

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Chimica e dei Materiali

# ***Relazione per la prova finale***

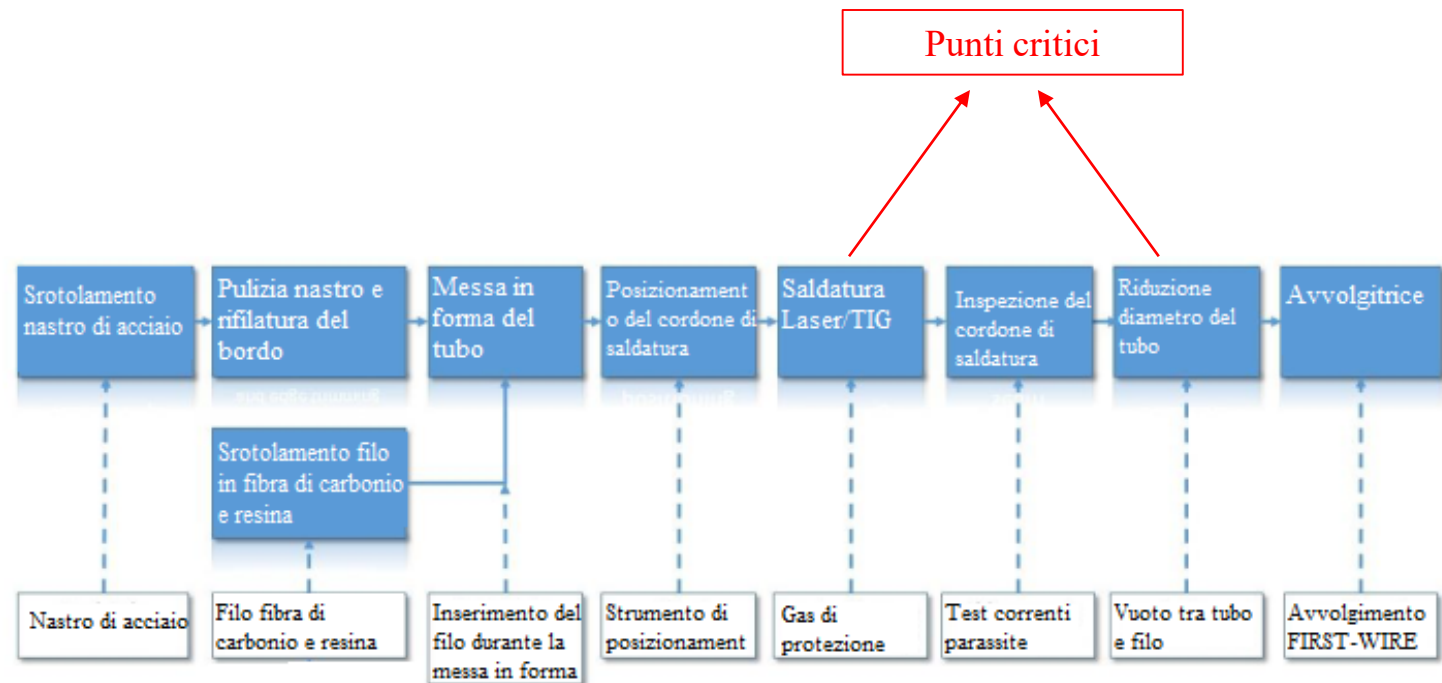
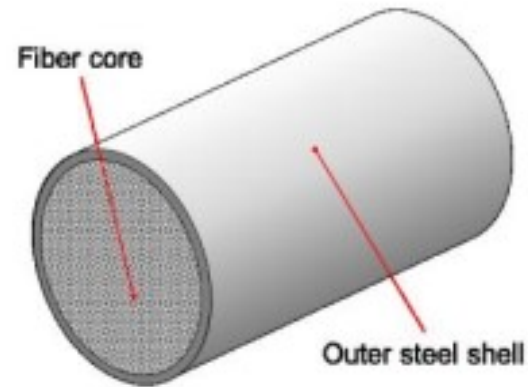
***«Studio della resistenza meccanica e a corrosione di fili ibridi  
in fibra di carbonio/acciaio inox»***

Tutor universitario: Ing. Pezzato Luca

Laureando: Sterzi Matteo 1216862

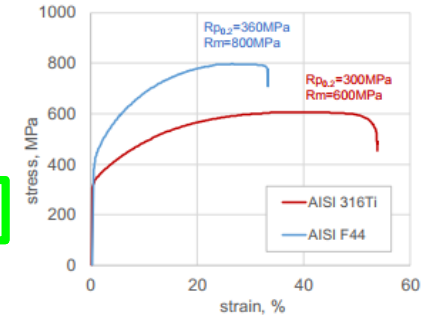
Padova, 15/03/2023

## 1. Struttura del filo ibrido e produzione



## 2. Scelta dei materiali e proprietà

«Shell» esterno → elevate prestazioni a livello meccanico e corrosivo → Acciai inossidabili austenitici



«Core» interno → Resistenza a trazione, leggerezza, elasticità, maneggiabilità, resistenza a fatica, impermeabilità all'umidità e resistenza termica.

Property	Aramid	Carbon	Glass
Tensile strength	average	good	average
Tensile modulus	average	good	poor
Compressive strength	poor	good	average
Compressive modulus	average	good	poor
Flexural strength	poor	good	average
Flexural modulus	average	good	poor
Impact strength	good	poor	average
shear strength	average	good	good
Density	good	average	poor
Fatigue resistance	average	good	poor
Fire resistance	good	poor	good
Low thermal expansion	good	good	good
Electrical insulation	average	poor	good
Thermal insulation	good	poor	average
Cost	poor	poor	average

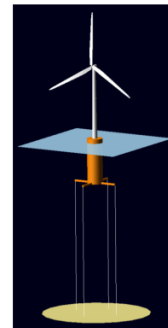
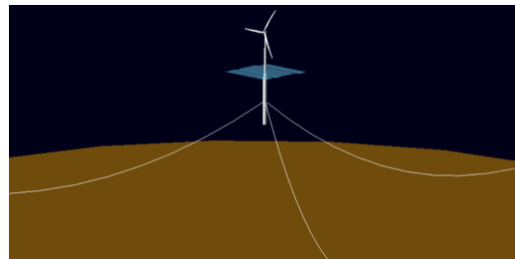
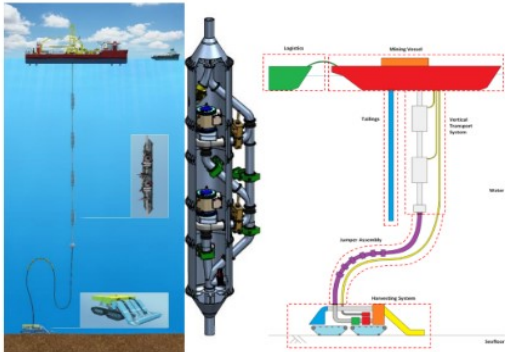
↓  
**Barre di pultrusione**

### 3. Possibili casi di impiego

3 settori industriali principali:

- Applicazioni off-shore in profondità, ad es. attività di abbandono e recupero/estrazione mineraria, operazioni di posa di tubi, gru a torre, gru a braccio articolato, gru mobili, perforatrici a rotazione ecc
- Ormeaggio per piattaforme galleggianti per turbine eoliche off-shore
- Infrastrutture civili: funi strutturali per grandi ponti sospesi

Riduzione del peso MA  
con elevate prestazioni



Studiare il comportamento della resistenza meccanica e a corrosione di fili ibridi costituiti da uno “shell” esterno di acciaio e da un “core” interno in fibre di carbonio e capire se consiste in una valida alternativa ai materiali tradizionali.

1. Preparati i campioni e successivamente analizzata la microstruttura e le due diverse saldature (laser e TIG)
2. Effettuate prove di microdurezza Vickers, di trazione, di piega e di analisi degli stress residui
3. Realizzate le seguenti prove di corrosione: contatto galvanico, pitting corrosion test, intergranular corrosion test, stress corrosion cracking test
4. Confrontati e analizzati tutti i risultati ottenuti per vedere i vantaggi e gli svantaggi di questo nuovo prodotto

## Materiali

Fili vuoti con saldatura TIG  
(1m)



Tagliati a:

- 50cm per prove di trazione
- 70 cm per prove di piega
- Scarti per prove di corrosione



4 tipi di fili ibridi (1m):

1. Saldatura TIG, riduzione del diametro con un passaggio diretto in filiera con  $\varnothing 5,5\text{mm}$ ;
2. Saldatura Laser, riduzione del diametro con un passaggio diretto in filiera con  $\varnothing 5,5\text{mm}$ ;
3. Saldatura Laser, riduzione del diametro con un passaggio diretto in filiera con  $\varnothing 5,5\text{mm}$  ma più smussata;
4. Saldatura Laser, riduzione del diametro con 2 passaggi, prima in filiera con  $\varnothing 5,7\text{mm}$  e poi con  $\varnothing 5,5\text{mm}$ .



Tagliati a:

- 50cm per prove di trazione
- 70 cm per prove di piega
- Scarti per prove di corrosione



Fili di fibre di carbonio



Tagliati a:

- 20cm per prove di trazione
- $\approx 10\text{cm}$  per prove di contatto galvanico



## Metodi

### 1. Metallografia e densità fibre di carbonio

#### Metallografia:

1. Inglobati a caldo (180°C per 10min)
2. Lucidati prima con carte abrasive (500, 800 e 1200 mesh) e poi con panni bagnati con paste diamantate (sospensioni da 6, 3 e 1µm)
3. Attaccati elettro-chimicamente (soluzione acido ossalico e 6V)
4. Immagini OM Leica DMRE e SEM "Stereoscan Cambridge 440" equipaggiato con "EDS Philips 9800" (a 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x)



#### Densità filo di fibre di carbonio:

1. Calcolata massa di 1 metro di fibre di carbonio con bilancia di precisione (m=24,52g)
2. Preso cilindro graduato e riempito d'acqua
3. Immerse 3 volte e calcolato  $\Delta V$  (=16cm<sup>3</sup>)
4. Calcolata  $\rho = \frac{m}{\Delta V} = 1.53 \text{g/cm}^3$



### 2. Analisi delle caratteristiche meccaniche

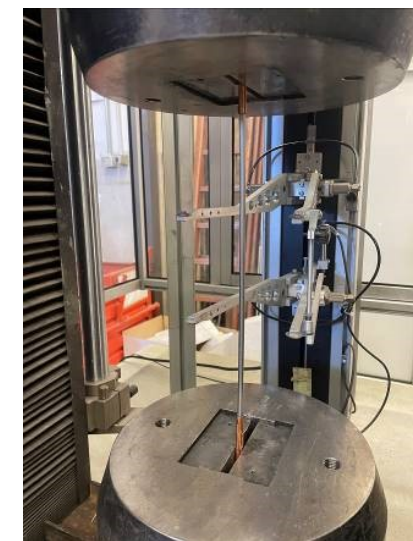
#### Microdurezza Vickers:

1. Microdurometro Leica,
2. 300g di peso,
3. 12 impronte a distanza 2,5 volte la diagonale dell'impronta

#### Prove di trazione:

1. macchina per test di trazione "Galdabini",
2. estensimetro con L0=100mm,
3. diversi afferraggi:







1. Fibre di carbonio: tubi di alluminio e griffe tonde
2. Filo vuoto: «plug» metallici e afferraggio diretto con griffe tonde
3. Filo ibrido: afferraggio su avvolgimento in rame con griffe tonde

### Prove di piega:

1. macchina per i test di piega a 3 punti,
2. pieghe di 90° e 180°,
3. raccolta immagini microscopio stereoscopico Zeiss Stemi C (a 0,65x e 2x)

### Analisi stress residui:

1. prova non distruttiva,
2. diffrattometro portatile Spider X GNR,
3. radiazione di  $CrK\alpha$ ,
4. basata sul metodo  $\sin^2\psi$ ,
5. 9 angoli impostati da +35° a -35° e 100s di analisi per angolo



## 3. Analisi della resistenza a corrosione

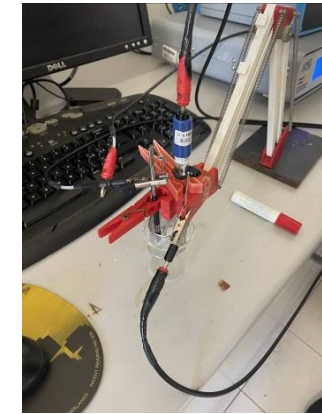
### Contatto Galvanico:

1. filo vuoto+fibra (con e senza resina),
2. soluzioni acquose di NaCl (3,5% e 9%),
3. potenziostato Amel 2549,
4. rapporto di immersione 1:1,
5. 1 punto al secondo per 1,5h



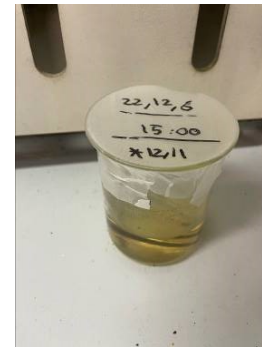
## Pitting corrosion test:

1. soluzioni acquose di NaCl (3,5% e 9%),
2. gabbia di platino ed elettrodo a Calomelano,
3. lavaggio in acetone con bagno ad ultrasuoni e nastro isolante in modo da lasciare immerso solo 1cm<sup>2</sup> di acciaio,
4. potenziostato Amel 2549,
5. OCV+Linear potential Voltametry tra -0.8V e 1.5V con +0.5mV al secondo



