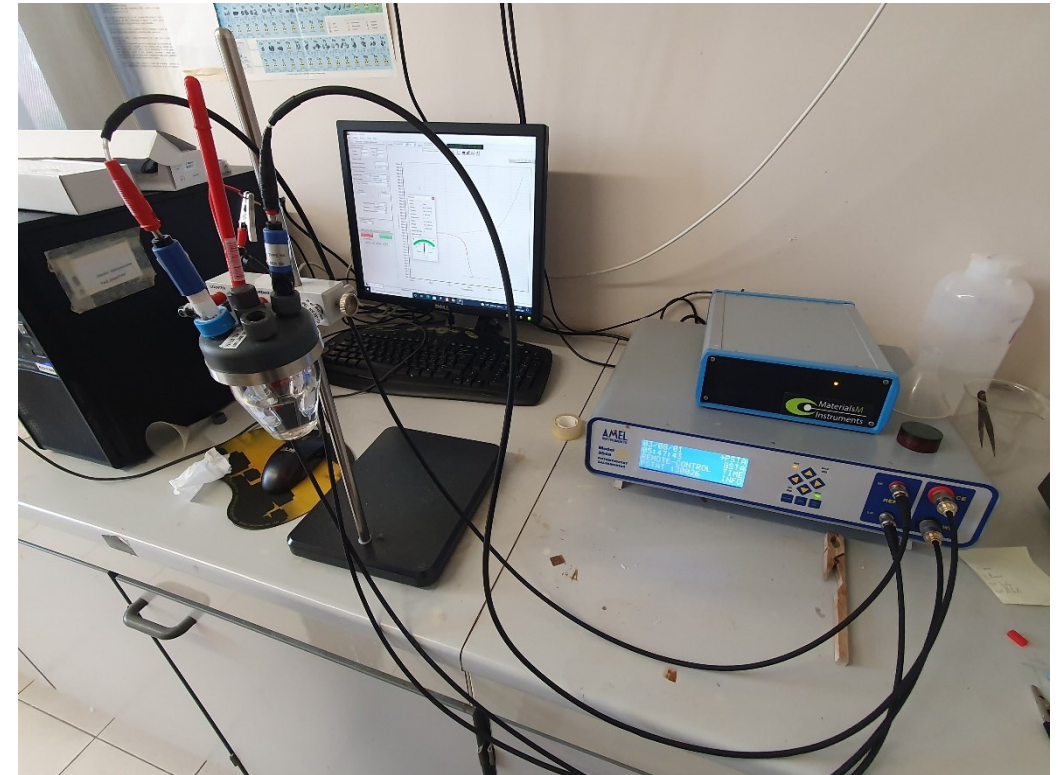
Finitura superficiale provini

La resistenza a corrosione è stata valutata attraverso prove potenziodinamiche.

Si è utilizzato una configurazione a tre elettrodi costituita da:

- il campione in esame (elettrodo di lavoro);
- un elettrodo al calomelano saturo (elettrodo di riferimento);
- un elettrodo in platino (controelettrodo).

Le prove sono state condotte in una soluzione acquosa contenente lo 0.9%wt di NaCl alla temperatura di 25°C, registrando la corrente di corrosione generata dall'applicazione di un potenziale variabile in un intorno dell'OCV (*Open Circuit Voltage*).



