



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



POLITECNICO  
MILANO 1863



UNIVERSITÀ  
DI TRENTO



(PRIN 2022, COD. PROTOCOLLO: 2022H3S28T, CUP MASTER: D53D23005410006) FINANZIATO DALL'UNIONE EUROPEA – NEXT GENERATION EU, PNRR - MISSIONE 4 “ISTRUZIONE E RICERCA” - COMPONENTE C2 INVESTIMENTO 1.1 “FONDO PER IL PROGRAMMA NAZIONALE DI RICERCA E PROGETTI DI RILEVANTE INTERESSE NAZIONALE (PRIN)” D.D. N. 104/2022 “BANDO PRIN 2022”. PE11 Engineering of Metals and alloys.

**XVIII Convegno Nazionale AIMAT**  
**Ischia Porto (NA) |**  
**31 Agosto – 3 Settembre 2025**

# Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) corrosion resistant coatings on aluminium 2024 texturized with a riblet-like surface for aeronautical applications

**M. Gamba<sup>1</sup>, M. Ormellese<sup>1</sup>, A. Cristoforetti<sup>2</sup>, M. Fedel<sup>2</sup>, A. Brenna<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dipartimento di Chimica, Materiali ed Ingegneria Chimica “Giulio Natta”, Politecnico di Milano

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Trento



POLITECNICO  
MILANO 1863

AIMAT  
ASSOCIAZIONE ITALIANA D'INGEGNERIA DEI MATERIALI

# Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) corrosion resistant coatings on aluminium 2024 texturized with a riblet-like surface for aeronautical applications

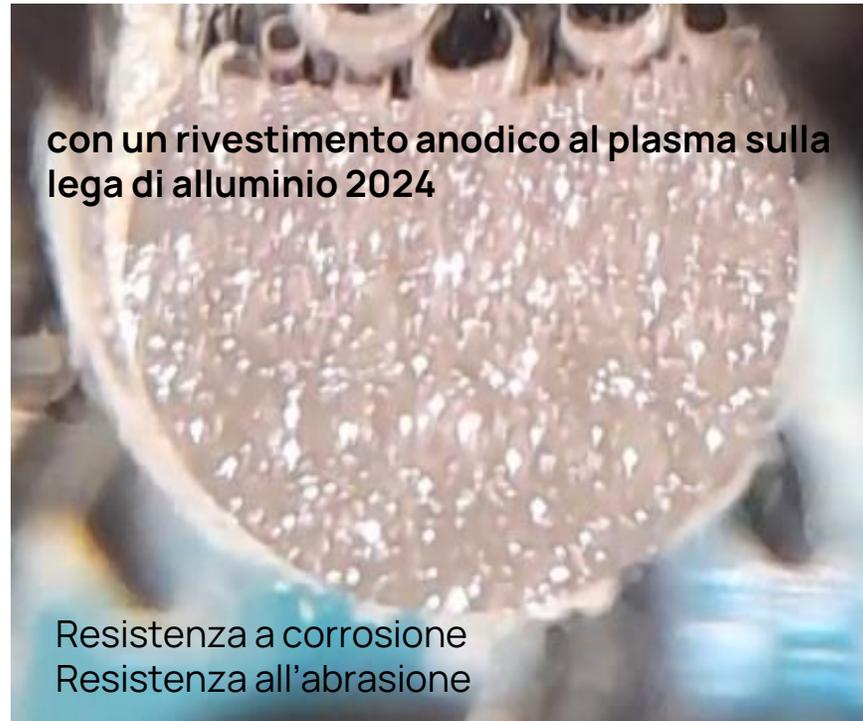
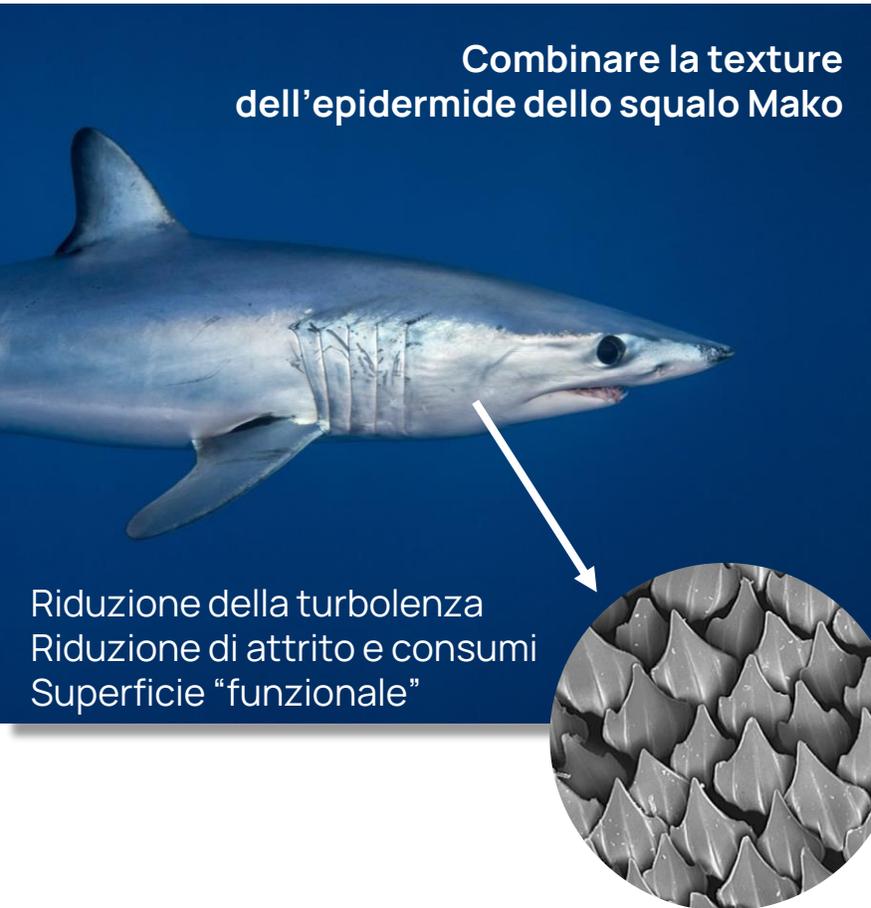
M. Gamba<sup>1</sup>, M. Ormellese<sup>1</sup>, A. Cristoforetti<sup>2</sup>, M. Fedel<sup>2</sup>, A. Brenna<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Chimica, Materiali ed Ingegneria Chimica "Giulio Natta", Politecnico di Milano

<sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Trento

XVIII CONVEGNO NAZIONALE AIMAT  
31 agosto - 3 settembre 2025 | Ischia Porto (NA)

# MAKO: Biomimetic Corrosion Resistant Aluminium for Aeronautics



## Il progetto

WP1. Studio della texture

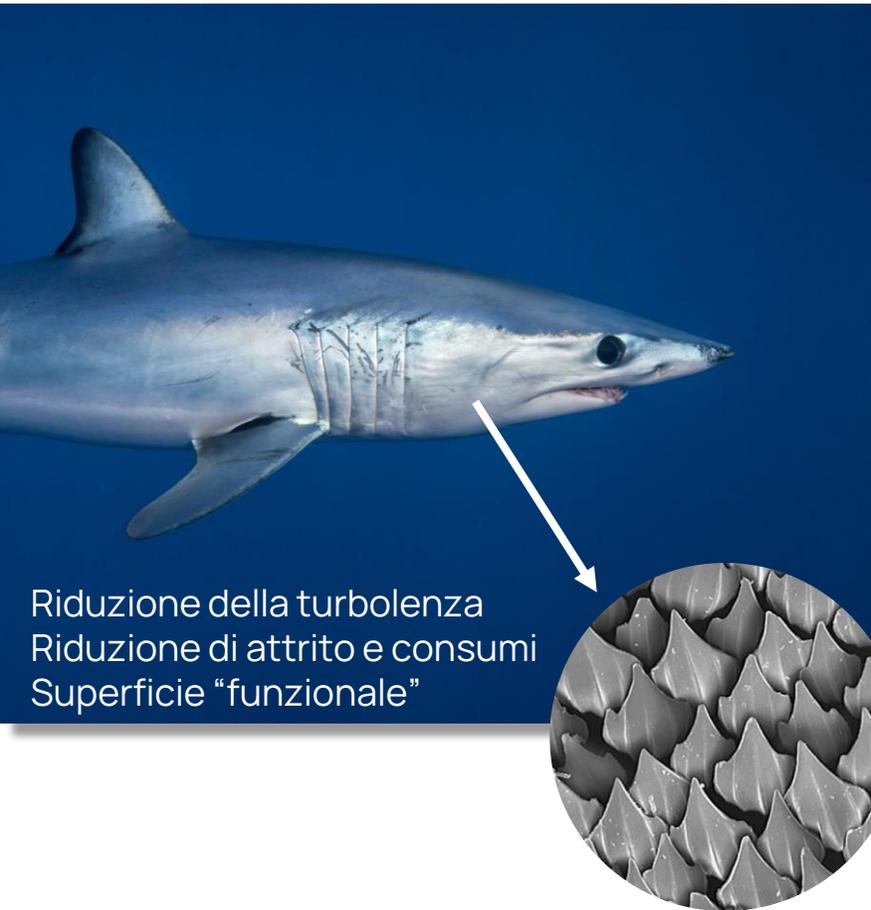
WP2. Produzione riblets

WP3. Rivestimento PEO

WP4. Prove di corrosione

Attività di ricerca co-finanziata dall'Unione Europea – Next Generation EU, PNRR - missione 4 "istruzione e ricerca" - D.D. N. 104/2022 "BANDO PRIN 2022".