## Intergranular corrosion test:

1. 150ml di soluzione con: 400ml di H<sub>2</sub>O distillata, 236ml di H<sub>2</sub>(SO)<sub>4</sub> (da 95 a 98% in massa) e 25g di Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (in accordo con l'ASTM A262-15),
2. peso prima e dopo la prova,
3. portata a bollire e poi inseriti i campioni per 120h,
4. immagini stereo, OM e SEM

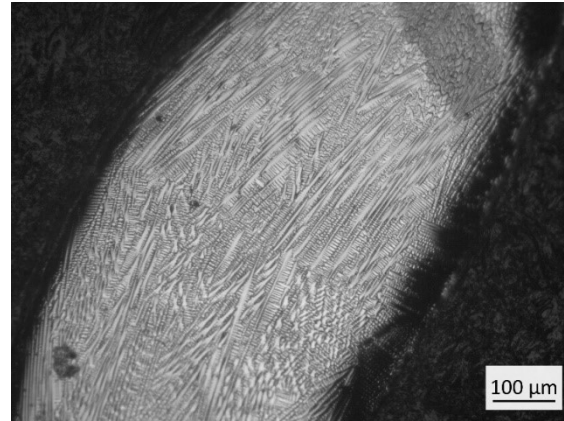
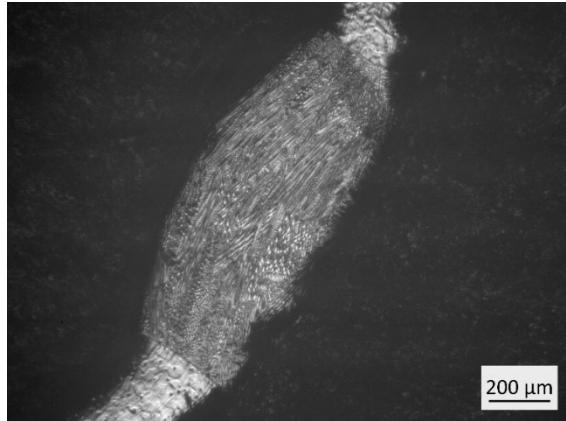


## Stress corrosion cracking test:

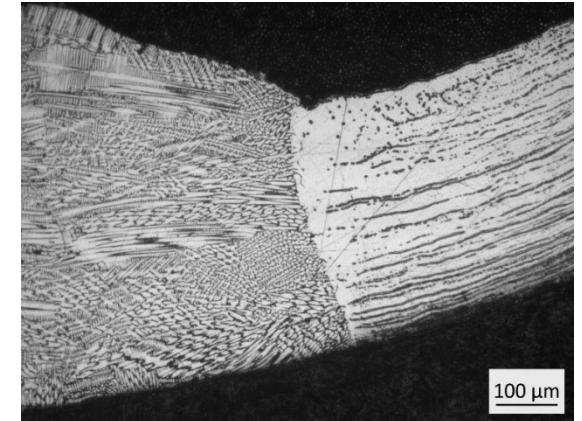
1. campioni dritti e piegati a 90°,
2. lavaggio ad ultrasuoni in acetone,
3. portare a bollire soluzione di cloruro di magnesio idrato e poi inserire i campioni e lasciarli immersi per 1 h,
4. immagini stereo, OM, SEM

## Microstruttura

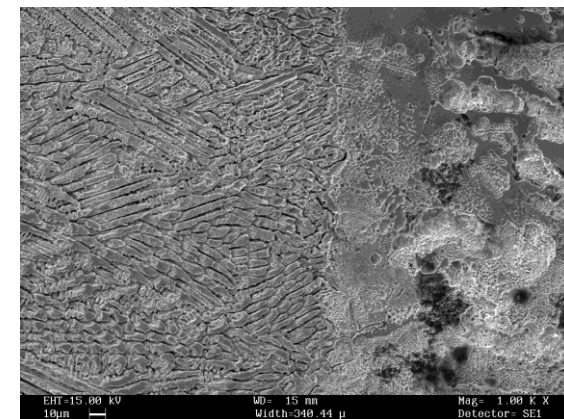
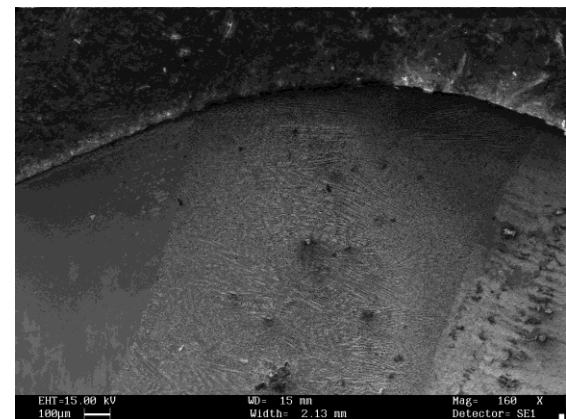
Microscopio ottico a 50x e 100x (Filo Vuoto)



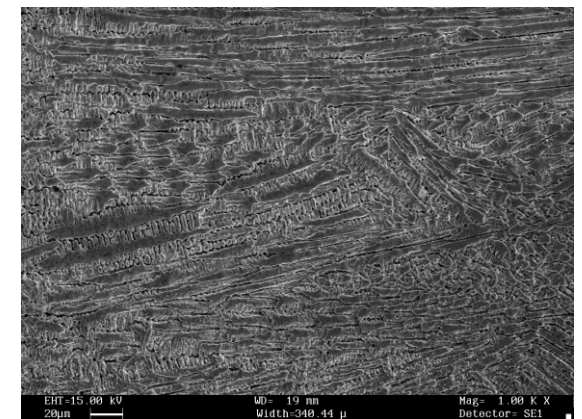
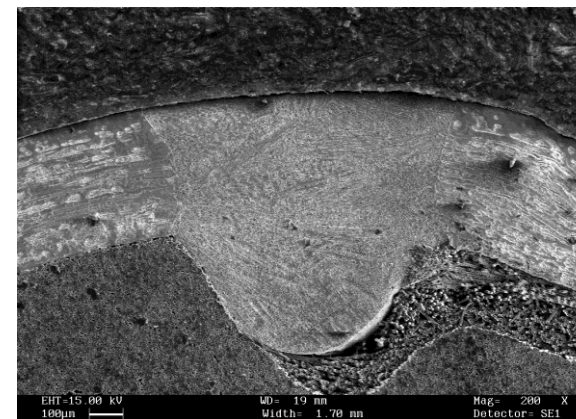
Microscopio ottico a 50x, 100x e 500x (Filo ibrido con saldatura TIG)



SEM a 160x e 1000x (Filo Vuoto)



SEM a 200x e 1000x (Filo Ibrido con saldatura TIG)

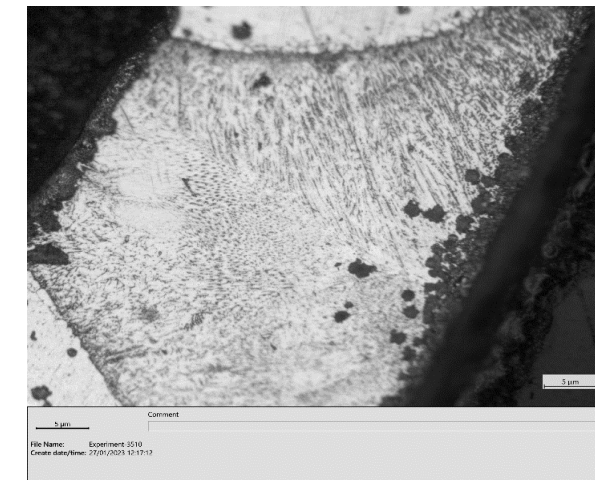
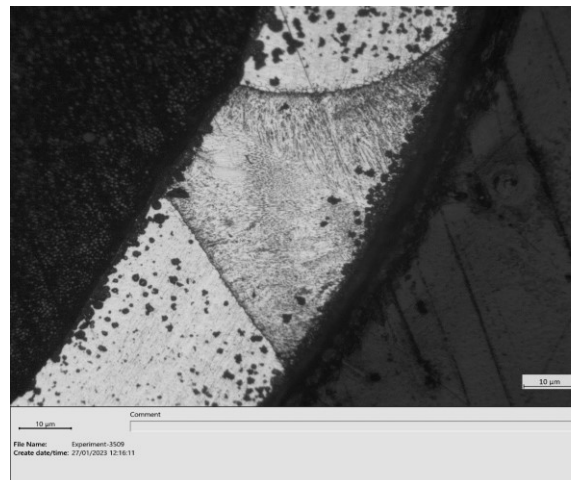
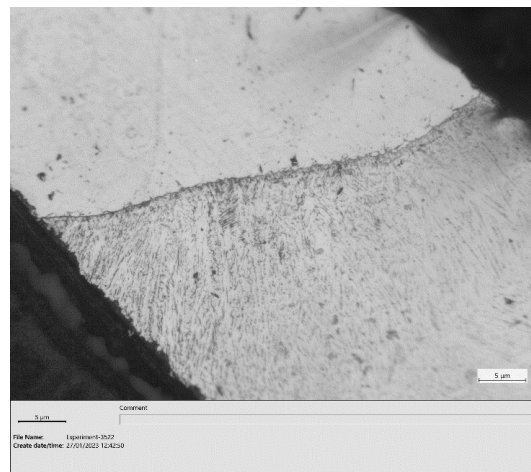
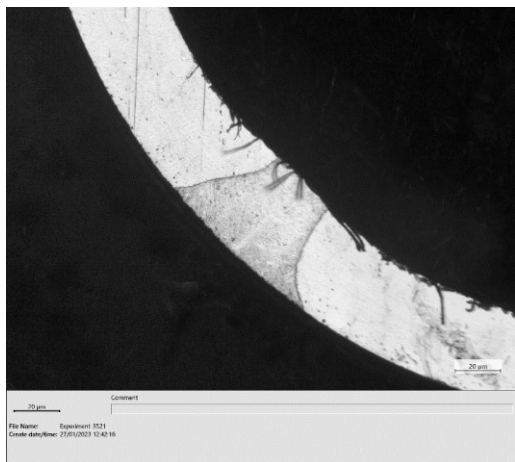


## Microstruttura

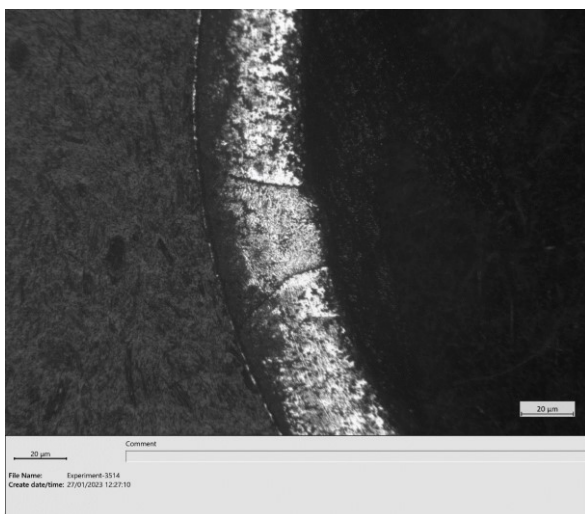
www.dii.unipd.it

Microscopio ottico a 50x e 200x (Filo ibrido con saldatura laser, 1 passaggio in filiera)

Microscopio ottico a 100x e 200x (Filo ibrido saldatura laser, 1 passaggio in filiera smussata)

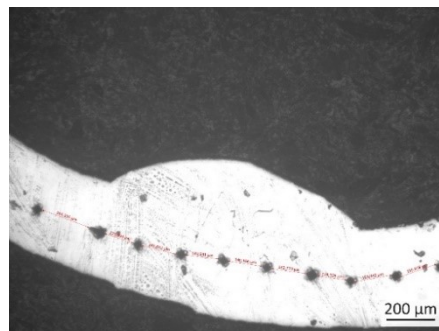
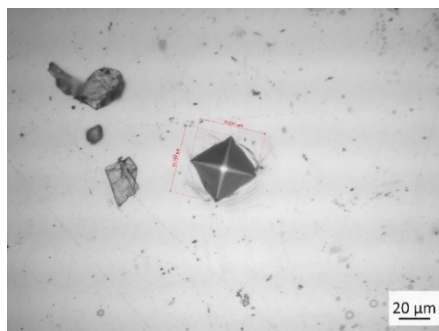


Microscopio ottico a 50x, 100x e 200x (Filo ibrido con saldatura laser, 2 passaggi in filiera)



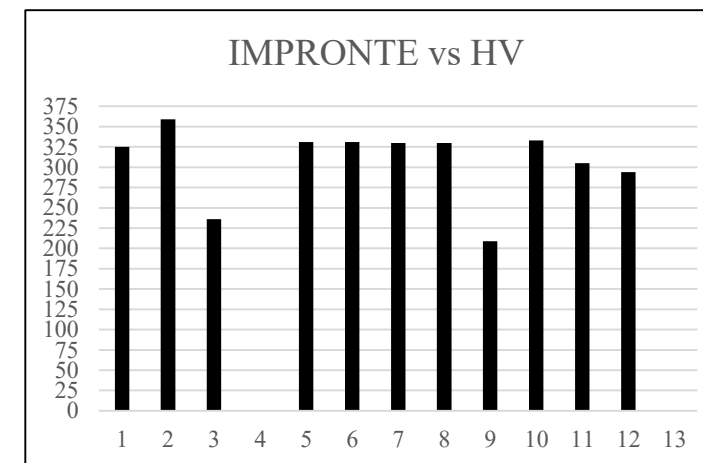
## Microdurezza Vickers

**Filo vuoto (50x e 500x)**

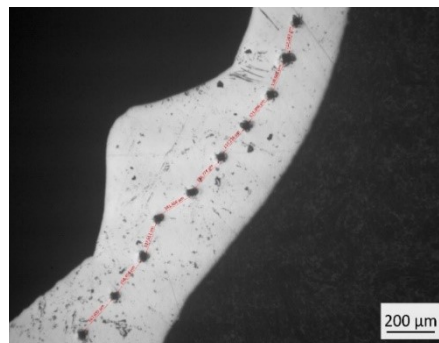
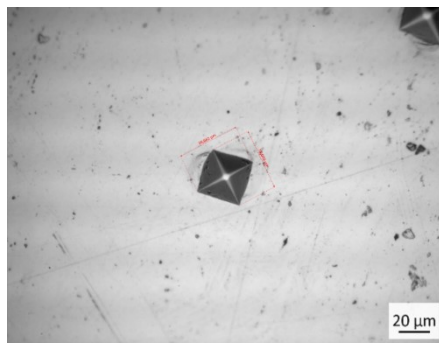