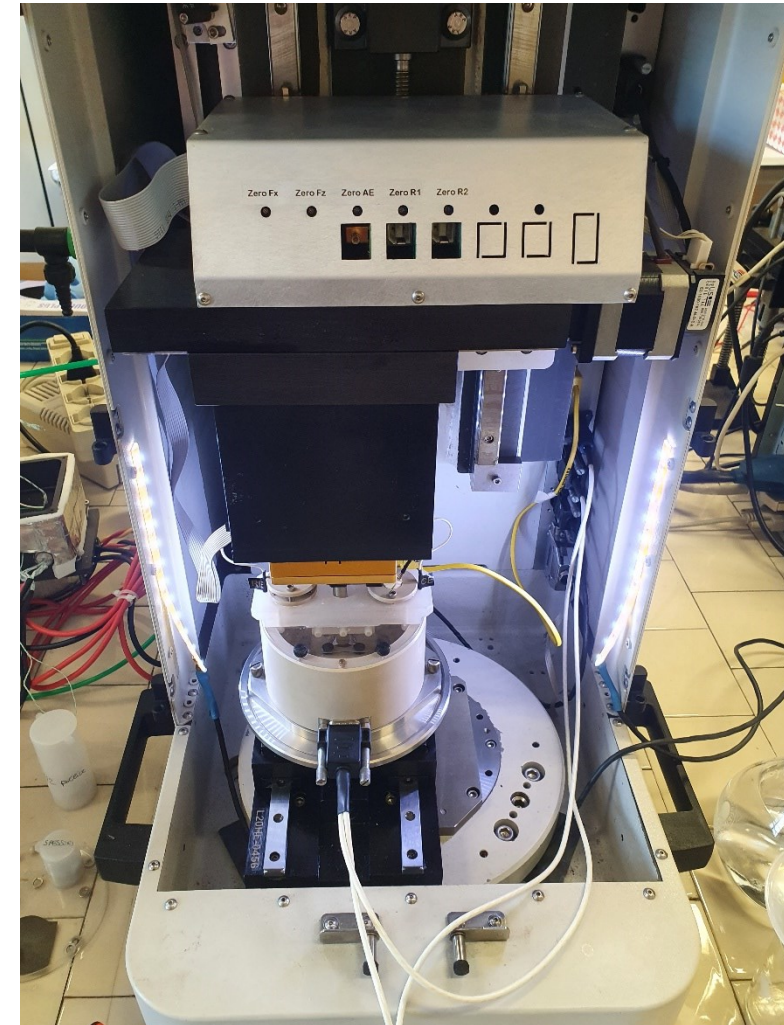
Setup per prove di corrosione

Per condurre le prove di tribocorrosione è stato utilizzato un tribometro, uno strumento che consente di riprodurre le condizioni di usura e corrosione tipiche di una determinata applicazione. La prova consiste nell'applicazione, attraverso un corpo antagonista, di uno sforzo di attrito dinamico alla superficie del campione immerso in una soluzione elettrolitica, responsabile dei fenomeni di corrosione.

Durante il processo vengono registrati dati caratterizzanti la risposta meccanica e chimica del materiale, necessari per valutarne la resistenza alle condizioni di esercizio.

La prova di tribocorrosione è costituita da 3 fasi:

1. misurazione iniziale dell'OCV a sistema in quiete (15 min);
2. sliding del corpo antagonista sulla superficie del campione (1 ora);
3. misurazione finale dell'OCV a sistema deformato (15 min).

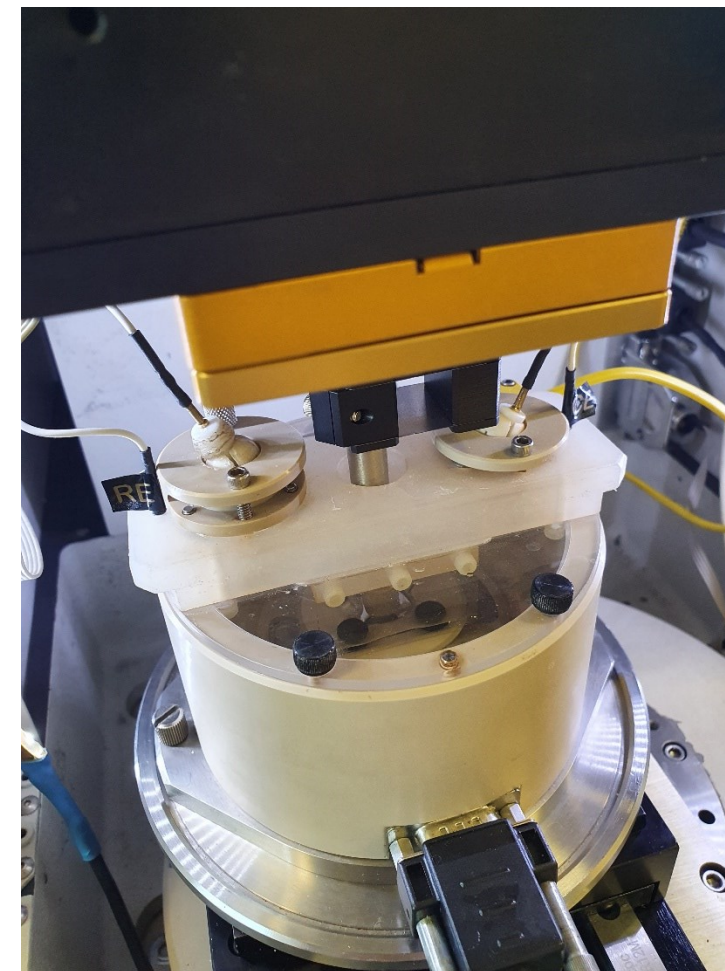


Setup per prove di tribocorrosione

Per le prove di tribocorrosione si è utilizzato un sistema a 3 elettrodi e analogo elettrolita, mantenuto a 24°C durante l'intero processo. I potenziali registrati sono riferiti ad un elettrodo di riferimento al cloruro di argento, Ag/AgCl.