# MAKO: Biomimetic Corrosion Resistant Aluminium for Aeronautics



777-300ER **12 of 12**  
**SWISS**

777F **4 of 11**  
Lufthansa Cargo

777-200ER **4 planned**  
**Austrian**

**17** AeroSHARK-modified aircraft already active in the Lufthansa Group

**11** additional AeroSHARK modifications already contracted for 777 fleets

**NEW:**  
Welcome to the shark tank,  
Austrian Airlines!

**100,000+** flight hours logged with the AeroSHARK modification

**~48** metric tons of carbon dioxide are currently saved every day!

CO<sub>2</sub> / 24

<https://www.lufthansa-technik.com/en/aeroshark>



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



**Italiadomani**  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA

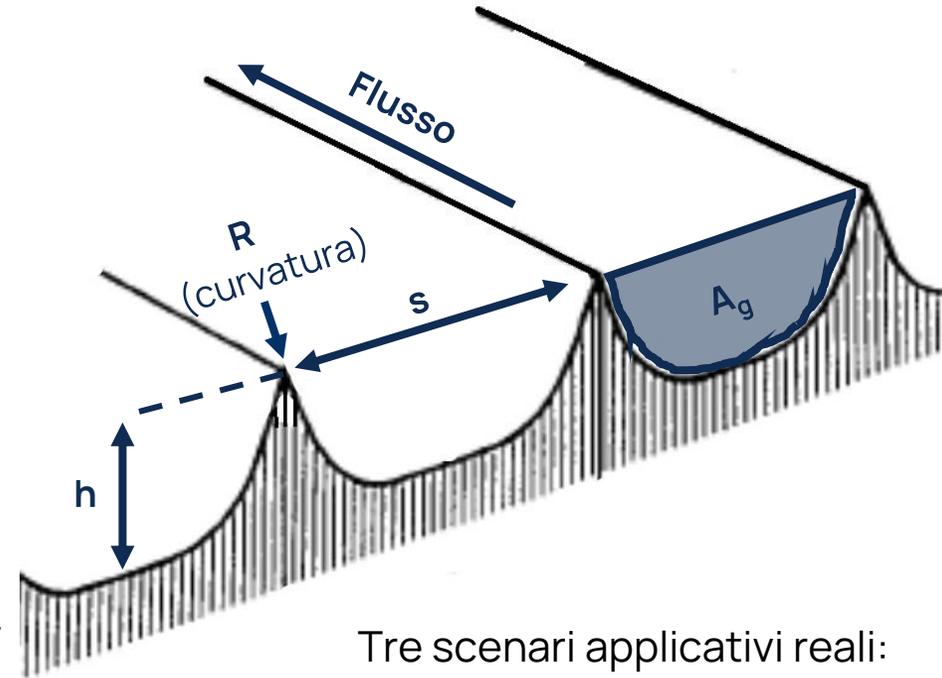
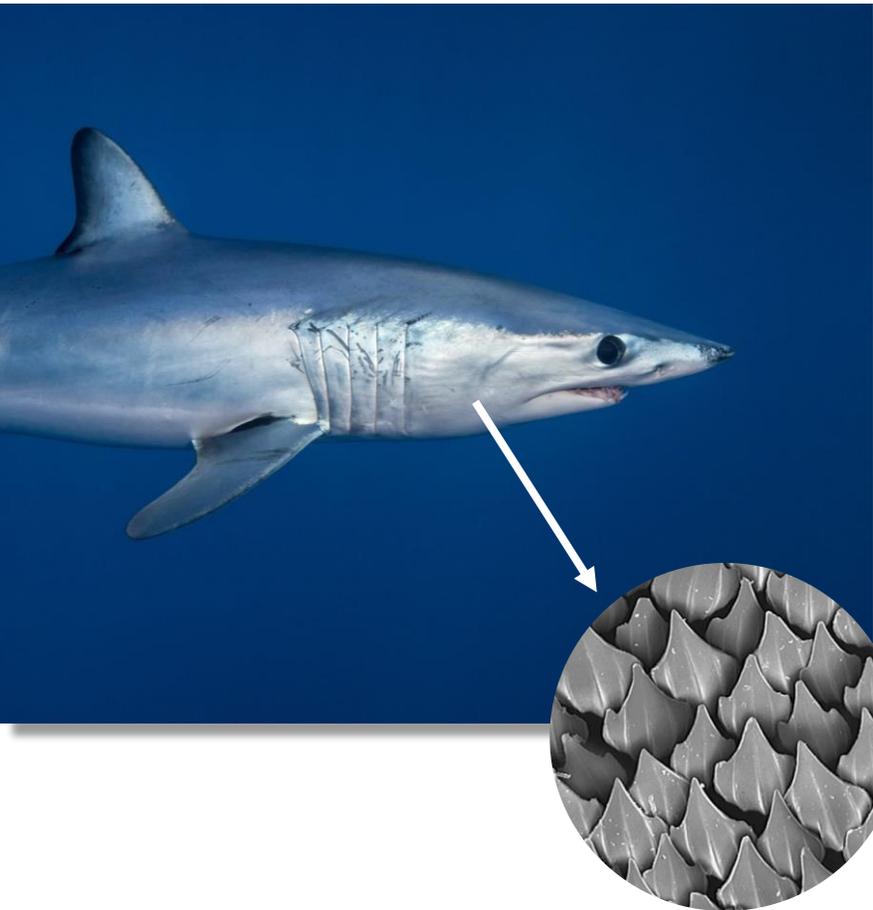


**POLITECNICO**  
MILANO 1863



**UNIVERSITÀ  
DI TRENTO**

# Definizione della texture biomimetica



Tre scenari applicativi reali:



STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

RIVESTIMENTO PEO

PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI

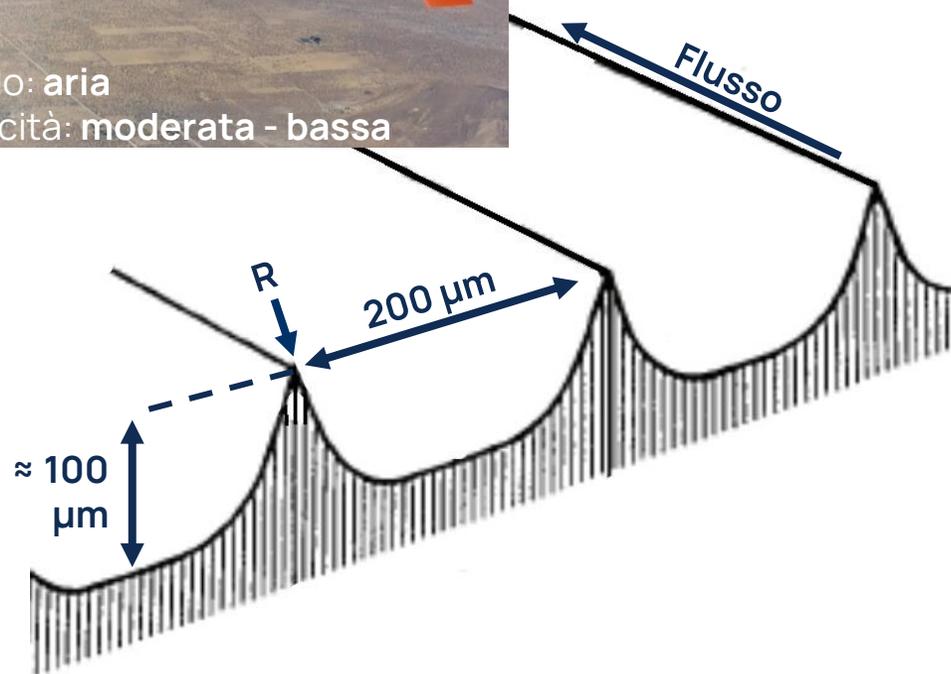
Le attività del WP1 sono state sviluppate in collaborazione con il prof. Maurizio Quadrio, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aero-spaziali, Politecnico di Milano.



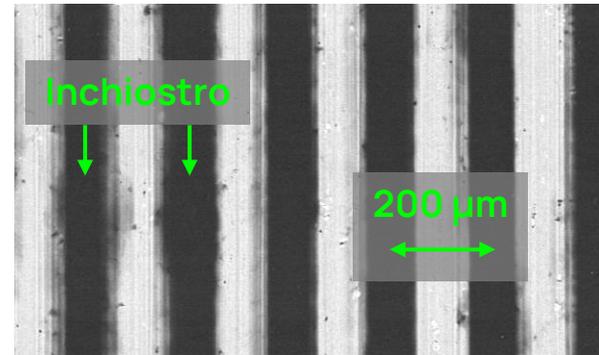
# Produzione della texture biomimetica sull'AA2024



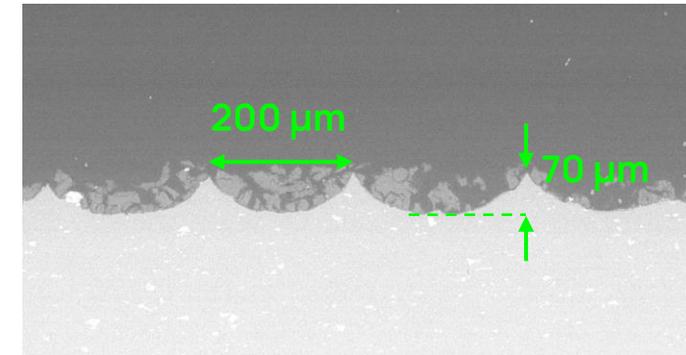
Fluido: aria  
Velocità: moderata - bassa



Le riblets sono state prodotte per **microlavorazione elettrochimica (TMEMM)**



Stampa inkjet di una **maschera isolante**  
Reticolazione UV



**Etching elettrochimico**  
DC o DC pulsata  
in  $\text{NaNO}_3$  1,17 mol/L

- Effetto della **direzione di laminazione**
- Effetto di **corrente e tempo** di etching
- Effetto dello **spessore della maschera**



STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

RIVESTIMENTO PEO

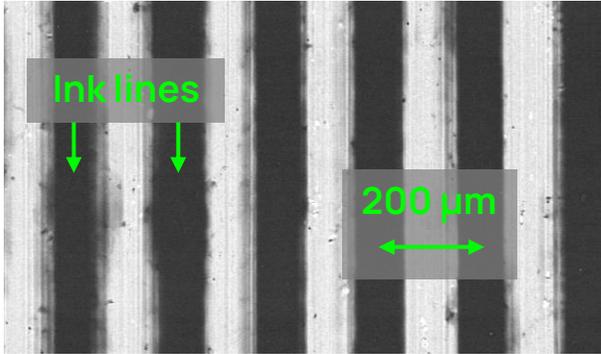
PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI

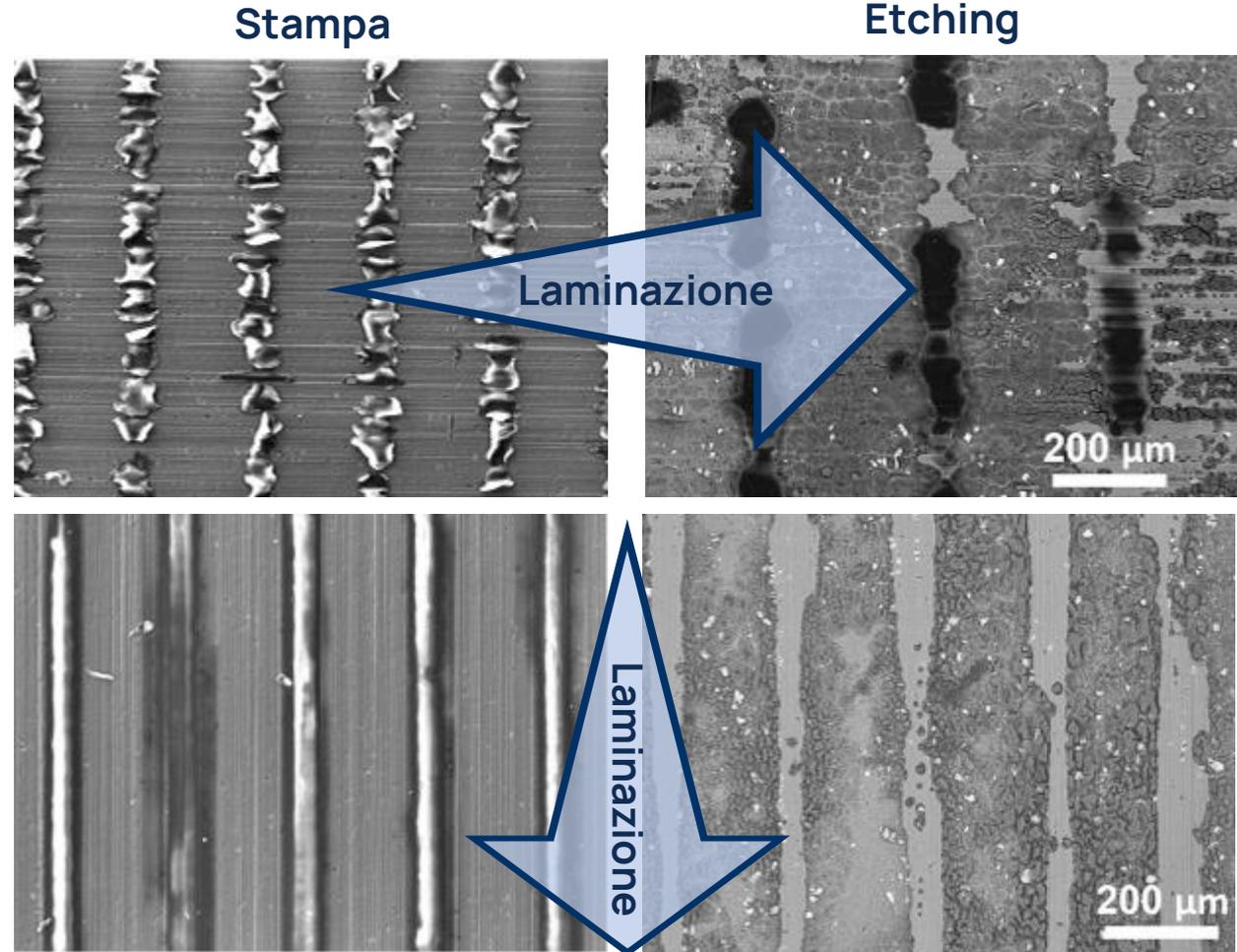


# Produzione della texture biomimetica: *Direzione di laminazione*

Le riblets sono state prodotte per **microlavorazione elettrochimica (TMEMM)**



Stampa inkjet di una maschera isolante  
Reticolazione UV



STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

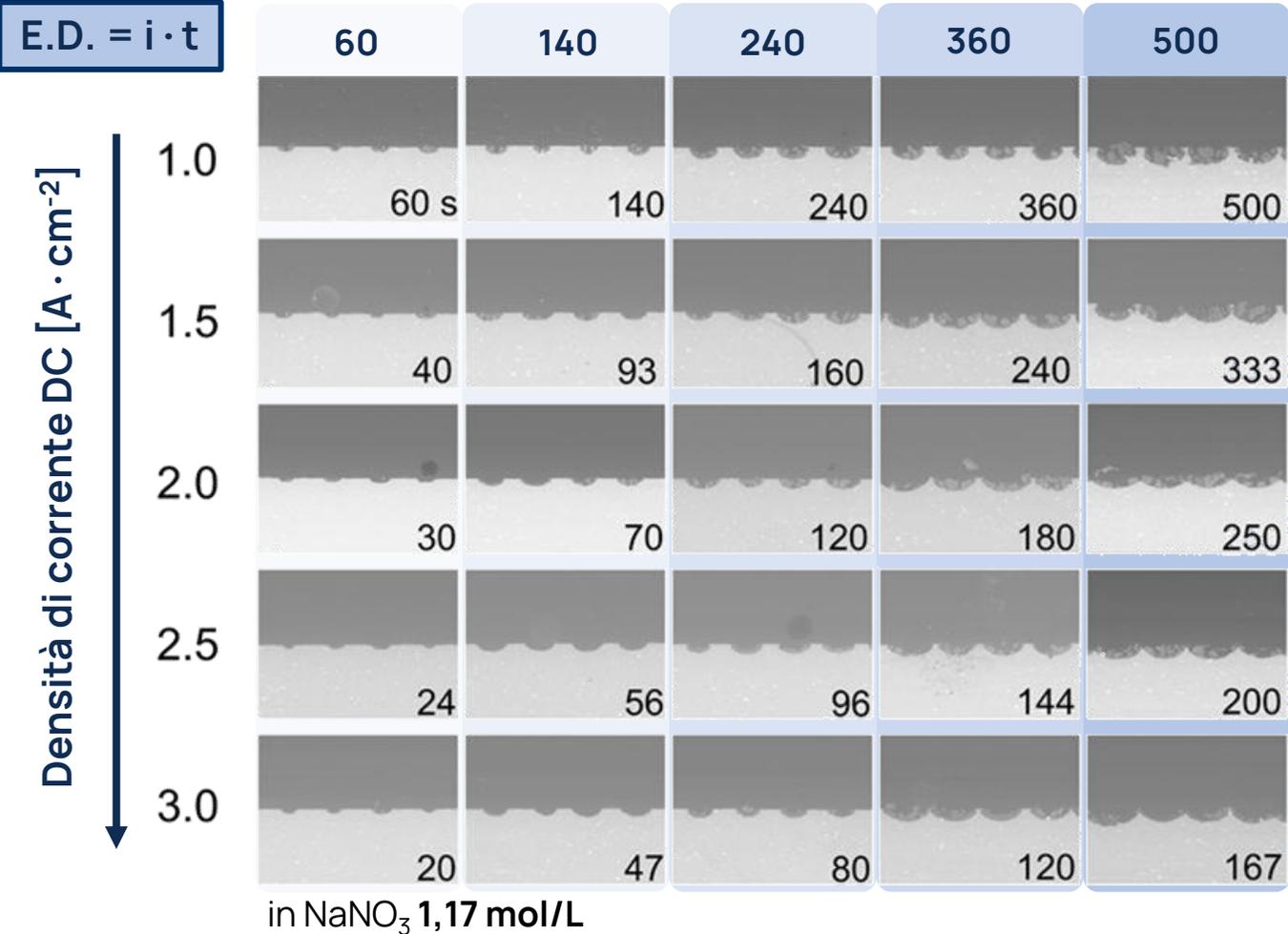
RIVESTIMENTO PEO

PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI

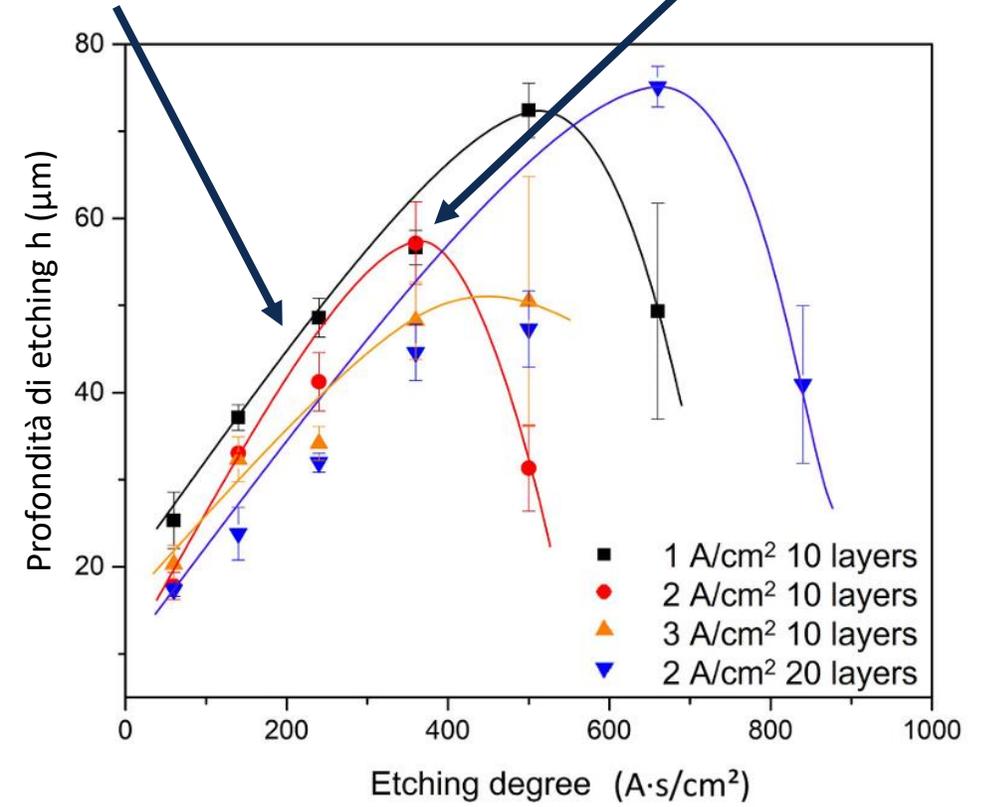
# Produzione della texture biomimetica: *Corrente e tempo di etching*