Dimensione media  
diagonali: 43,996 μm

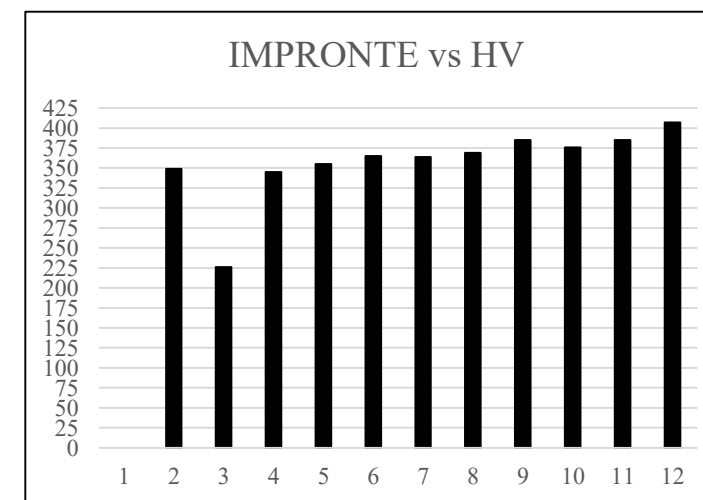
$$HV = 1.854 \left( \frac{F}{d^2} \right) \quad F=0,3 \text{ Kgf} \quad D2 = \left( \frac{d1+d2}{2} \right)^2$$



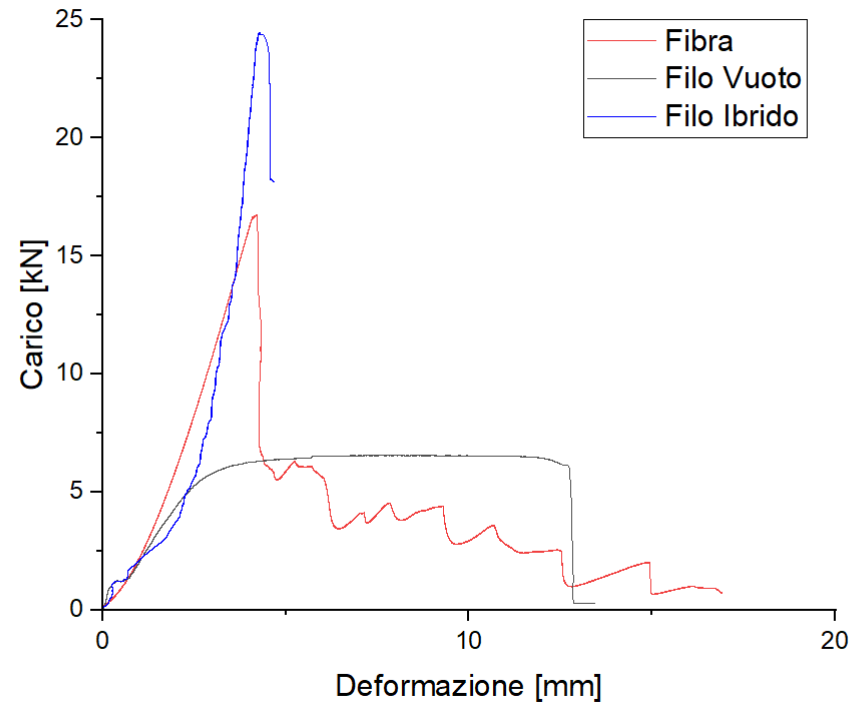
**Filo Ibrido con saldatura TIG (50x e 500x)**



Dimensione media  
diagonali: 39,919 μm



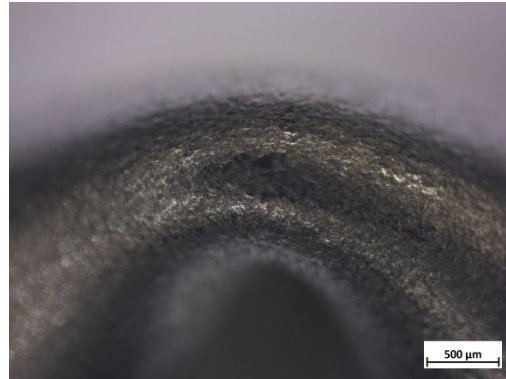
## Trazioni Monoassiali



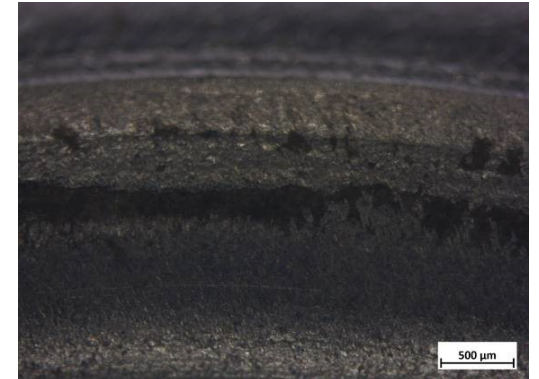
	CARICO MAX (kN)	DEFORMAZIONE (mm)
FIBRA	17	4
TUBO VUOTO	5,8	14
TUBO PIENO	24,5	4,4

## Prove di piega

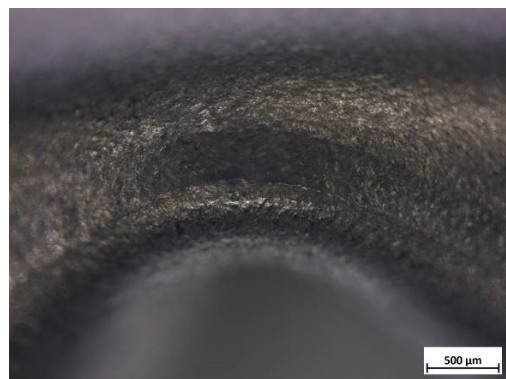
**Filo Vuoto a 180° (a 0.65x e a 2x)**



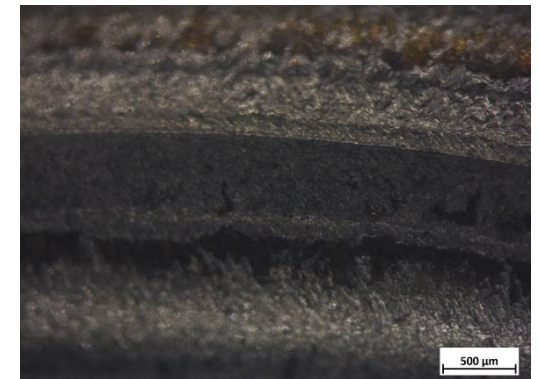
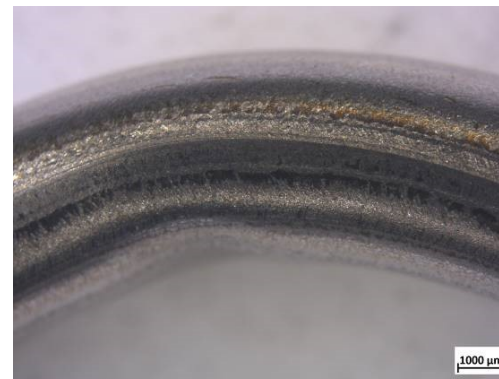
**Filo Ibrido a 180° (a 0.65x e a 2x)**



**Filo Vuoto a 90° (a 0.65x e a 2x)**




**Filo Ibrido a 90° (a 0.65x e a 2x)**




## Analisi degli stress residui

PUNTI DI MISURA	TUBO VUOTO	TUBO CON FIBRA
1	379 ± 40 90%	83 ± 47 96%
2	80 ± 40 96%	309 ± 47 87%
3	267 ± 44 95%	-278 ± 48 98%
4	-16 ± 38 100%	-697 ± 50 99%
5	-109 ± 25 100%	-219 ± 30 94%
6	-170 ± 35 99%	245 ± 27 98%
7	-269 ± 24 99%	-90 ± 26 99%



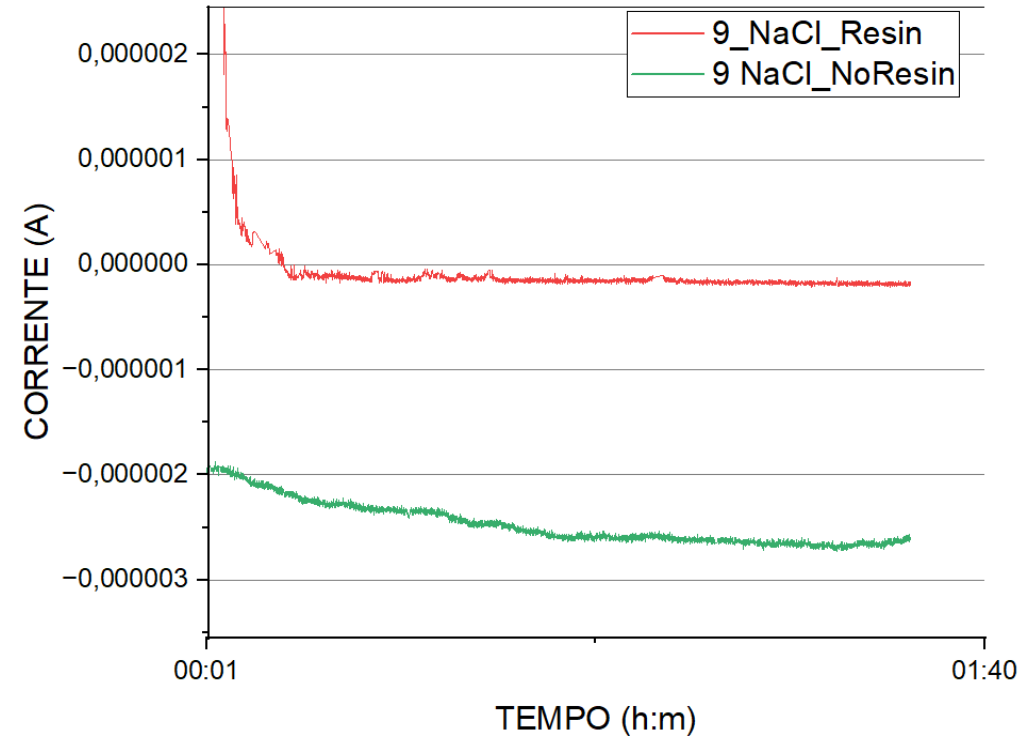
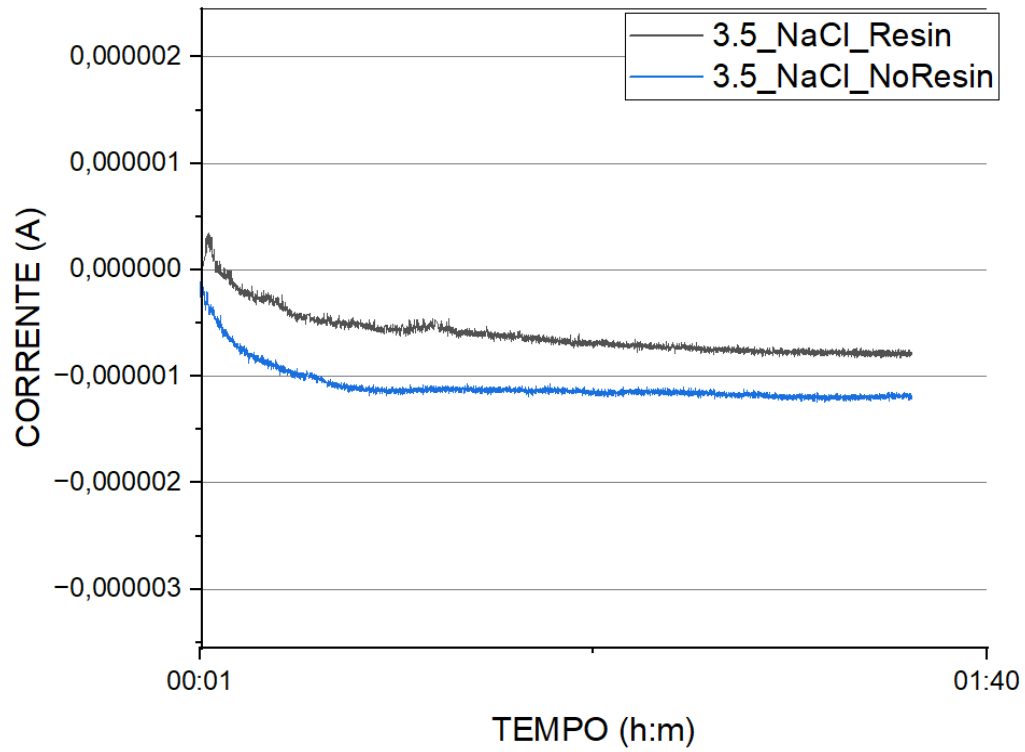
	1 PASS. SMUSS.	2 PASSAGGI	1 PASSAGGIO
1° PROVA	-713±33 MPa	-741±39 MPa	-698±48 MPa
2° PROVA	-424±32 MPa	-930±39 MPa	-647±49 MPa
3° PROVA	-707±33 MPa	-425±60 MPa	-428±48 MPa