Il corpo antagonista scelto è una sfera di allumina Al_2O_3 di 2.5 mm di diametro. Lo sliding è stato condotto applicando uno sforzo di attrito su movimenti oscillatori di ampiezza 2 mm e frequenza 1 Hz.

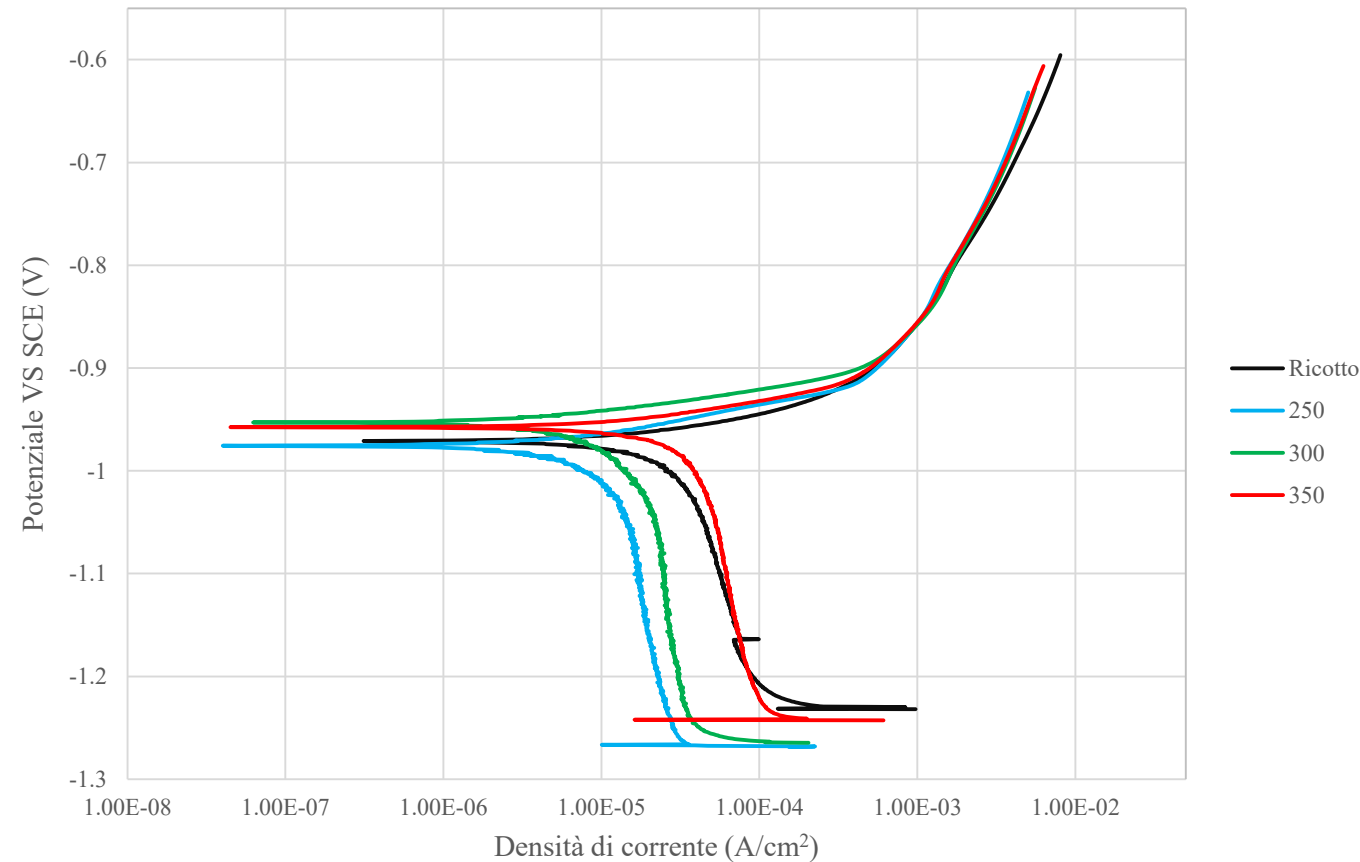
In questo studio sono stati condotti due set di prove, applicando sforzi pari a 1.5 GPa e 2 GPa.