$E.D. = i \cdot t$



**Etching degree**  
Controllo sulla profondità raggiunta

**Densità di corrente**  
Controllo sulla massima profondità



STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

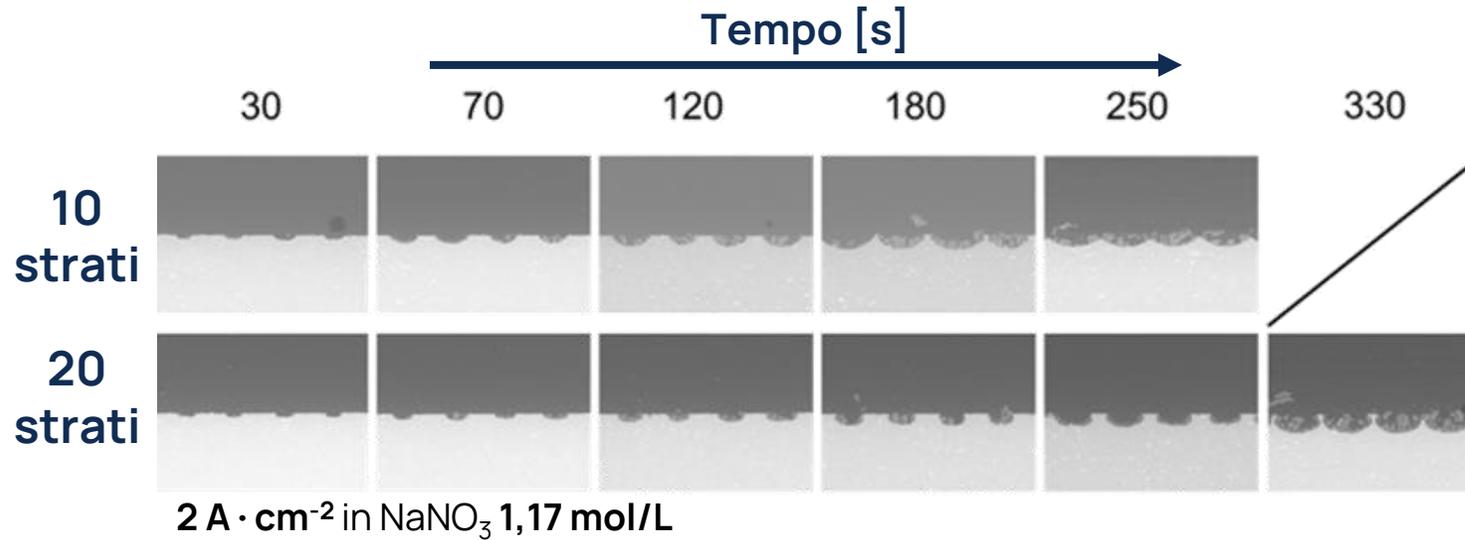
RIVESTIMENTO PEO

PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI

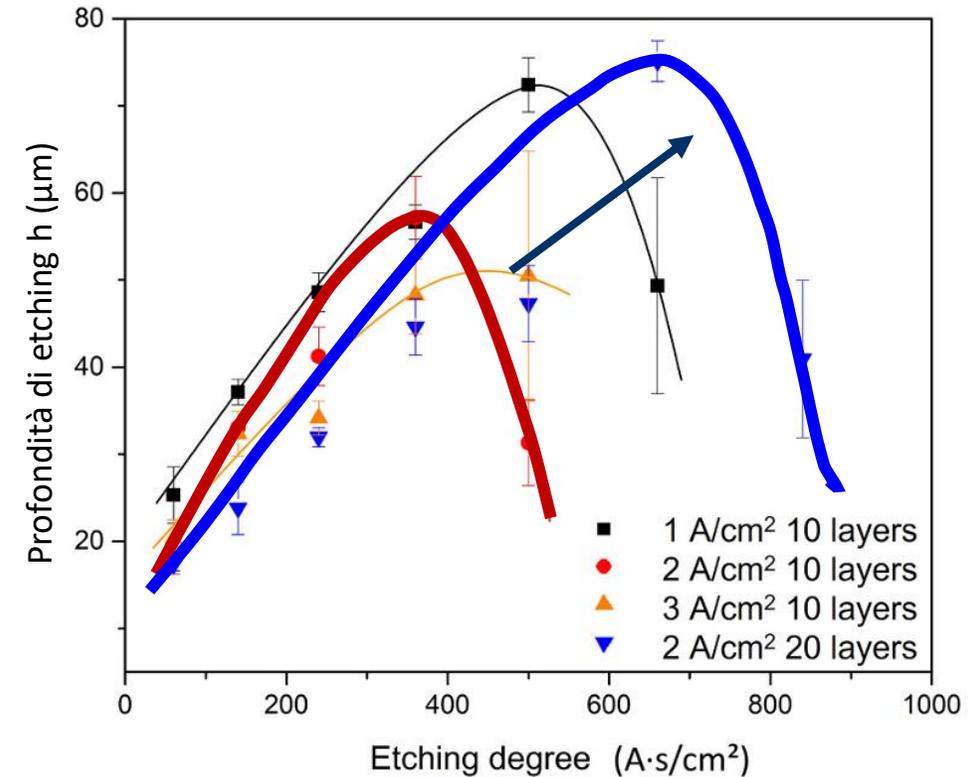


# Produzione della texture biomimetica: *Spessore della maschera*



## Aumento dello spessore della maschera

- Effetto ritardante
- Aumento della profondità di etching



STUDIO DELLA TEXTURE

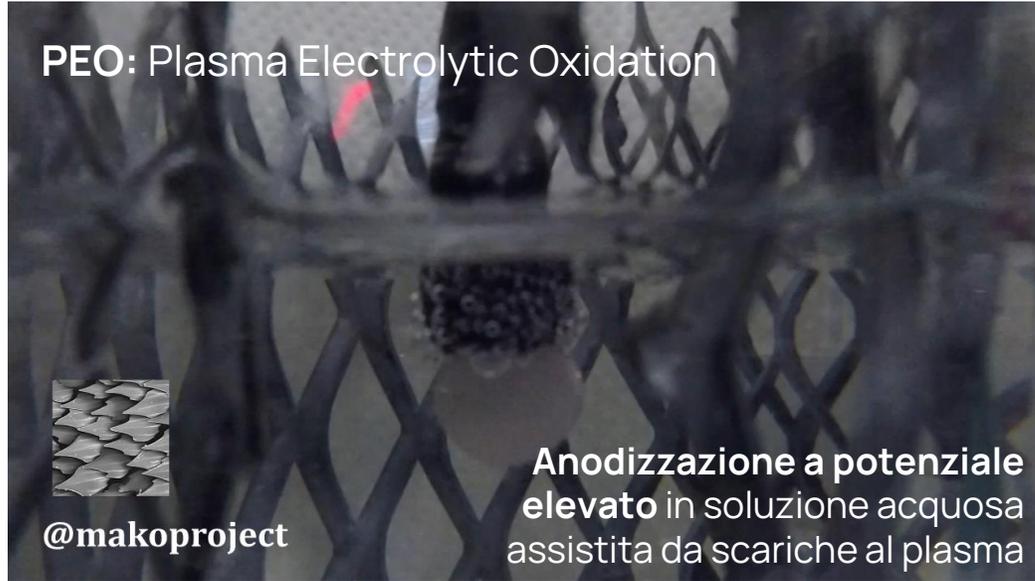
PRODUZIONE DELLA TEXTURE

RIVESTIMENTO PEO

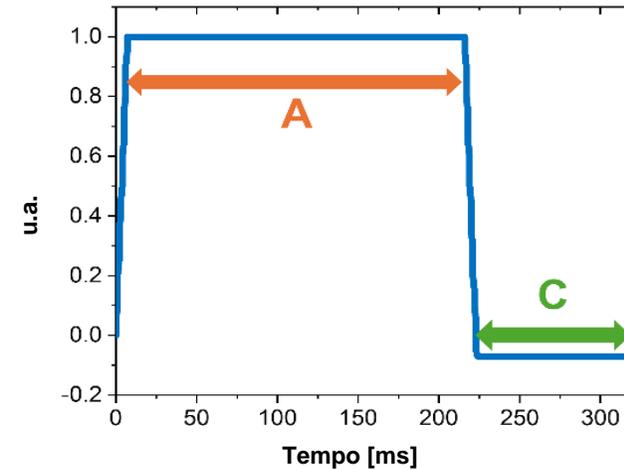
PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI

# Ottimizzazione del rivestimento PEO



PEO AC in **controllo di potenziale** con onde quadre 60-40-7  
Frequenza 1000 Hz, durata 14', picco 350 V<sub>eff</sub>



60% anodico  
40% catodico  
7% picco catodico vs anodico

- Definizione dell'input elettrico
- Effetto della **composizione dell'elettrolita**
  - Silicati di sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )
  - Componente cationica ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ )
  - **Alcalinità ( $\text{OH}^-$ )**
  - **Acidi organici ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )**



STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

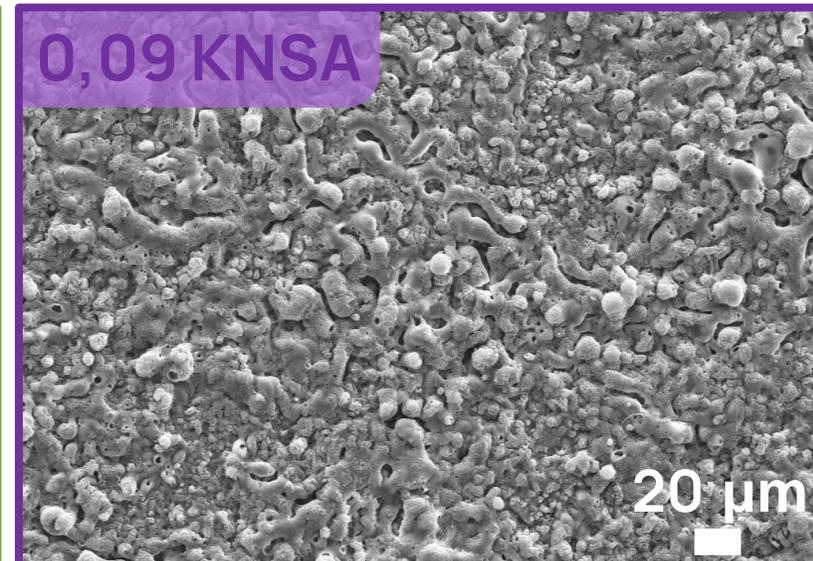
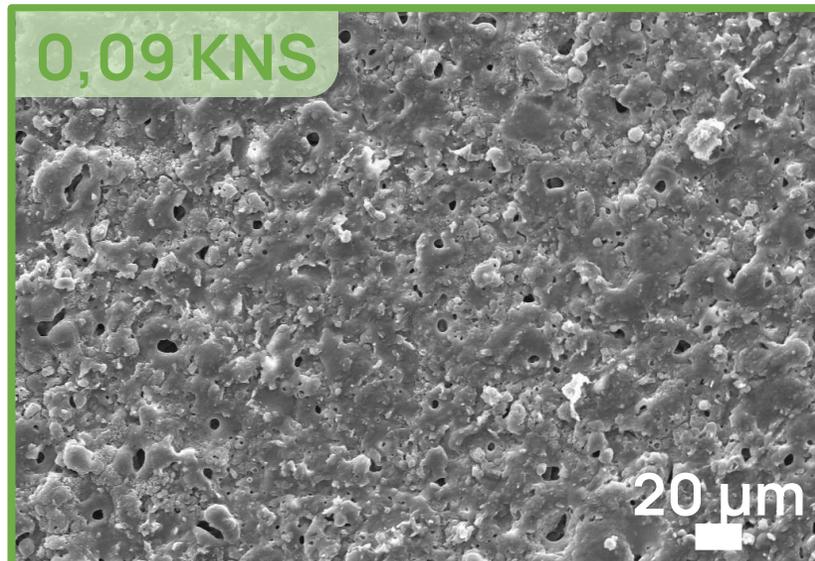
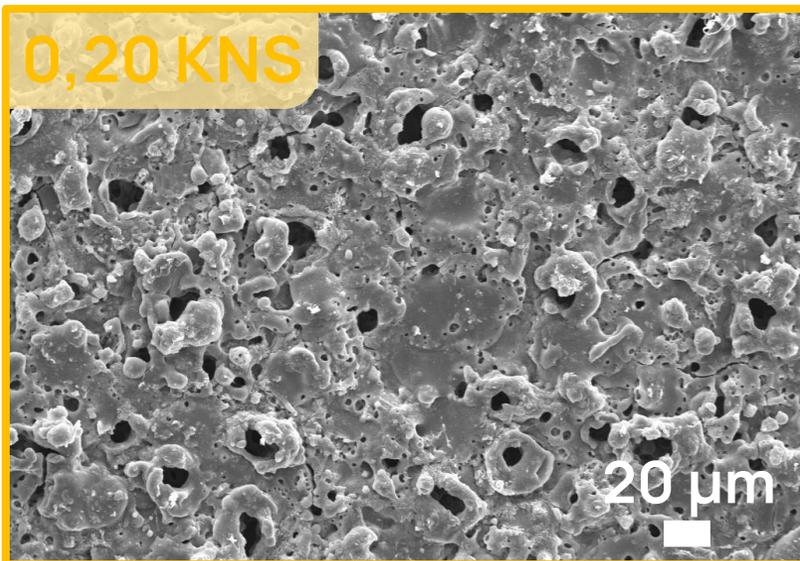
RIVESTIMENTO PEO

PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI

# Ottimizzazione del rivestimento PEO: *Morfologia*

Elettrolita	OH <sup>-</sup> [mol/L]	KOH [mol/L]	NaOH [mol/L]	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> [g/L]	CH <sub>3</sub> COOH [g/L]	Spessore [μm]	Porosità superficiale
0,20 KNS	0,20	0,04	0,16	10	-	34,32 (± 5%)	6,15 %
0,09 KNS	0,09	0,014	0,076	10	-	18,89 (± 4%)	2,58 %
0,09 KNSA	0,09	0,014	0,076	10	10	13,92 (± 7%)	1,25 %



STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

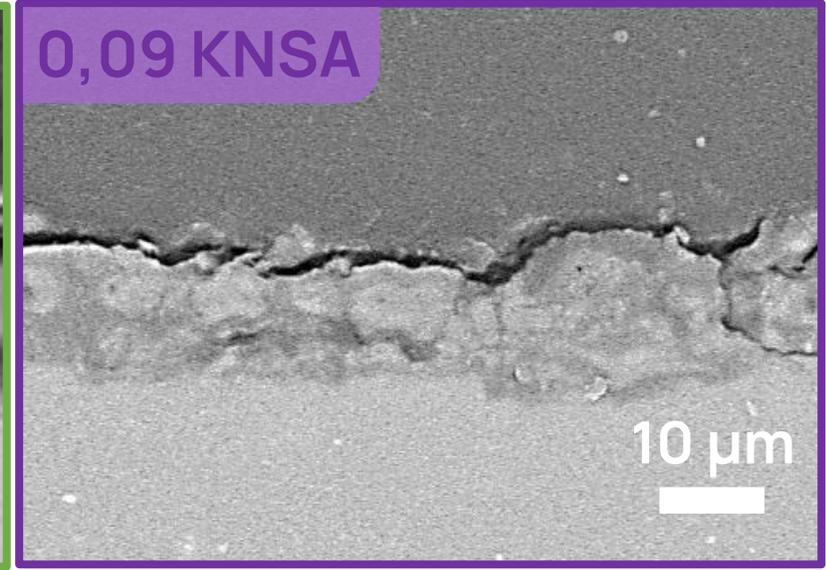
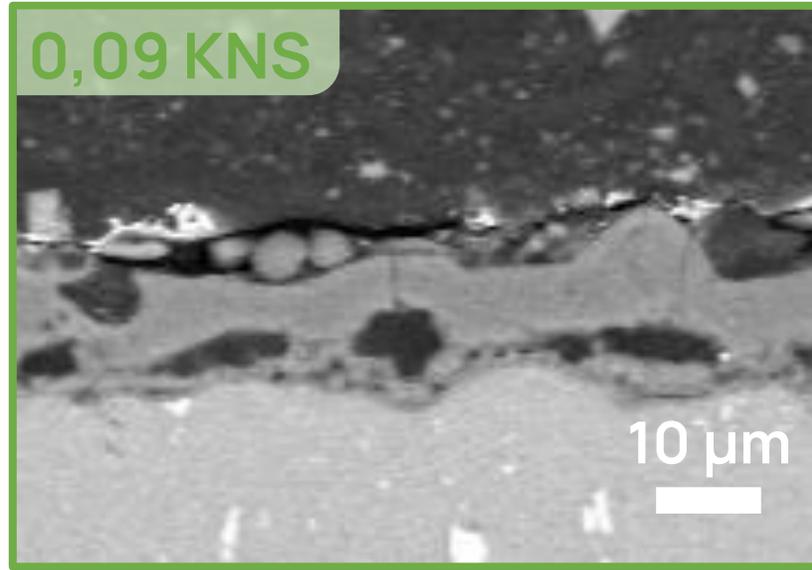
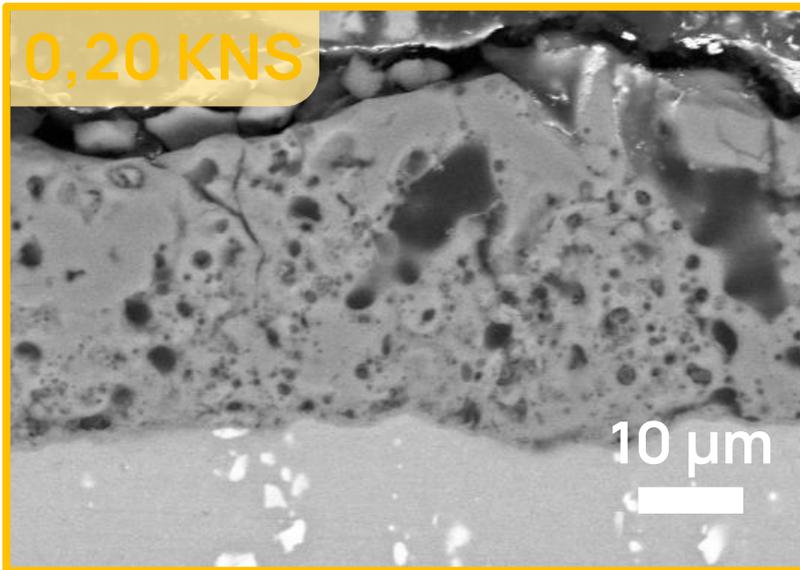
RIVESTIMENTO PEO

PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI

# Ottimizzazione del rivestimento PEO: *Microstruttura*

Elettrolita	OH <sup>-</sup> [mol/L]	KOH [mol/L]	NaOH [mol/L]	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> [g/L]	CH <sub>3</sub> COOH [g/L]	Spessore [μm]	Porosità superficiale
0,20 KNS	0,20	0,04	0,16	10	-	34,32 (± 5%)	6,15 %
0,09 KNS	0,09	0,014	0,076	10	-	18,89 (± 4%)	2,58 %
0,09 KNSA	0,09	0,014	0,076	10	10	13,92 (± 7%)	1,25 %



STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

RIVESTIMENTO PEO

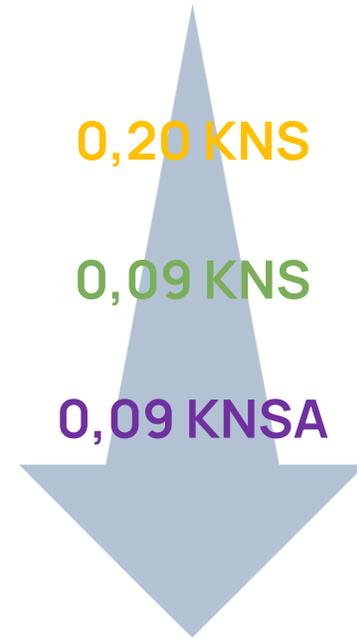
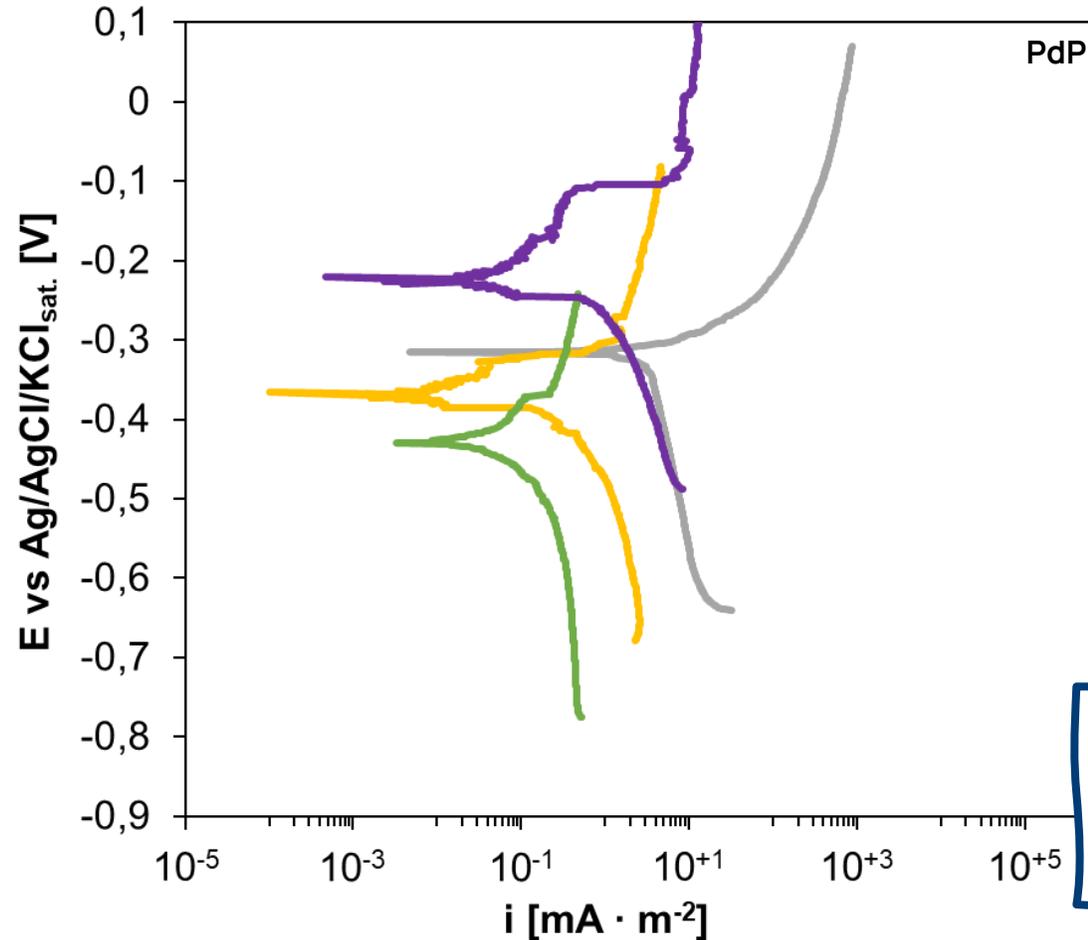
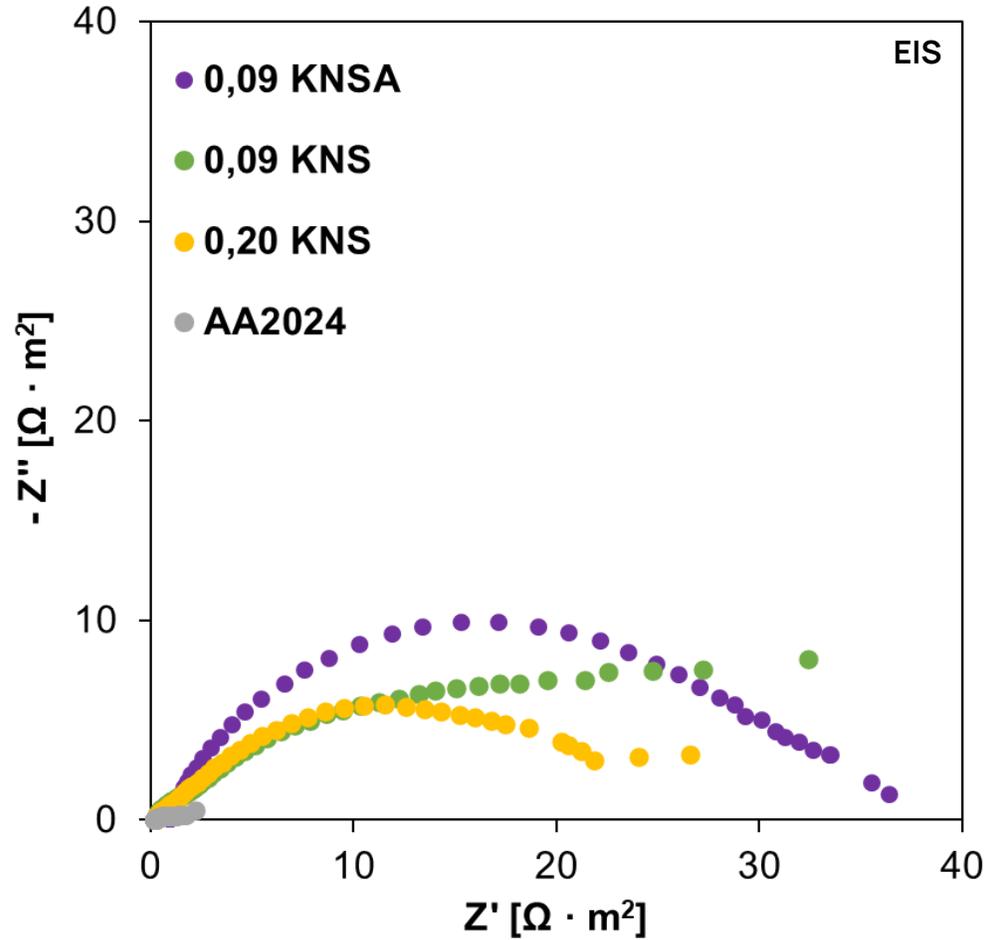
PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI



# Ottimizzazione del rivestimento PEO: *Resistenza a corrosione*

Ambiente poco aggressivo – 20 ppm Cl<sup>-</sup>, 1h immersione



**Difetti più piccoli**  
corrispondono ad  
**elevata protezione**  
(↓i<sub>corr</sub>, ↑R<sub>p</sub>)

STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

RIVESTIMENTO PEO

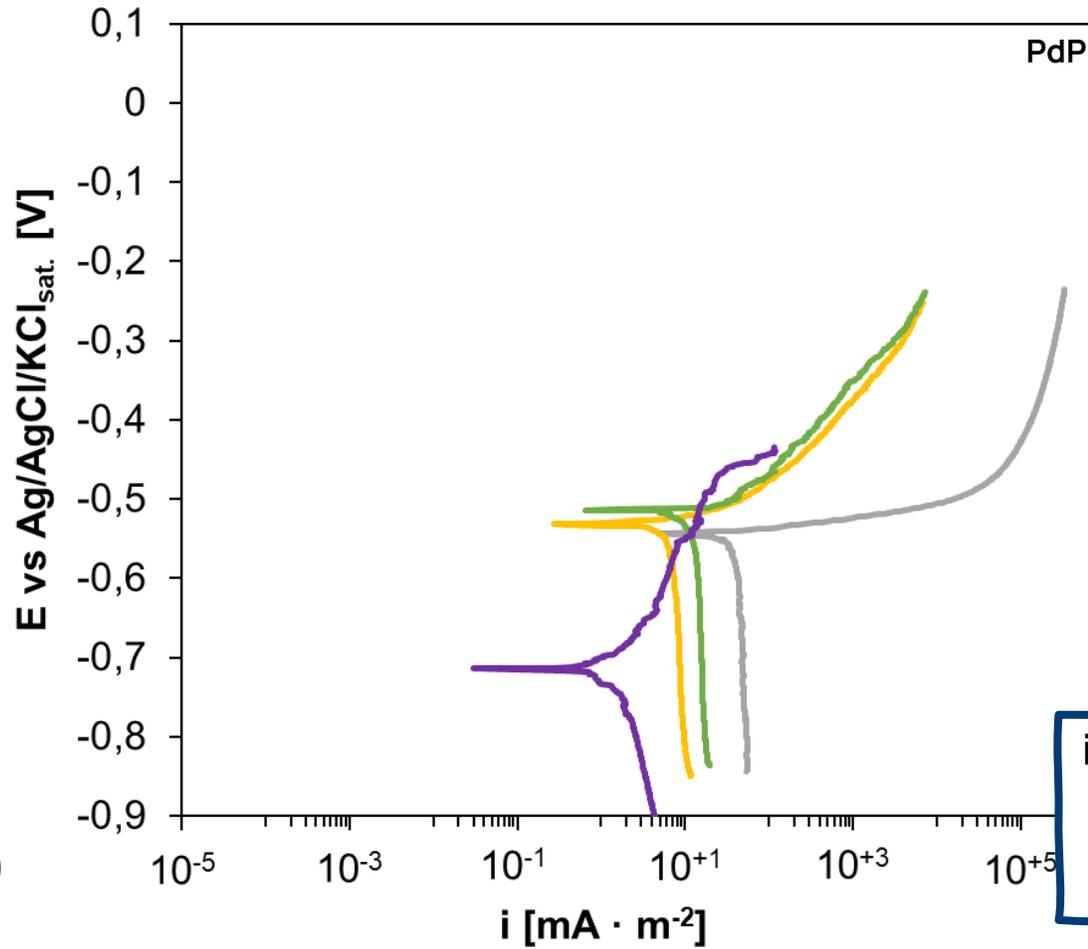
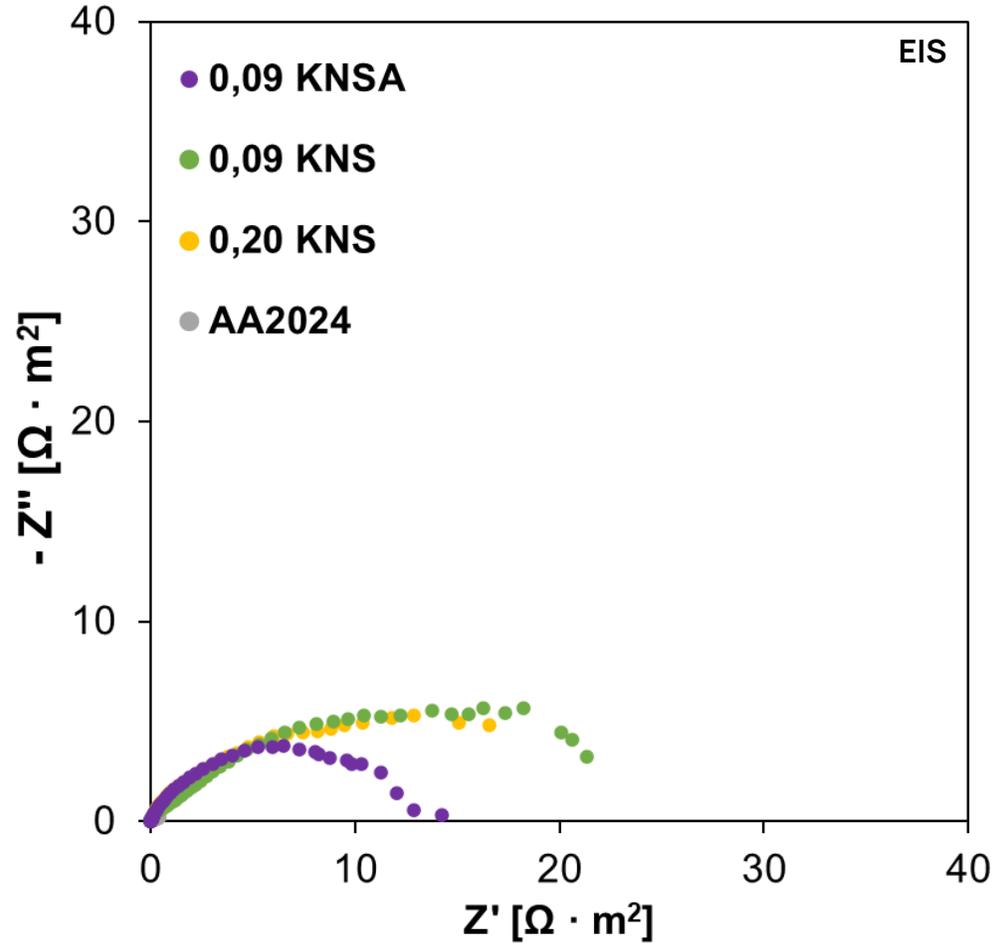
PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI