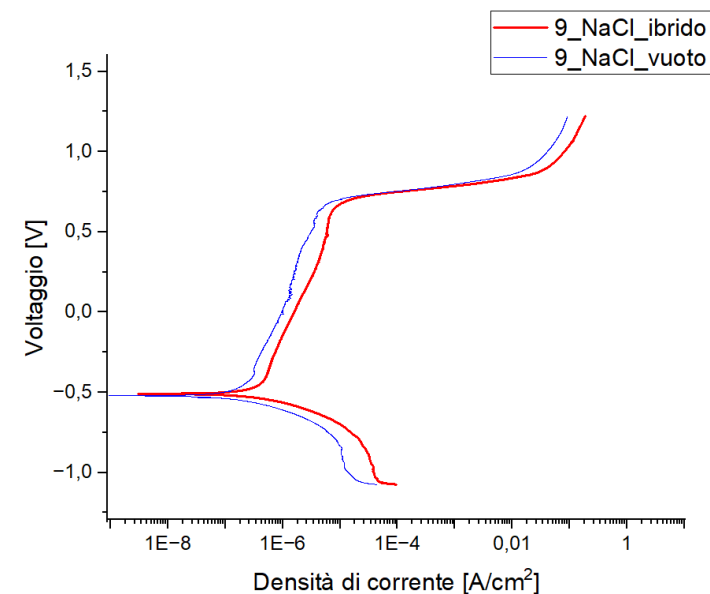
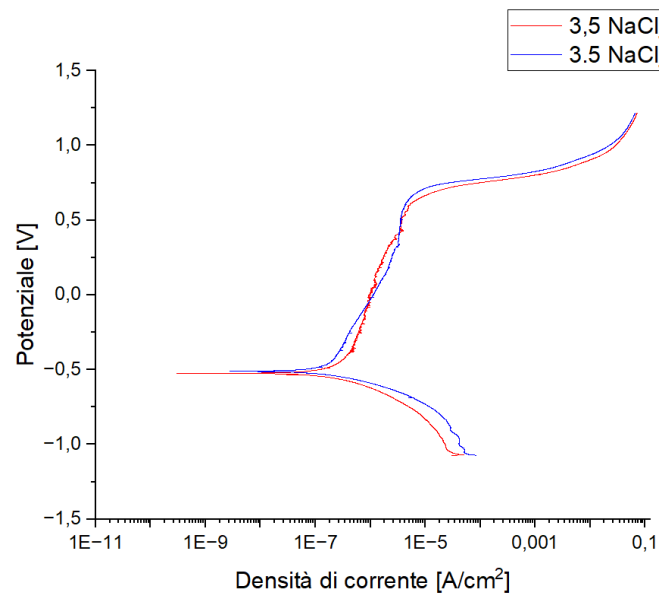
1 PASS. SMUSS.	2 PASSAGGI	1 PASSAGGIO
644±19 MPa	611±30 MPa	513±57 MPa



## Contatto Galvanico



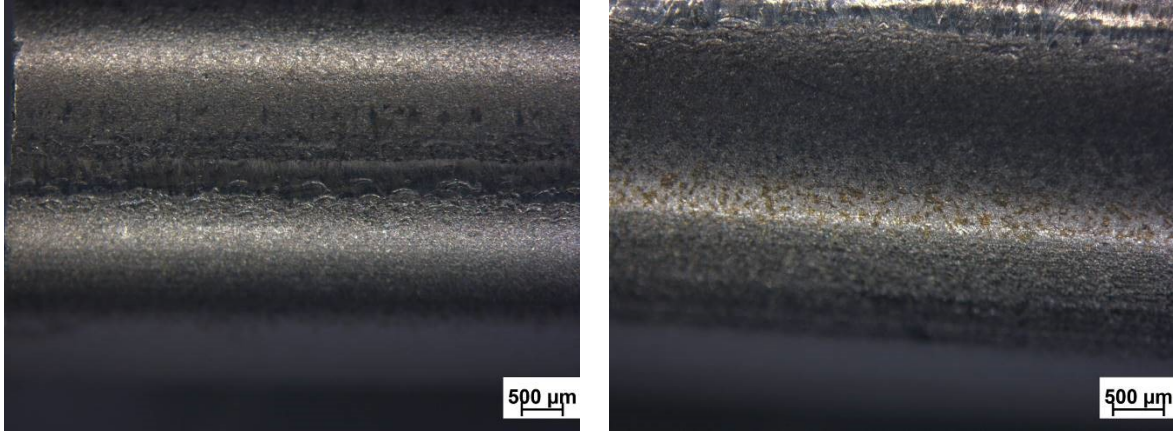
## Pitting corrosion tests



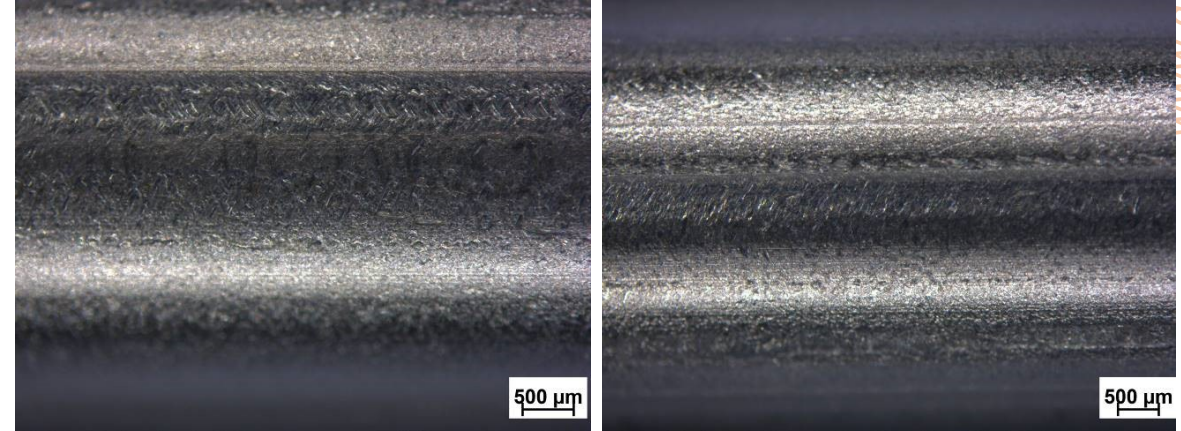
	$E_0$ [V]	$i_0$ [A]	$E_{\text{pitting}}$ [V]	$I_{\text{pitting}}$ [A]
3,5%_Vuoto	-0,526	$9,34 \times 10^{-8}$	0,568	$3,95 \times 10^{-6}$
3,5%_Ibrido	-0,509	$1,81 \times 10^{-7}$	0,579	$3,52 \times 10^{-6}$
9%_Vuoto	-0,522	$1,13 \times 10^{-7}$	0,622	$3,71 \times 10^{-6}$
9%_Ibrido	-0,506	$4,08 \times 10^{-7}$	0,587	$6,43 \times 10^{-6}$

## Intergranular corrosion tests

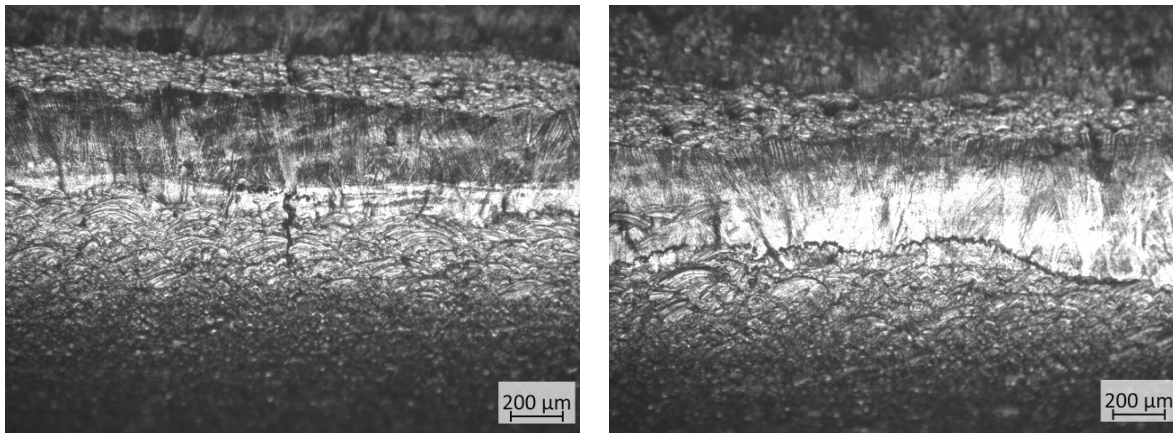
Intergranular corrosion test Filo Vuoto (immagini stereo)



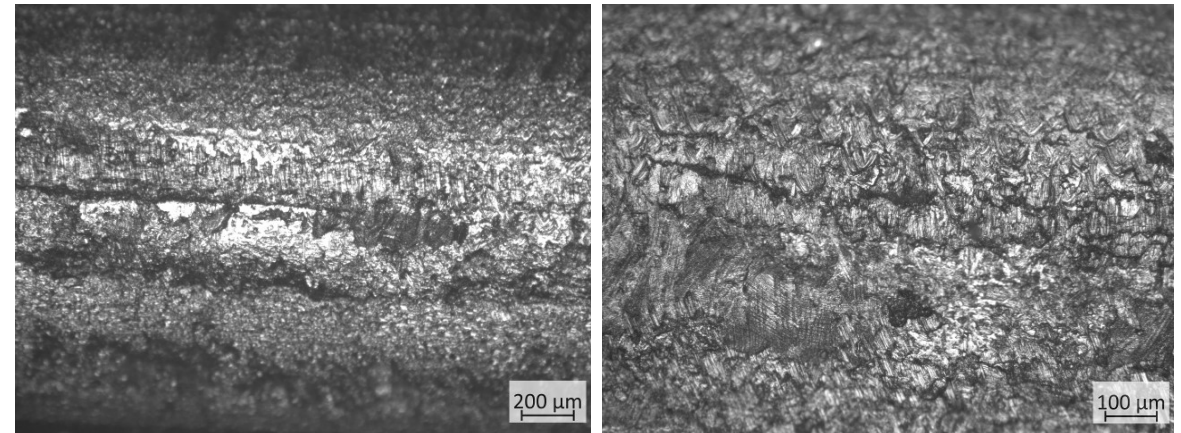
Intergranular corrosion test Filo Ibrido saldatura TIG (immagini stereo)



Intergranular corrosion test Filo Vuoto (immagini OM)