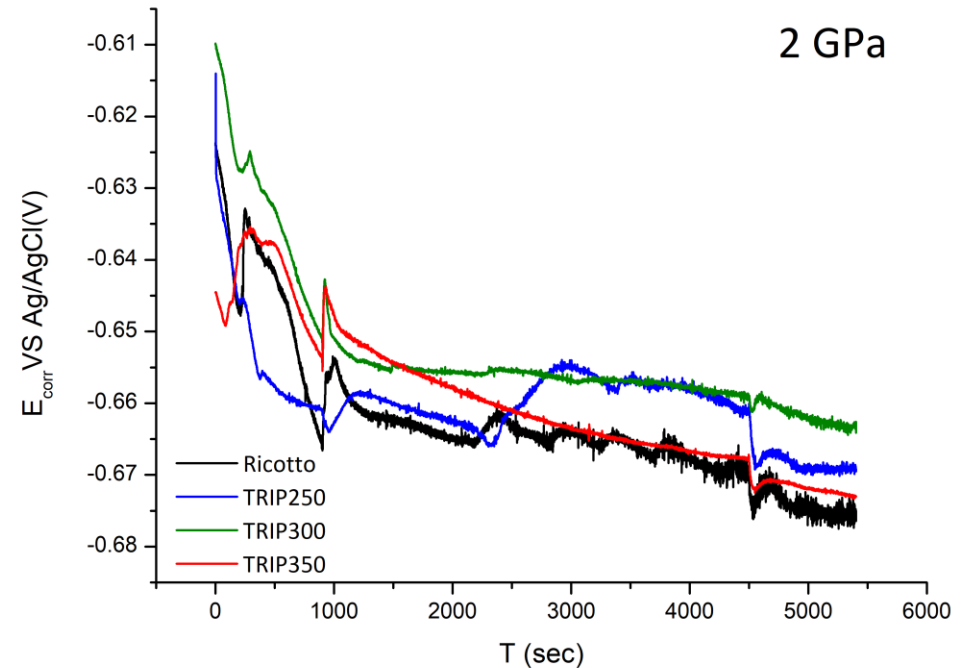
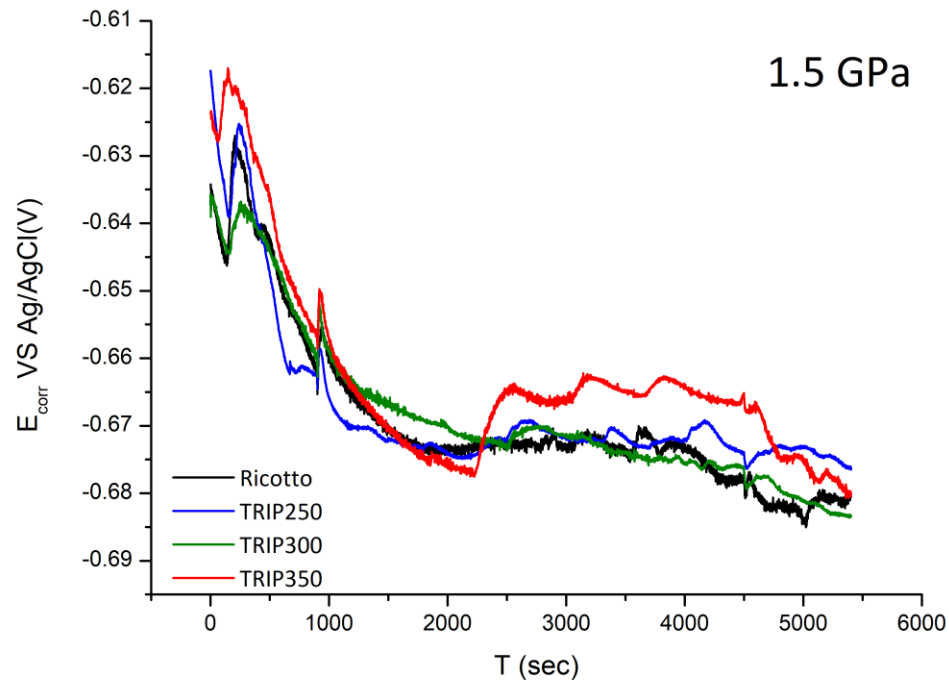
Cella contenente campione, sistema a 3 elettrodi e corpo antagonista