# Ottimizzazione del rivestimento PEO: *Resistenza a corrosione*

Ambiente molto aggressivo – 20k ppm Cl<sup>-</sup>, 1h immersione



Ranking  
confermato

0,20 KNS

0,09 KNS

0,09 KNSA

$i_{corr, PEO} \ll i_{corr, AA2204}$   
Anche in ambiente aggressivo

STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

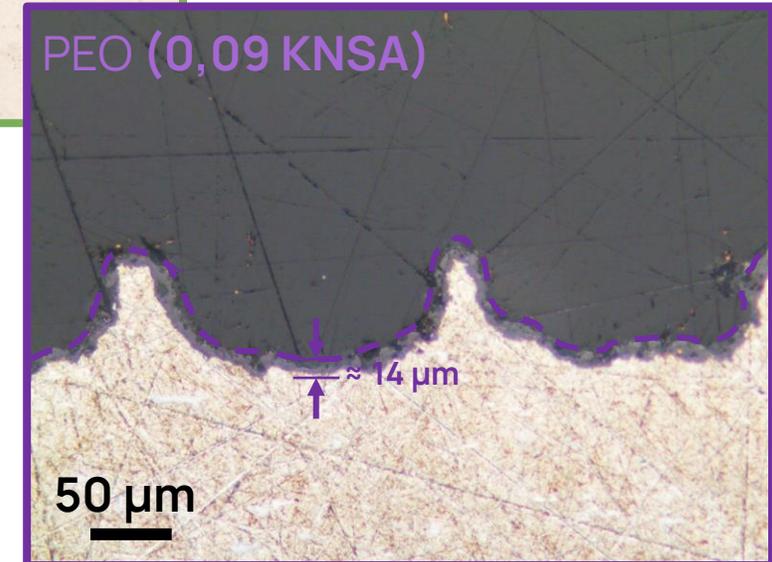
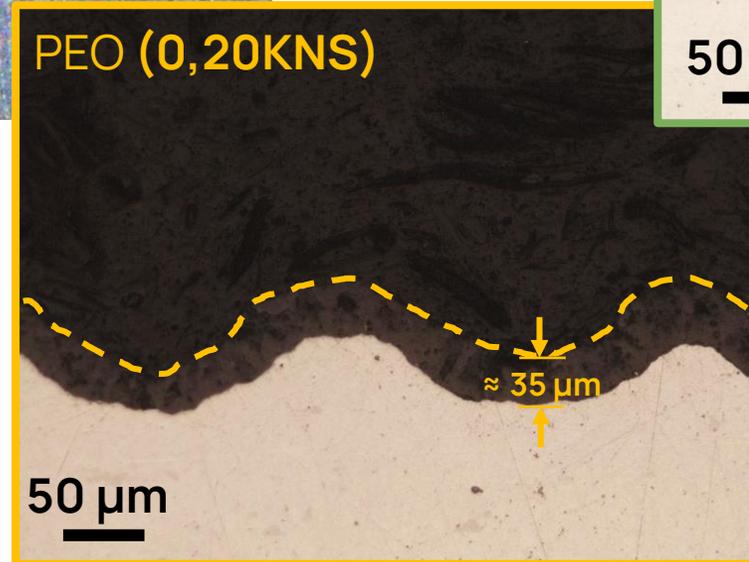
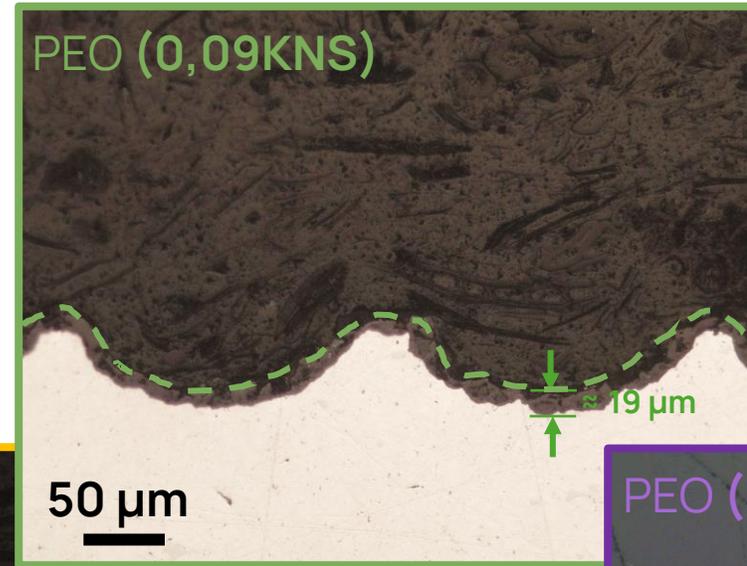
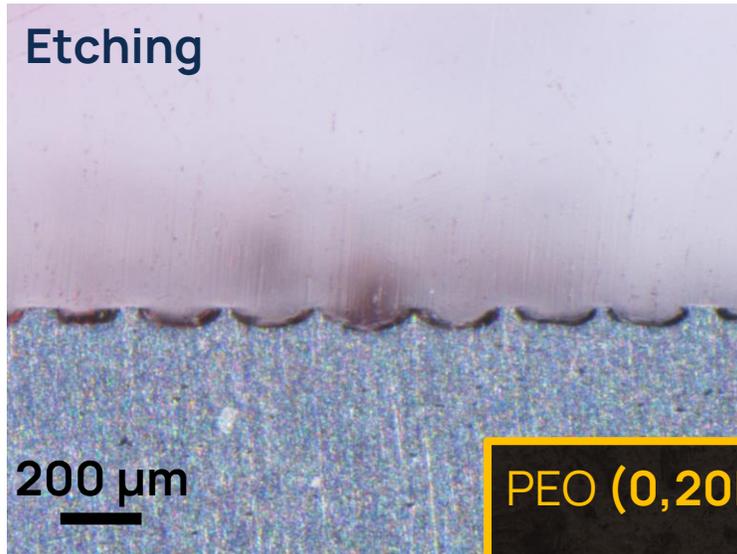
RIVESTIMENTO PEO

PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI



# Ottimizzazione del rivestimento PEO: *Superfici biomimetetiche*



STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

RIVESTIMENTO PEO

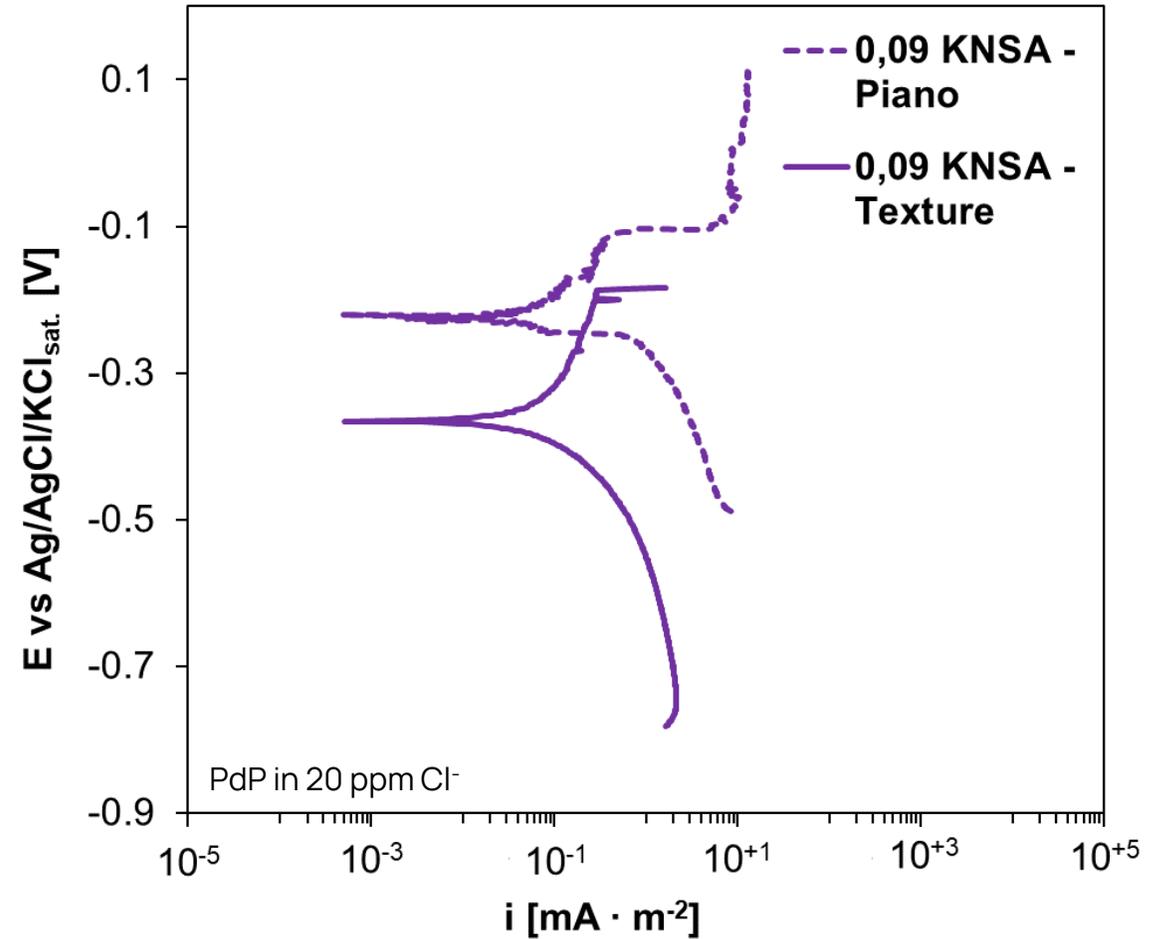
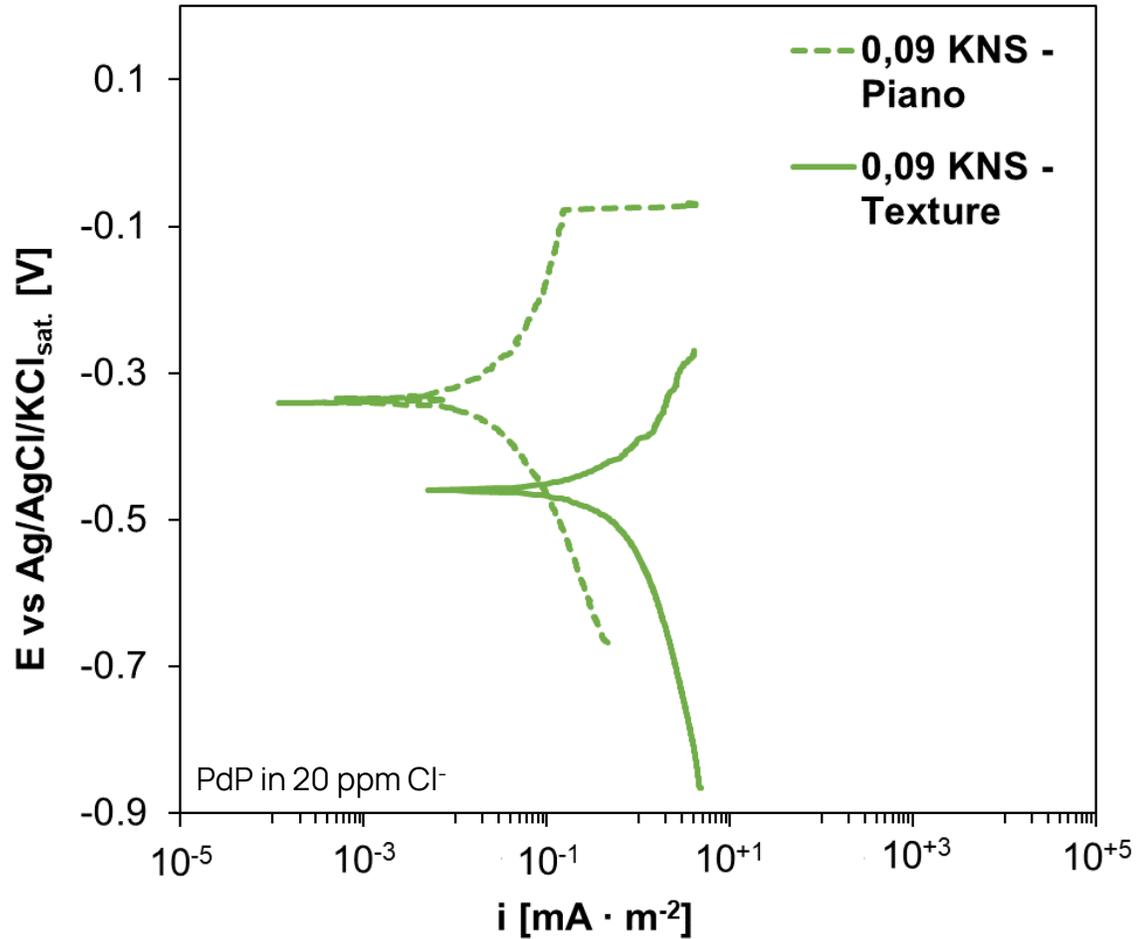
PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI



# Resistenza a corrosione

Rivestimenti scelti: 0,09 KNS, 0,09 KNSA.



STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

RIVESTIMENTO PEO

PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI

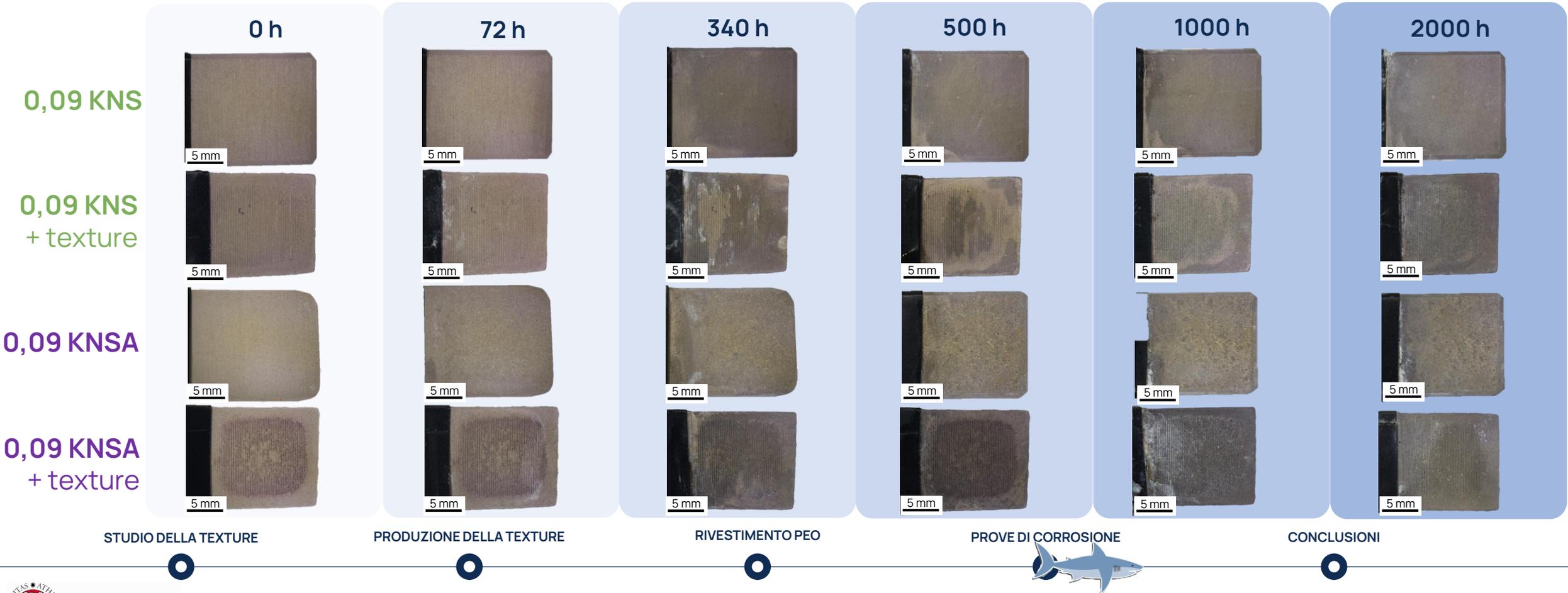


# Prove di corrosione accelerata

Rivestimenti scelti: **0,09 KNS**, **0,09 KNSA**.

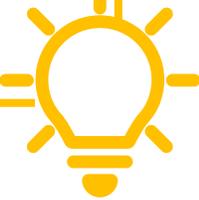
**Nebbia salina neutra** secondo ISO 9227:2022.

Prolungata esposizione ad elevata umidità atomizzando soluzione 5% NaCl.



## Conclusioni e sviluppi futuri

- La tecnica **TMEMM** si è dimostrata efficace per creare una **texture biomimetica** su AA2024.
- Il **grado di etching** e lo **spessore della maschera** controllano profondità e velocità di rimozione.
- La resistenza a corrosione di un **rivestimento PEO** dipende principalmente dalla sua **porosità**.
- La PEO **riproduce la texture biomimetica** del substrato con un'accuratezza dipendente dall'elettrolita.
- La presenza della texture biomimetica riduce la durabilità del rivestimento a **lunghe esposizioni**.



- Sigillare i pori del rivestimento PEO per aumentare la resistenza a corrosione.
- Avviare prove di corrosione in ambienti naturali (urbano e marino).
- Comprendere il diverso comportamento della PEO su superfici texturizzate.



STUDIO DELLA TEXTURE

PRODUZIONE DELLA TEXTURE

RIVESTIMENTO PEO

PROVE DI CORROSIONE

CONCLUSIONI



# Grazie per l'attenzione!

Follow the shark!



 @makoproject

 [polilapp.chem.polimi.it](http://polilapp.chem.polimi.it)

Attività di ricerca co-finanziata dall'Unione Europea – Next Generation EU, PNRR - missione 4 “istruzione e ricerca” - D.D. N. 104/2022 “BANDO PRIN 2022”.