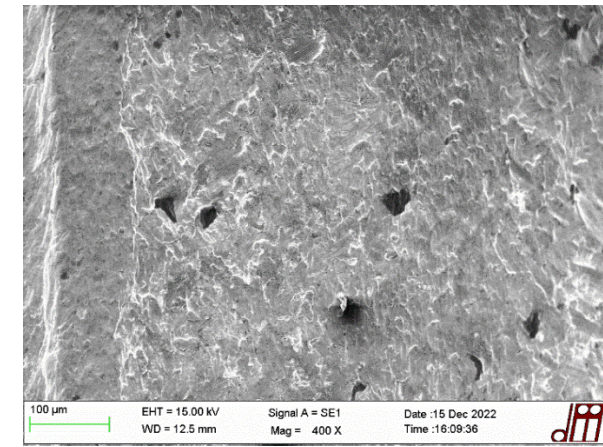
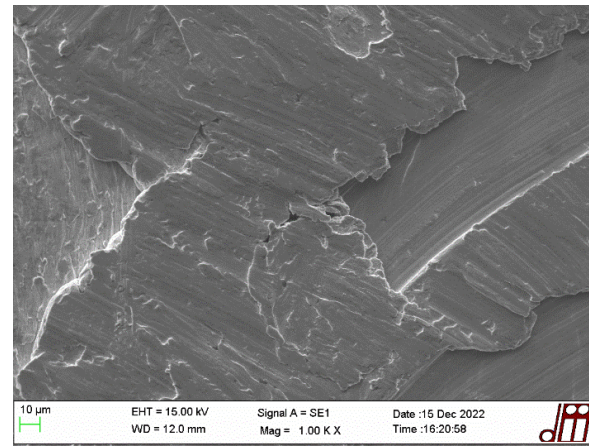
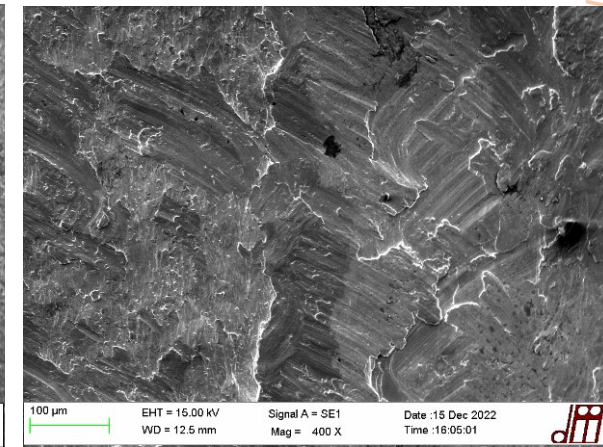
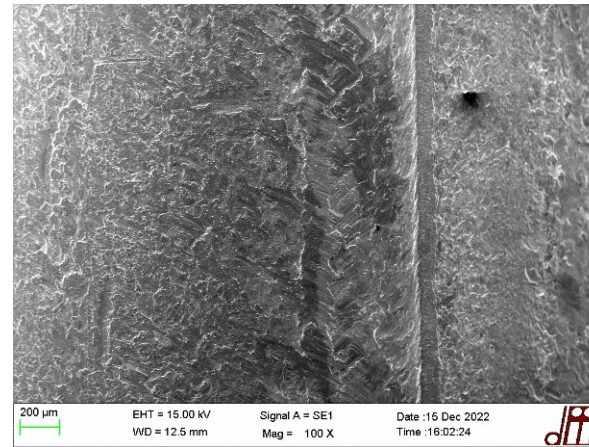
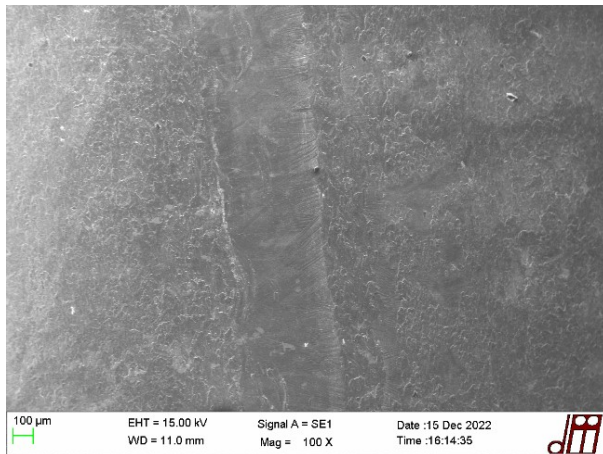
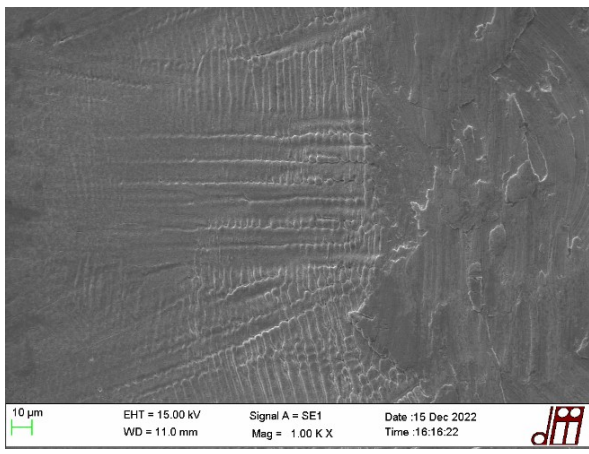
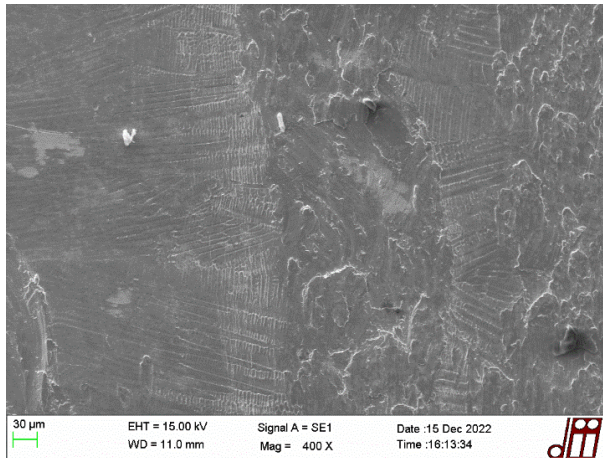
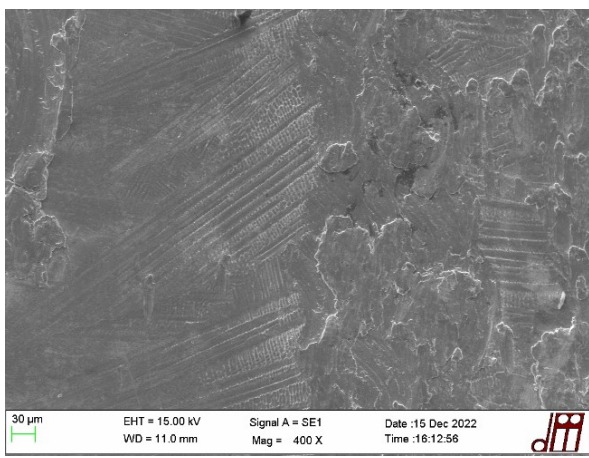


Intergranular corrosion test Filo Ibrido saldatura TIG (immagini OM)



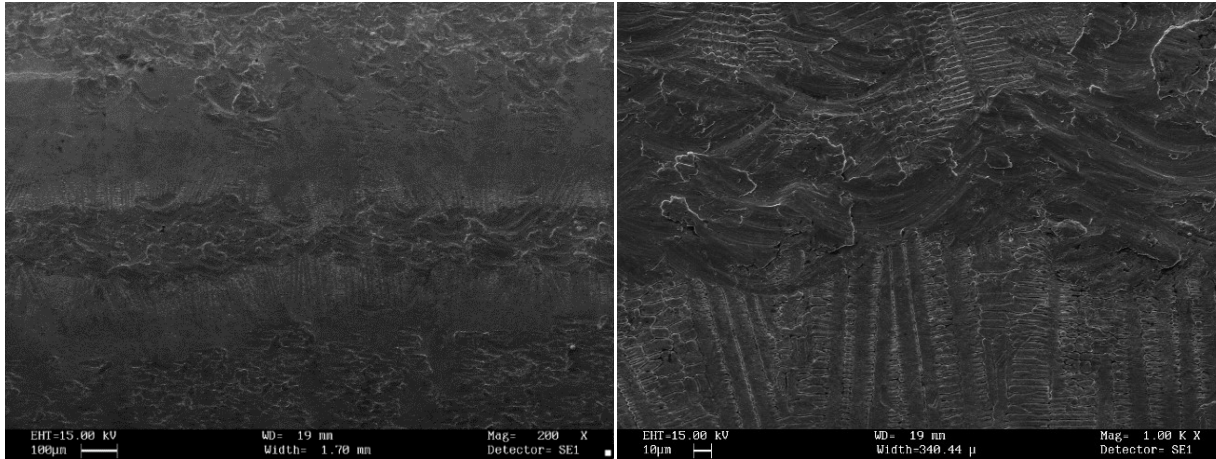
**Intergranular corrosion test Filo Vuoto (immagini SEM)**

**Intergranular corrosion test Filo Ibrido saldatura TIG (immagini SEM)**

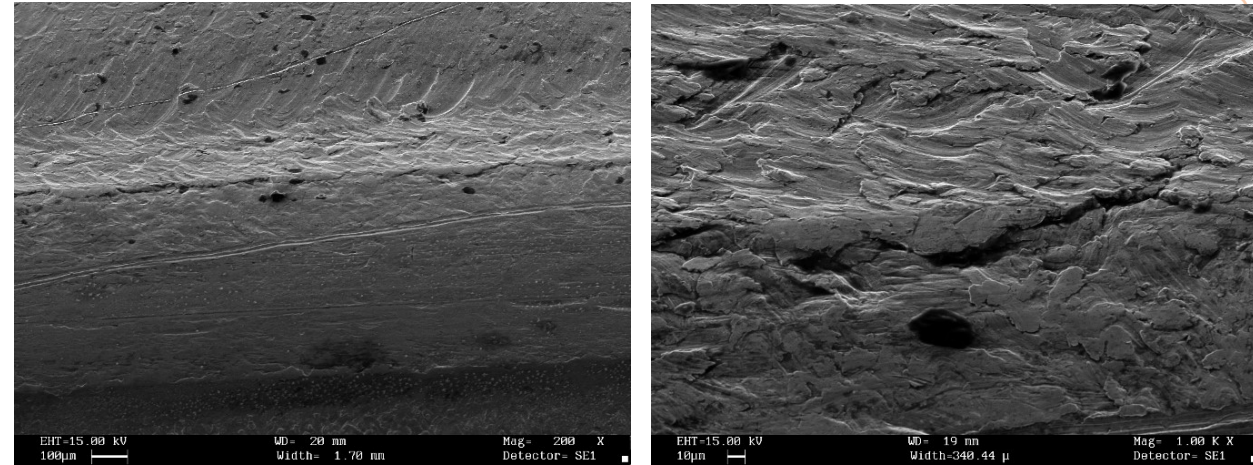


## Stress corrosion cracking tests

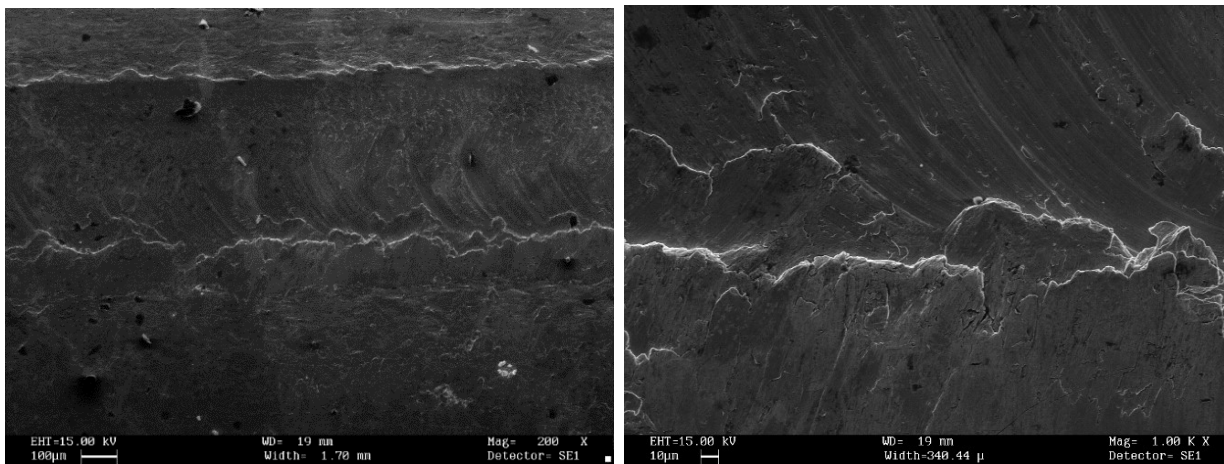
Stress corrosion cracking test Filo Vuoto dritto (immagini SEM)



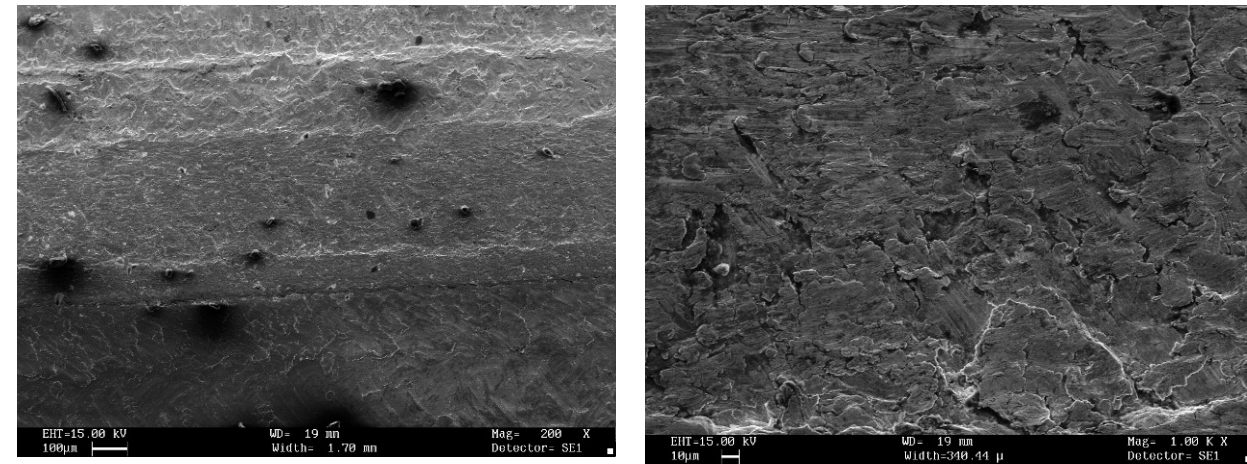
Stress corrosion cracking test Filo Ibrido saldatura TIG dritto (immagini SEM)



Stress corrosion cracking test Filo Vuoto piegato (immagini SEM)