Dalle prove potenziodinamiche si può osservare che il trattamento di *Austempering* determina minime variazioni dell'OCV e del potenziale di corrosione E_{corr} . Possiamo quindi affermare che il comportamento a corrosione resti invariato.

Campione	OCV(V)	$E_{corr}(V)$	$i_o(A/cm^2)$
Ricotto	-0.954	-0.973	1.01E-05
250	-0.991	-0.976	2.85E-06
300	-0.987	-0.957	2.88E-06
350	-0.965	-0.959	1.05E-06



L'andamento del potenziale di corrosione durante le prove rivela una variazione minima del comportamento a corrosione per le diverse microstrutture del materiale, come previsto dalla preliminare analisi degli OCV. Inoltre, si può affermare che l'aumento del carico applicato, e quindi della trasformazione martensitica indotta dalla deformazione, non altera significativamente la resistenza alla corrosione. Si può concludere quindi che la resistenza a corrosione è debolmente influenzata dalla microstruttura.

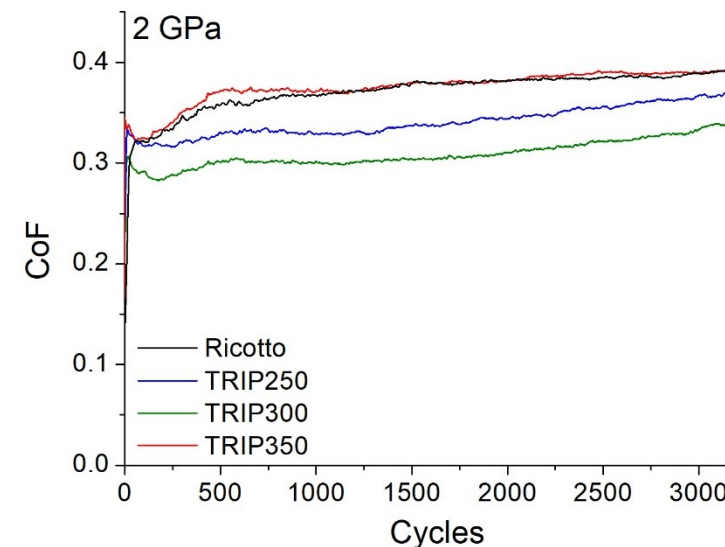
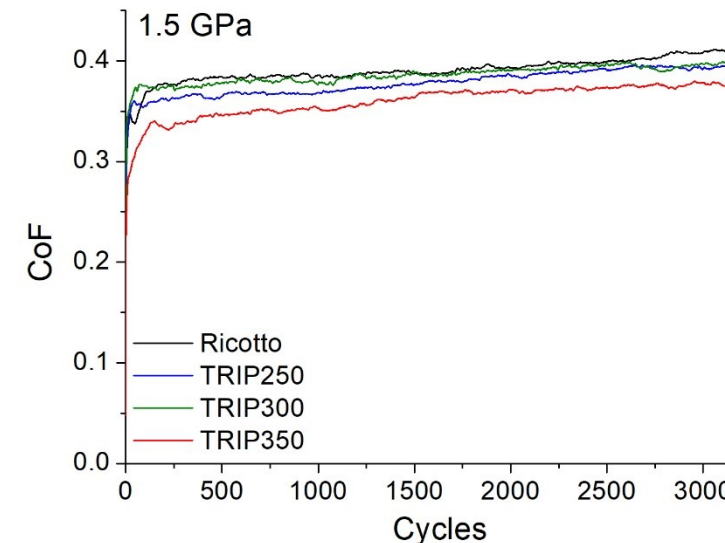