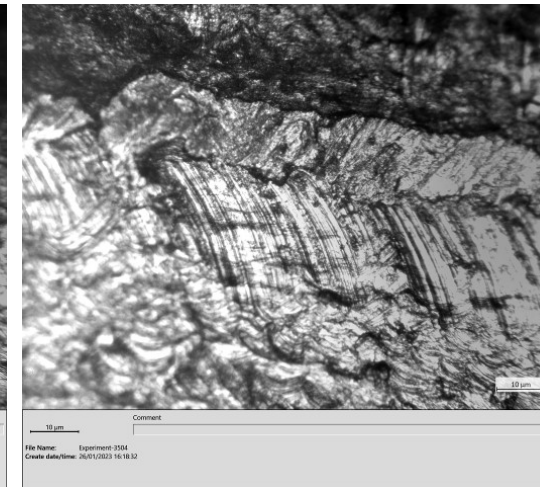
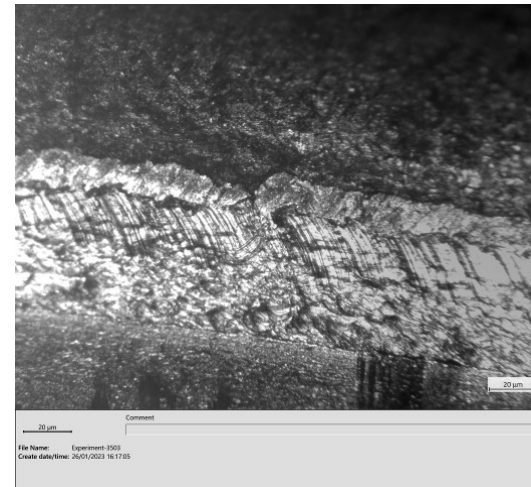
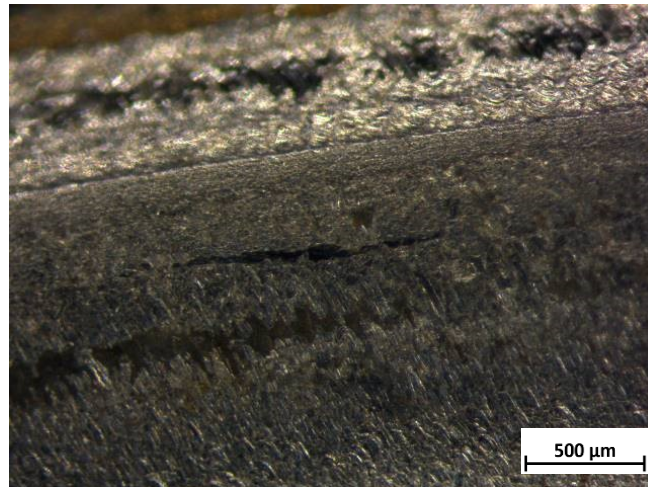
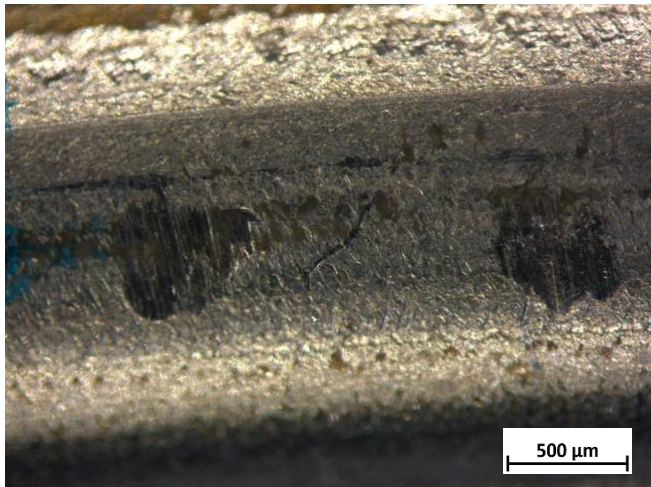


Stress corrosion cracking test Filo Ibrido saldatura TIG piegato (immagini SEM)



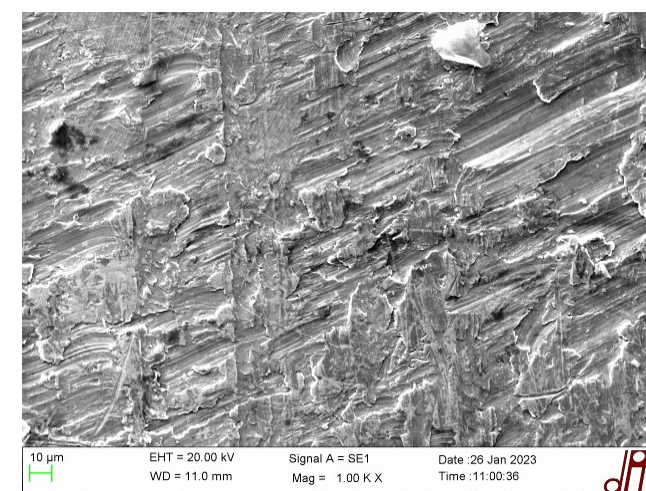
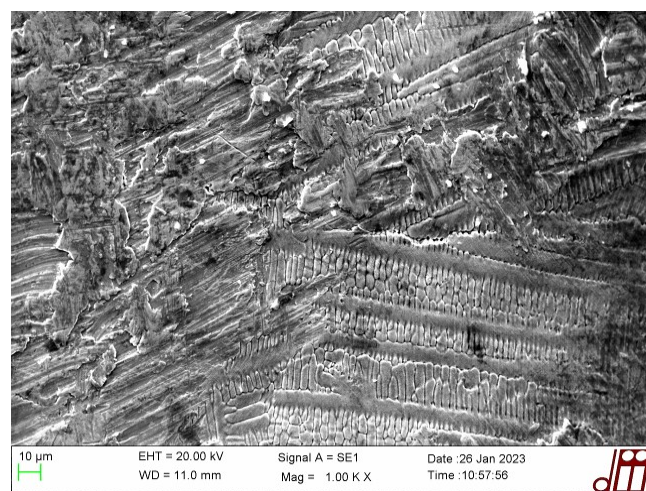
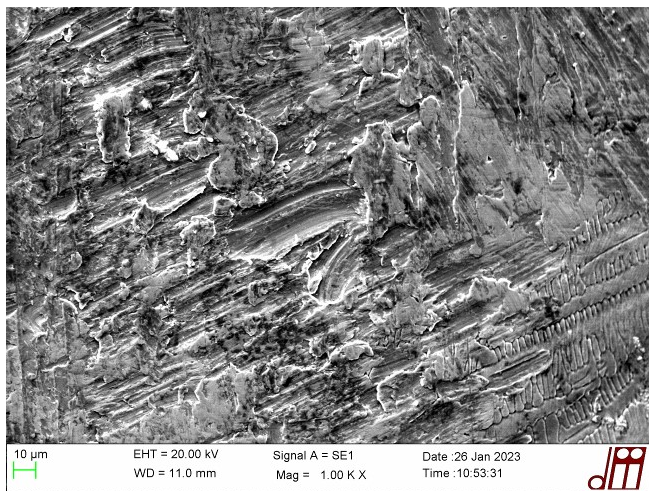
Stress corrosion cracking test Filo Ibrido saldatura TIG piegato trattato termicamente (immagini stereo)

Immagini OM

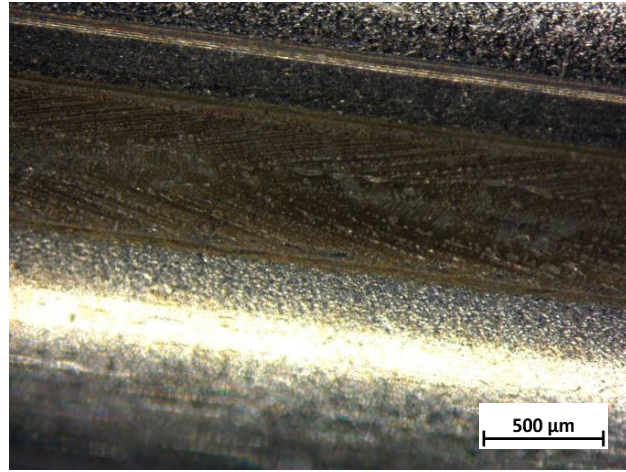
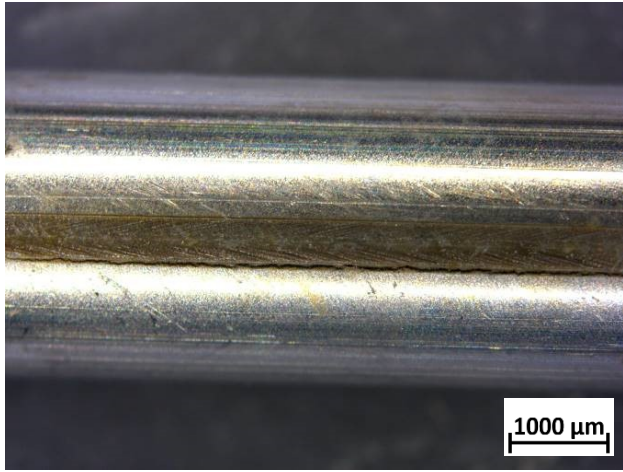


www.dii.unipd.it

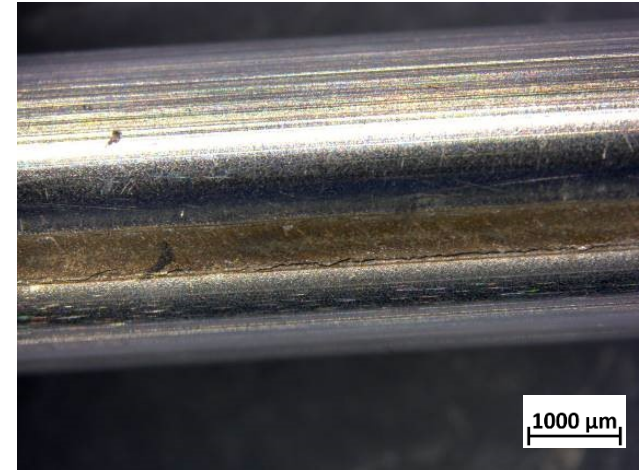
Immagini SEM



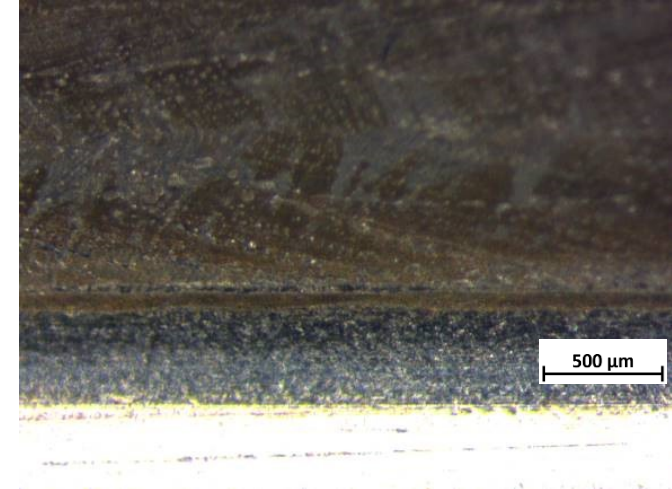
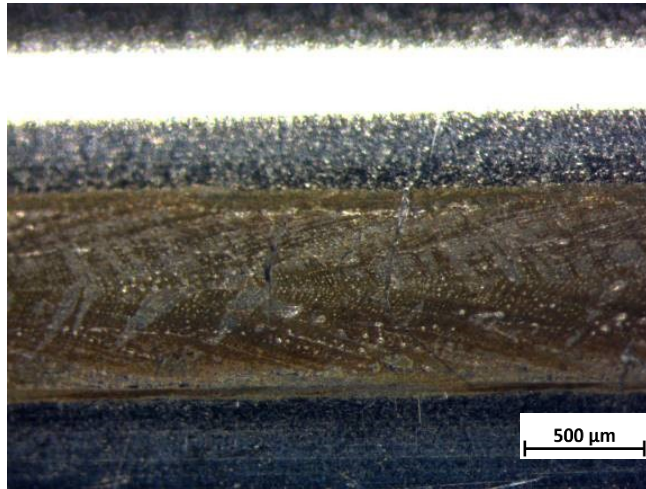
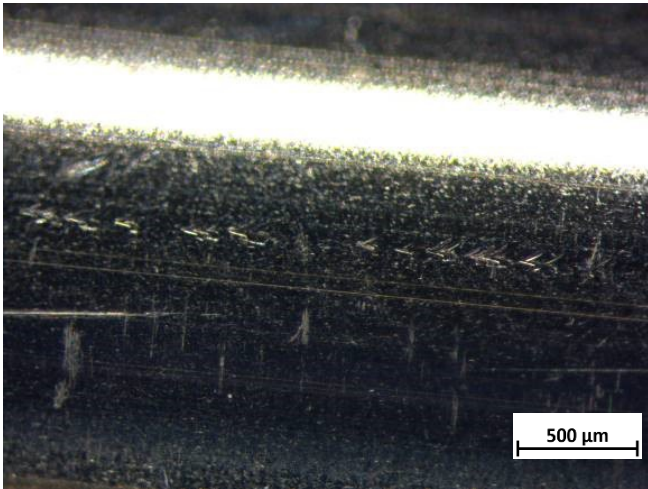
Stress corrosion cracking test Filo Ibrido dritto saldatura laser 1 passaggio in filiera (immagini stereo)



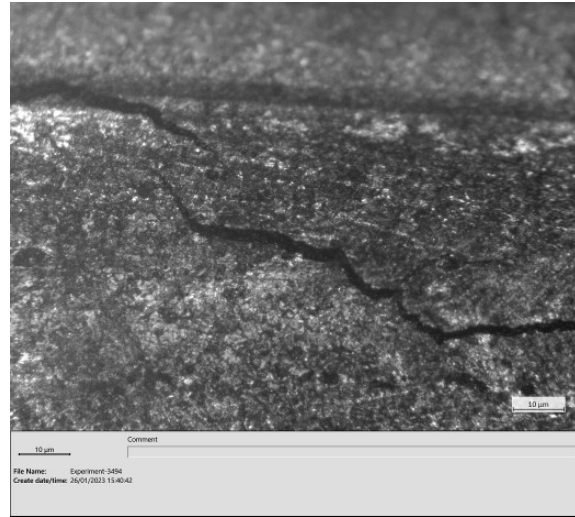
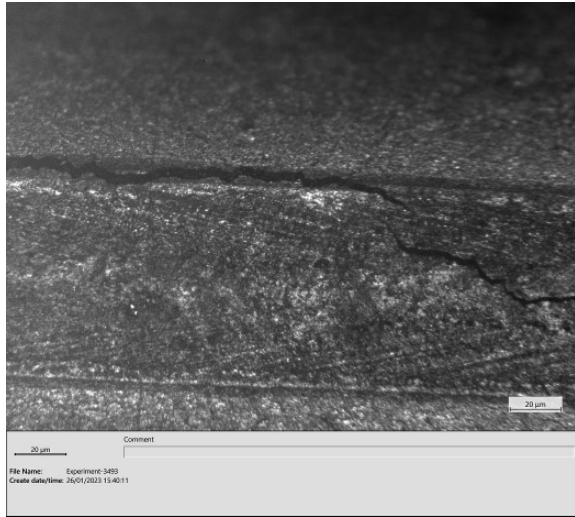
Filo Ibrido dritto saldatura laser 1 passaggio smuss. in filiera (immagini stereo)



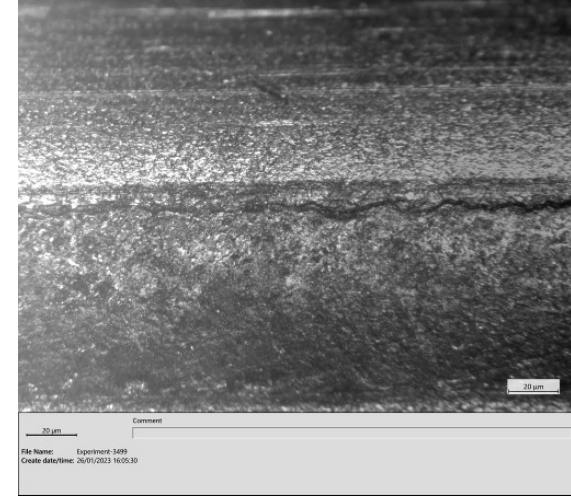
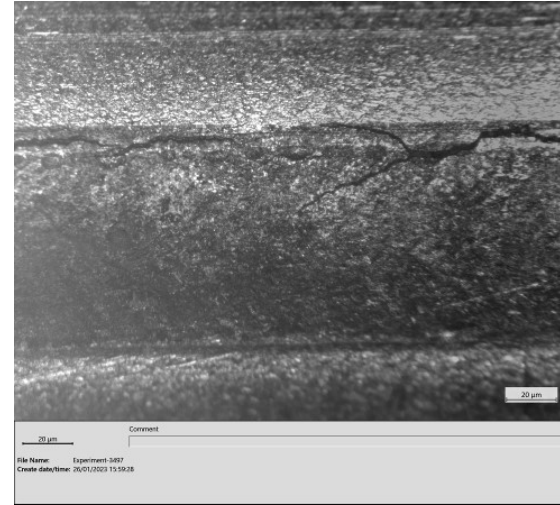
Stress corrosion cracking test Filo Ibrido dritto saldatura laser 2 passaggi in filiera (immagini stereo)



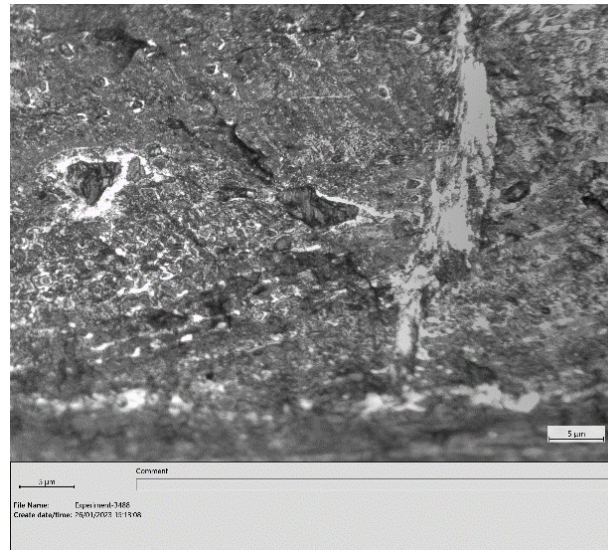
**Stress corrosion cracking test Filo Ibrido dritto saldatura laser 1 passaggio in filiera (immagini OM)**



**Filo Ibrido dritto saldatura laser 1 passaggio smuss. in filiera (immagini OM)**

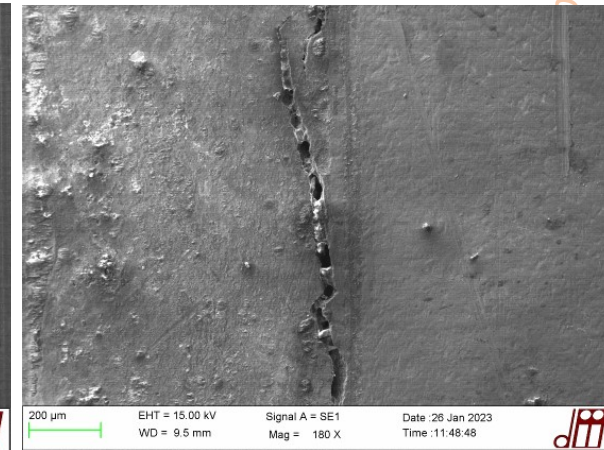
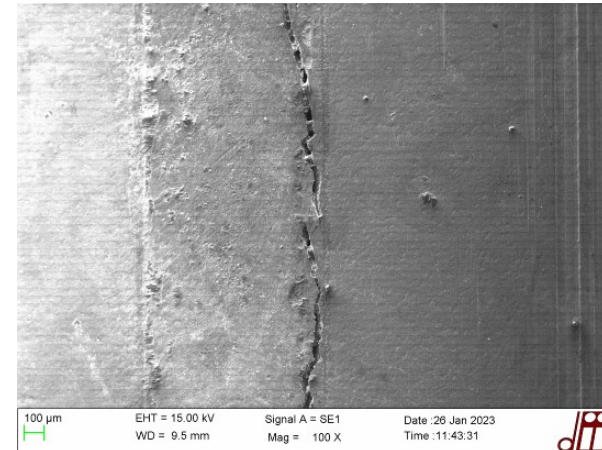
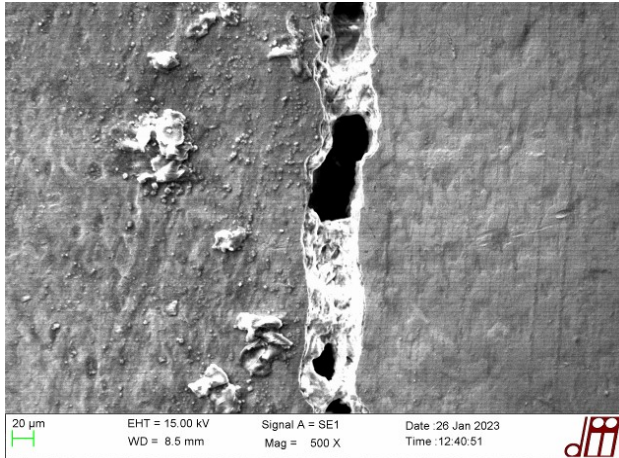
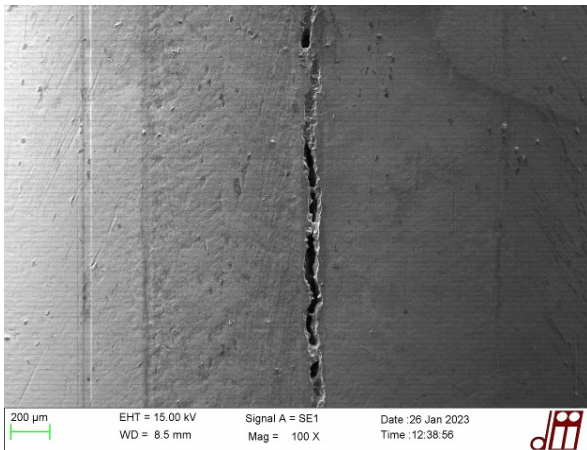


**Stress corrosion cracking test Filo Ibrido dritto saldatura laser 2 passaggi in filiera (immagini OM)**

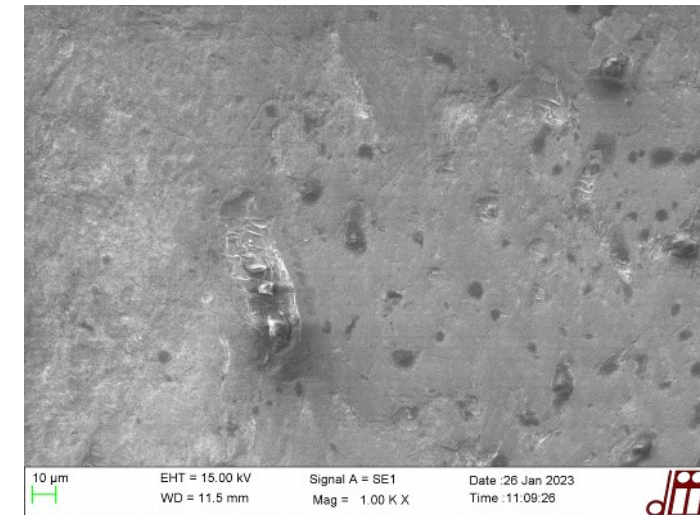
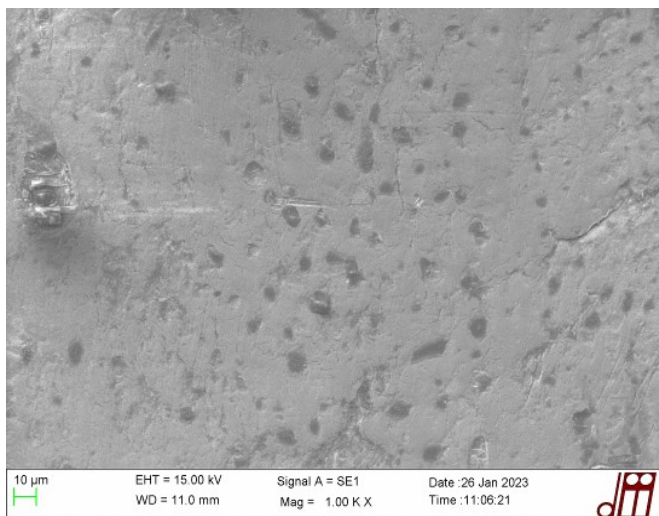




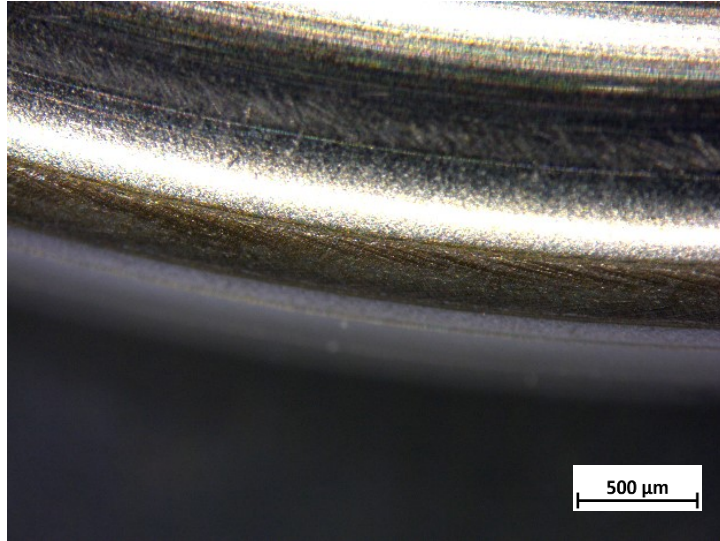
**Stress corrosion cracking test Filo Ibrido dritto saldatura laser 1 passaggio in filiera (immagini SEM)**



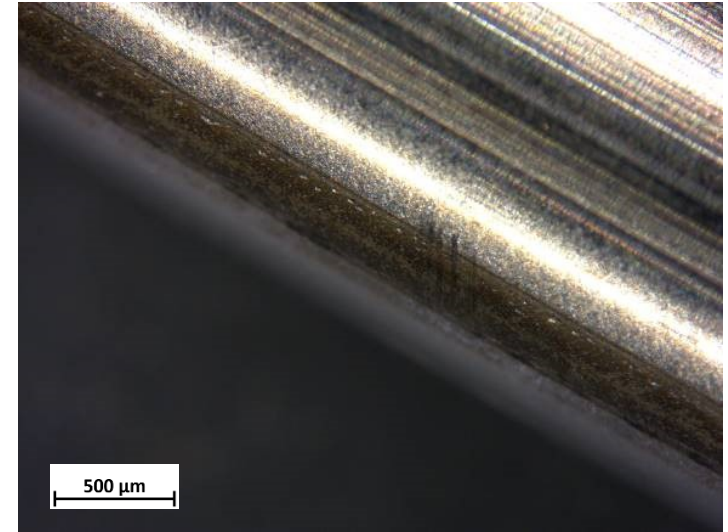
**Stress corrosion cracking test Filo Ibrido dritto saldatura laser 2 passaggi in filiera (immagini SEM)**