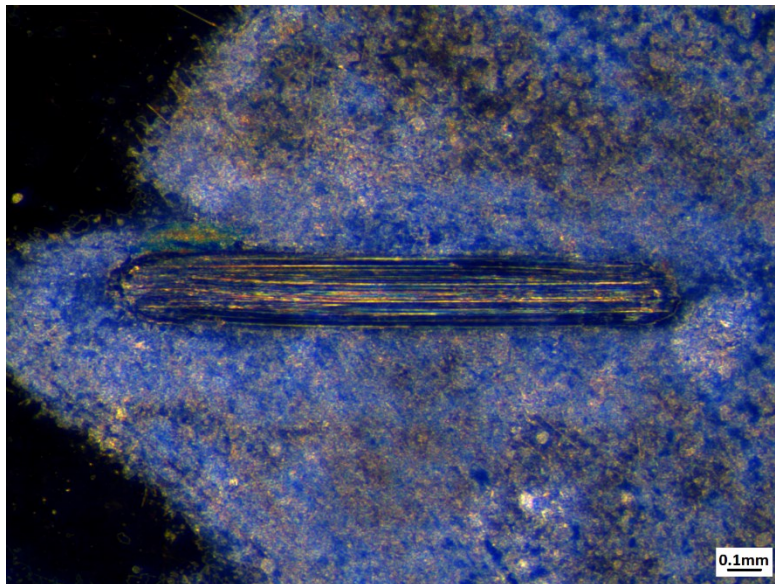
Dall'analisi del coefficiente di attrito riportato in figura si possono distinguere due stadi:

- 1. Stadio di rodaggio:** le dimensioni ridotte della superficie di contatto determinano un brusco aumento del CoF;
- 2. Stadio stazionario:** la maggiore area di contatto, accresciuta dalla rimozione della rugosità superficiale, determina una stabilizzazione del CoF.

L'aumento del carico imposto determina una maggior differenziazione del CoF medio, il cui valore è influenzato dalle proprietà dello stato usurato.

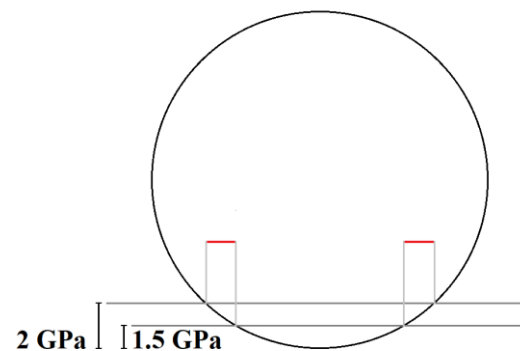
<i>Campione</i>	<i>CoF (1.5 GPa)</i>	<i>CoF (2 GPa)</i>
<i>Ricotto</i>	0.390 ± 0.001	0.375 ± 0.002
<i>TRIP250</i>	0.363 ± 0.001	0.341 ± 0.001
<i>TRIP300</i>	0.386 ± 0.001	0.328 ± 0.001
<i>TRIP350</i>	0.360 ± 0.001	0.376 ± 0.001





Pista d'usura su campione TRIP300 ottenuta con sforzo di 1.5GPa

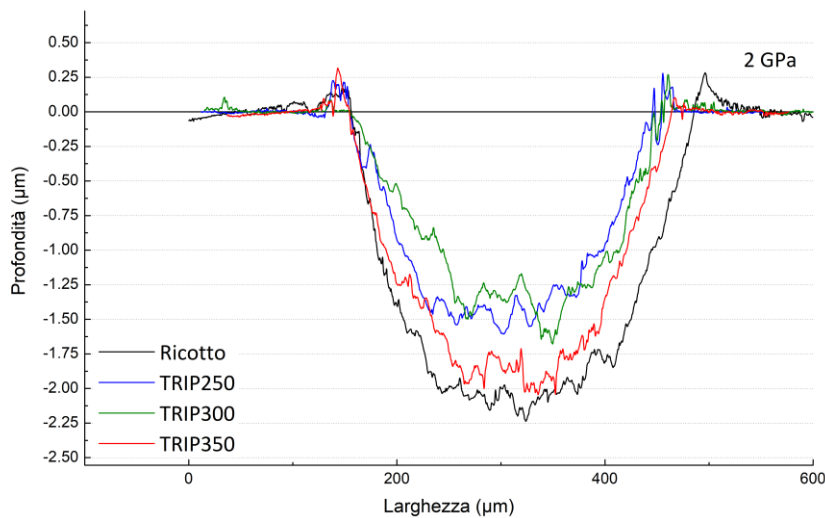
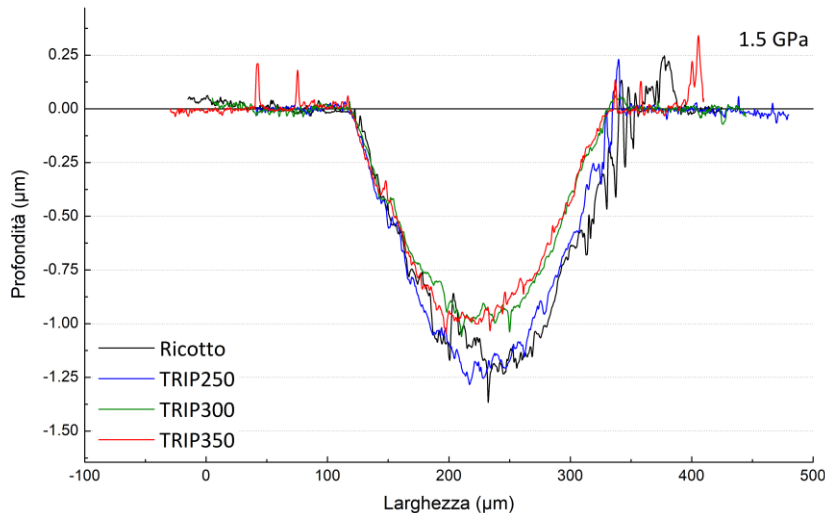
L'analisi al microscopio ottico evidenzia come l'aumento del carico imposto determina maggiori lunghezze delle piste di usura.