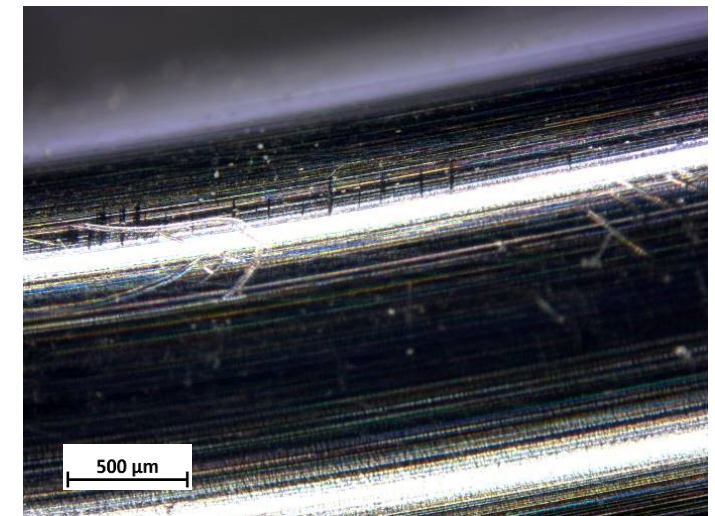
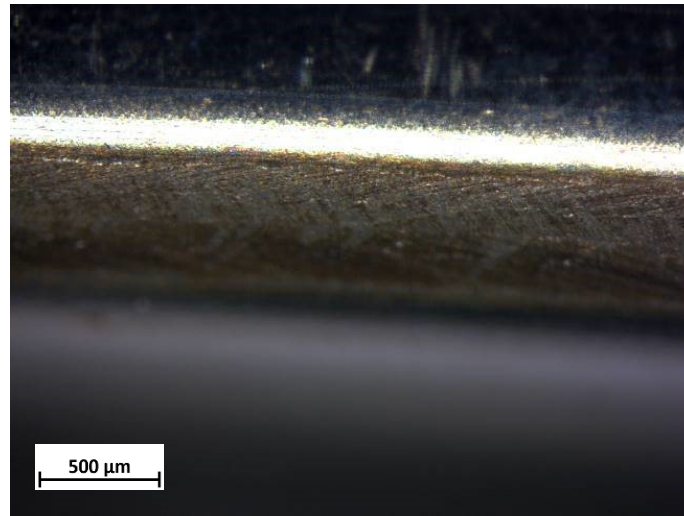
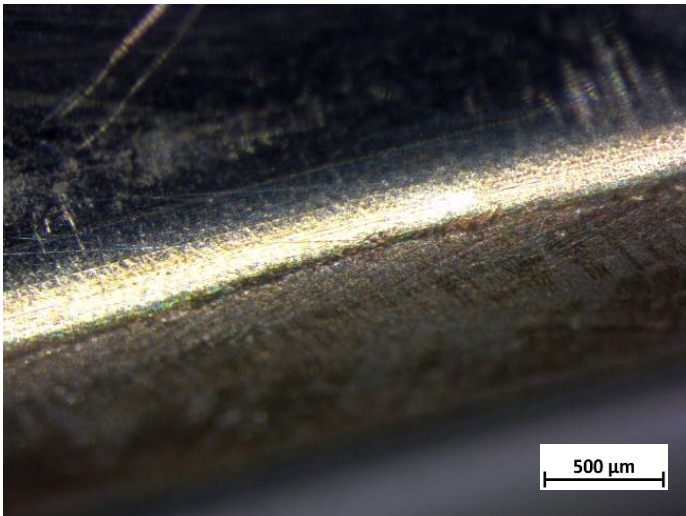
Stress corrosion cracking test Filo Ibrido piegato saldatura laser 1 passaggio in filiera (immagini stereo)



Filo Ibrido piegato saldatura laser 1 passaggio smuss. in filiera (immagini stereo)



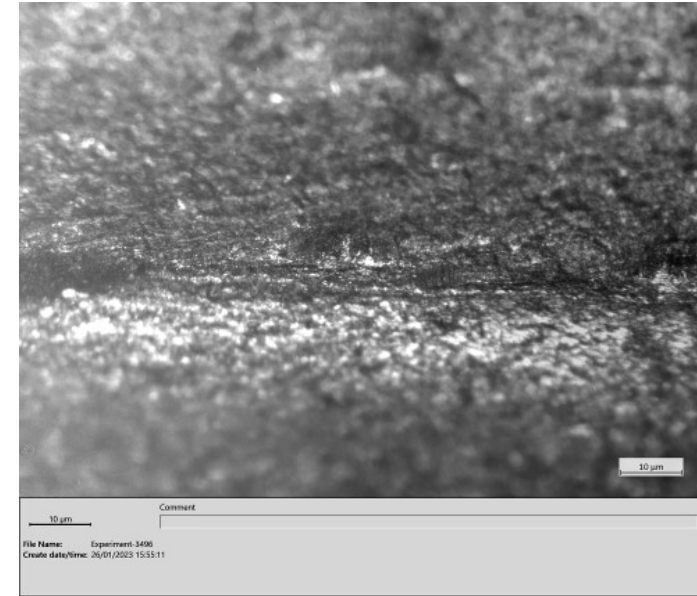
Stress corrosion cracking test Filo Ibrido piegato saldatura laser 2 passaggi in filiera (immagini stereo)



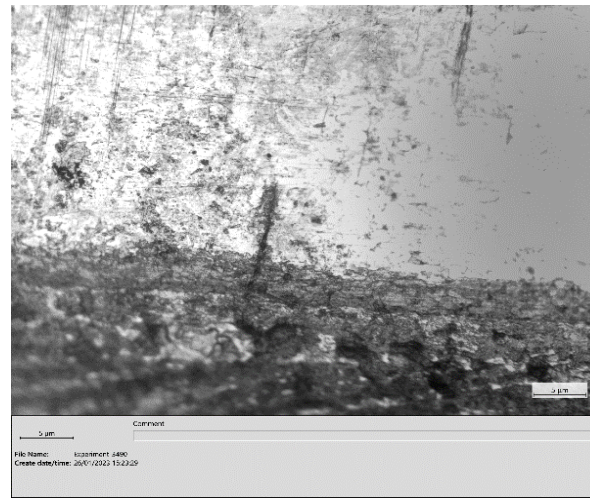
**Stress corrosion cracking test Filo Ibrido piegato saldatura laser 1 passaggio in filiera (immagini OM)**



**Filo Ibrido piegato saldatura laser 1 passaggio smuss. in filiera (immagini OM)**

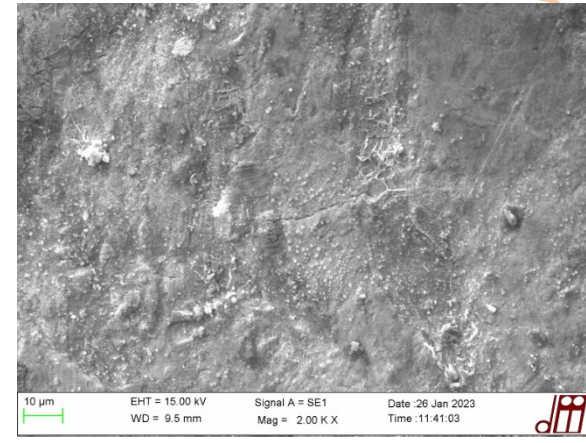
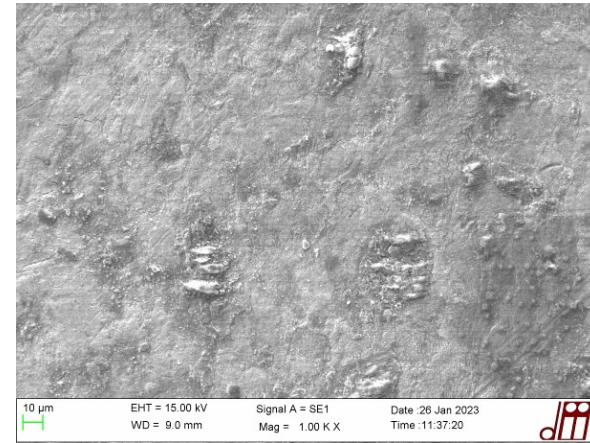
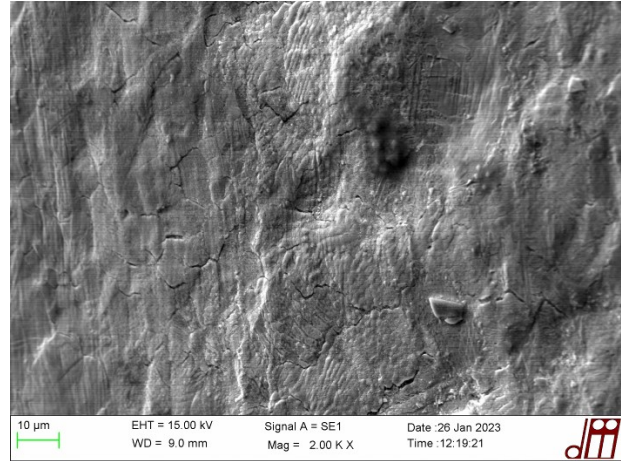
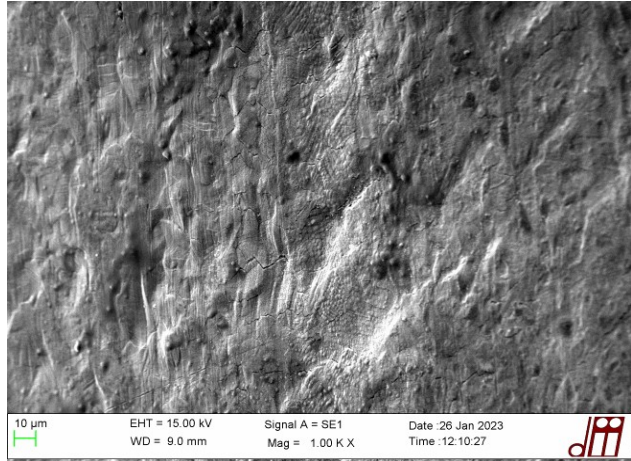


**Stress corrosion cracking test Filo Ibrido piegato saldatura laser 2 passaggi in filiera (immagini OM)**

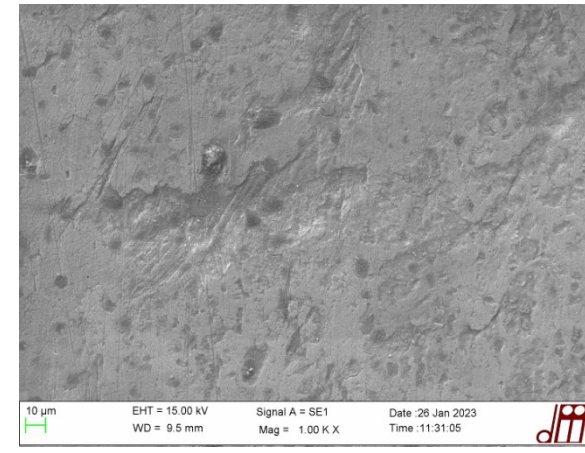
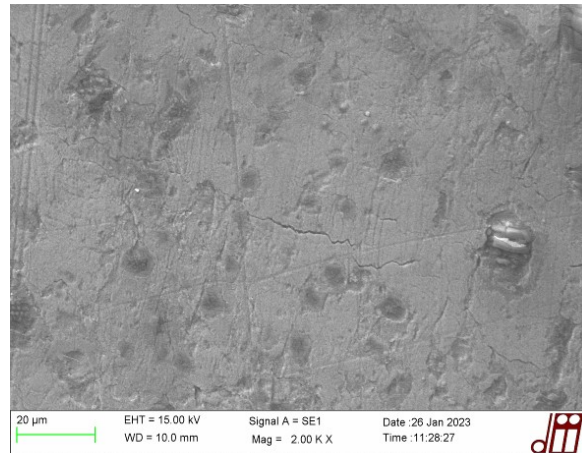
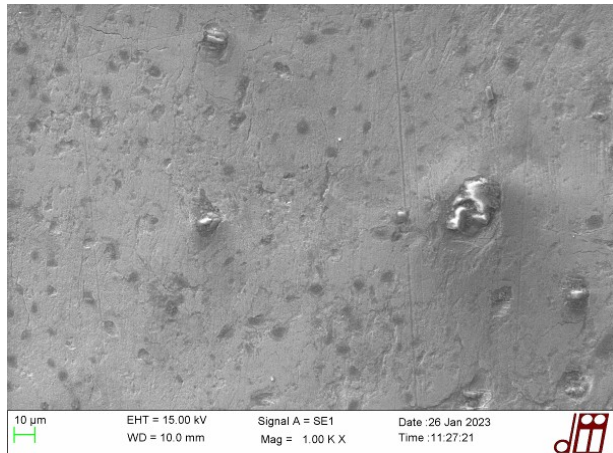


**Stress corrosion cracking test Filo Ibrido piegato saldatura laser 1 passaggio in filiera (immagini SEM)**

**Filo Ibrido piegato saldatura laser 1 passaggio smuss. in filiera (immagini SEM)**



**Stress corrosion cracking test Filo Ibrido piegato saldatura laser 2 passaggi in filiera (immagini SEM)**



- Sia degli aspetti positivi che negativi dal punto di vista di resistenza meccanica e a corrosione.
  - Ottime proprietà di durezza, di piega e di resistenza a trazione.
  - Prove di trazione:
    1. Filo ibrido e saldatura TIG: carico massimo ottenuto circa uguale alla somma dei carichi massimi ottenuti singolarmente con le fibre e con il filo vuoto, paragonabili a quelli di un filo di acciaio tradizionale dai 3 ai 4 mm di diametro. Non si è arrivati a rottura delle fibre nel “core”.
    2. Filo ibrido con saldatura laser: stesso tipo di aggancio però non hanno raggiunto il livello di quel campione, lo “shell” esterno si è rotto al di fuori del tratto utile dentro l’afferraggio.
- ⇒ Quello che in futuro si dovrà ricercare, è un tipo di afferraggio che faccia lavorare in cooperazione i 2 materiali e che protegga le estremità dello “shell” esterno dagli sforzi delle ganasce.
- Buone prove di contatto galvanico, pitting corrosion e intergranular corrosion e nessuna sostanziale differenza nei comportamenti chimici e di resistenza alla corrosione
  - Stress corrosion cracking test: l’introduzione degli stress da parte della fibra nel core, la saldatura e la lavorazione usata per produrre il filo influiscono in modo determinante sulla resa del prodotto finito a questo tipo di corrosione.
- ⇒ In futuro si potrà cercare di integrare tecniche di saldatura diversa o alleggerire la lavorazione fatta al filo in modo da ottenere un risultato migliore non solo in termini corrosivi ma magari anche meccanici.

***Grazie della vostra attenzione***