L'aumento della pressione si traduce in sforzi di taglio sulla superficie di entità maggiore, e quindi una maggior rimozione di materiale.

Inoltre, come osservabile nello schema riportato, a carichi maggiori aumenta la penetrazione del corpo antagonista, accrescendo la superficie di contatto e, di conseguenza, la lunghezza totale di superficie coinvolta nell'usura.

<i>Campione</i>	<i>Lunghezza - 1.5 Gpa (μm)</i>	<i>Lunghezza - 2 Gpa (μm)</i>
<i>Ricotto</i>	1610	1837
<i>TRIP250</i>	1722	2004
<i>TRIP300</i>	1715	2000
<i>TRIP350</i>	1661	1930



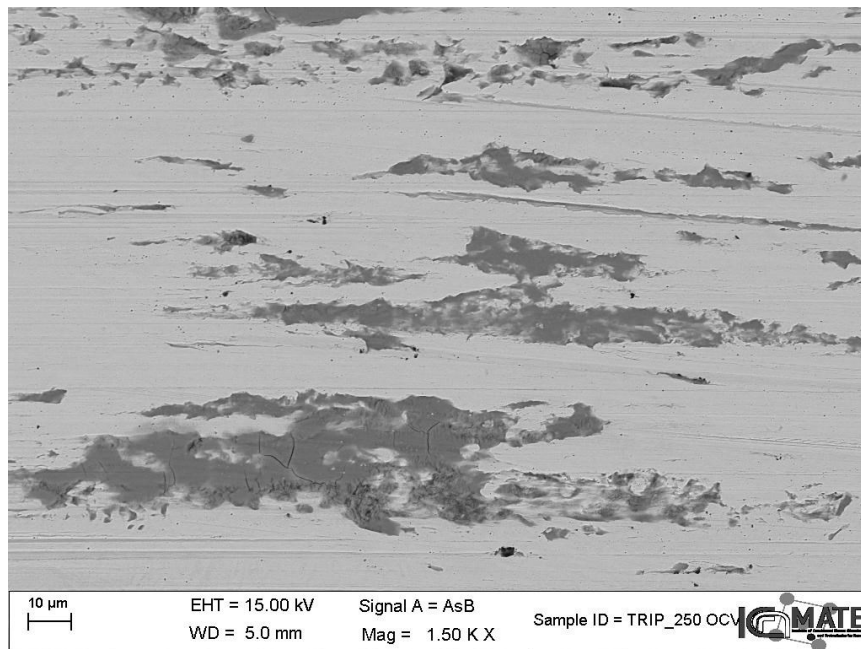
Attraverso analisi al profilometro è stato possibile ricostruire i profili delle piste di usura.

Dai dati raccolti, sono stati identificati tre parametri rilevanti: la profondità massima delle piste (p), la larghezza (l) e l'area della sezione (A), attraverso i quali è stato calcolato il volume totale asporto (V), indice della risposta tribologica del materiale.

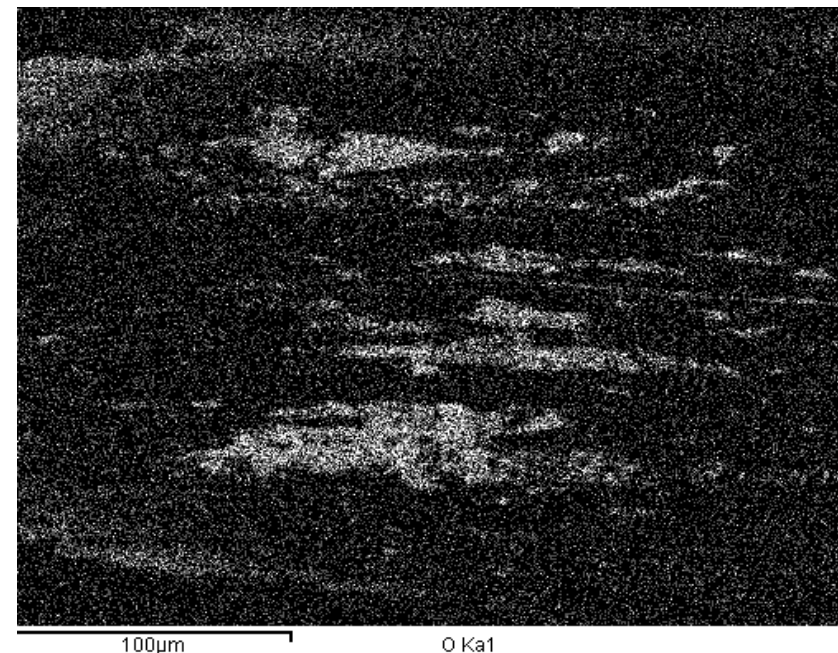
I risultati delle analisi condotte sui campioni a pressioni elevate hanno evidenziato delle differenze significative nei loro profili rispetto ai campioni a pressioni più basse. Queste differenze potrebbero essere attribuite al fatto che sforzi maggiori accentuano il miglioramento delle prestazioni meccaniche causato dall'effetto TRIP indotto.

<i>Campione</i>	<i>p - 1.5 GPa (μm)</i>	<i>l - 1.5 GPa (μm)</i>	<i>A - 1.5 GPa (μm)</i>	<i>V - 1.5 GPa (mm^3)</i>	<i>p - 2 GPa (μm)</i>	<i>l - 2 GPa (μm)</i>	<i>A - 2 GPa (μm)</i>	<i>V - 2 GPa (mm^3)</i>
<i>Ricotto</i>	1.259	1610	173.8	0.27987167	2.201	1837	505.8	0.92782584
<i>TRIP250</i>	1.159	1722	151.0	0.260022	1.569	2004	310.4	0.62206164
<i>TRIP300</i>	0.940	1715	130.7	0.22409333	1.373	2000	254.8	0.50958667
<i>TRIP350</i>	0.976	1661	129.3	0.21465657	2.036	1930	434.2	0.83801243

Dalle analisi al SEM è possibile notare la tipica morfologia della superficie deformata: una matrice ferrosa segnata nella direzione della deformazione e cosparsa di composti a minor peso atomico. Tramite analisi EDS della superficie è stata tracciata una mappa della distribuzione di ossigeno in superficie; l'elevato contenuto di ossigeno nei composti ha confermato che si tratta di ossidi generati dal processo di corrosione in atto.



Campione TRIP250 testato a 1.5 GPa



Mappa EDS Ossigeno in campione TRIP250 testato a 1.5 GPa

- Si è osservato che il trattamento di *Austempering* migliora la resistenza a tribocorrosione del materiale. È stato inoltre possibile stabilire che conducendo il trattamento a temperature minori si ottiene una microstruttura più resistente all'usura;
- Le minime differenze di potenziale di corrosione e OCV misurate durante le prove suggeriscono che il comportamento a corrosione delle diverse microstrutture è comune;
- L'aumento del carico imposto determina maggiori differenze nella risposta del materiale, probabile sintomo di differenti miglioramenti delle proprietà meccaniche indotti dall'effetto TRIP;
- La resistenza a tribocorrosione della lega in esame è strettamente legata alle proprietà meccaniche delle singole microstrutture.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE