La corrosione dei metalli prodotti mediante additive manufacturing: nuovi spunti per la scienza della corrosione

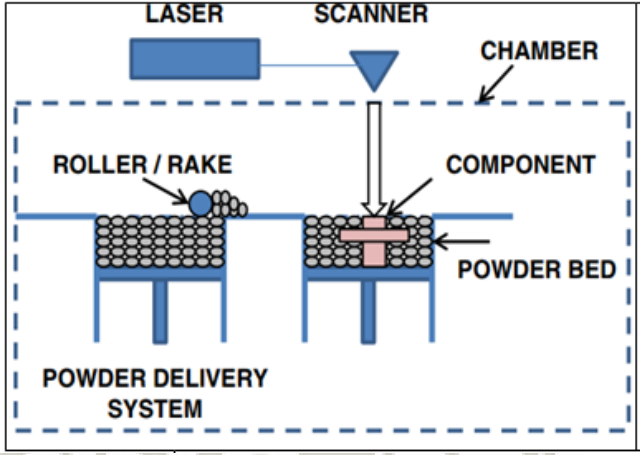
Tommaso Pastore, Marina Cabrini, Sergio Lorenzi, Cristian Testa

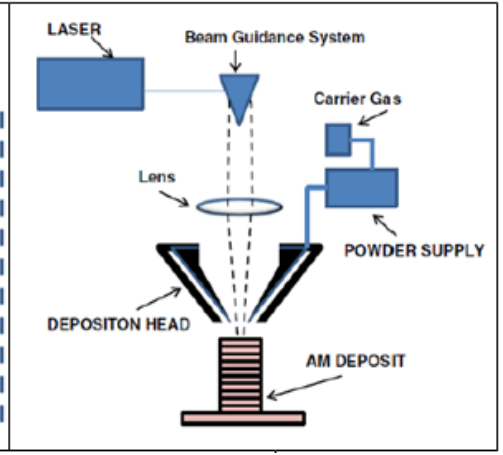
Università degli Studi di Bergamo
Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate

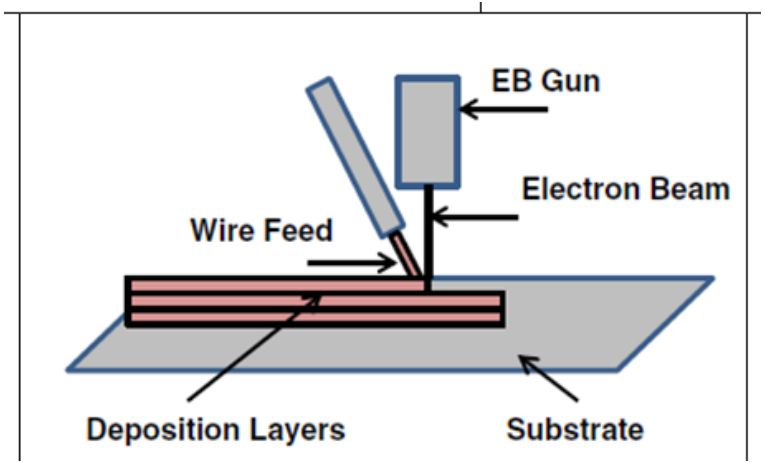
Giornata di studio "Pietro Pedeferri": Dalla ricerca all'industria: le nuove frontiere dell'ingegneria della corrosione

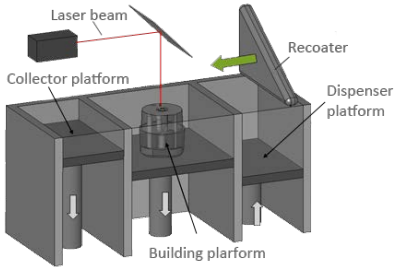
Additive manufacturing

Processi di fabbricazione basati sulla costruzione *layer by layer* del prodotto

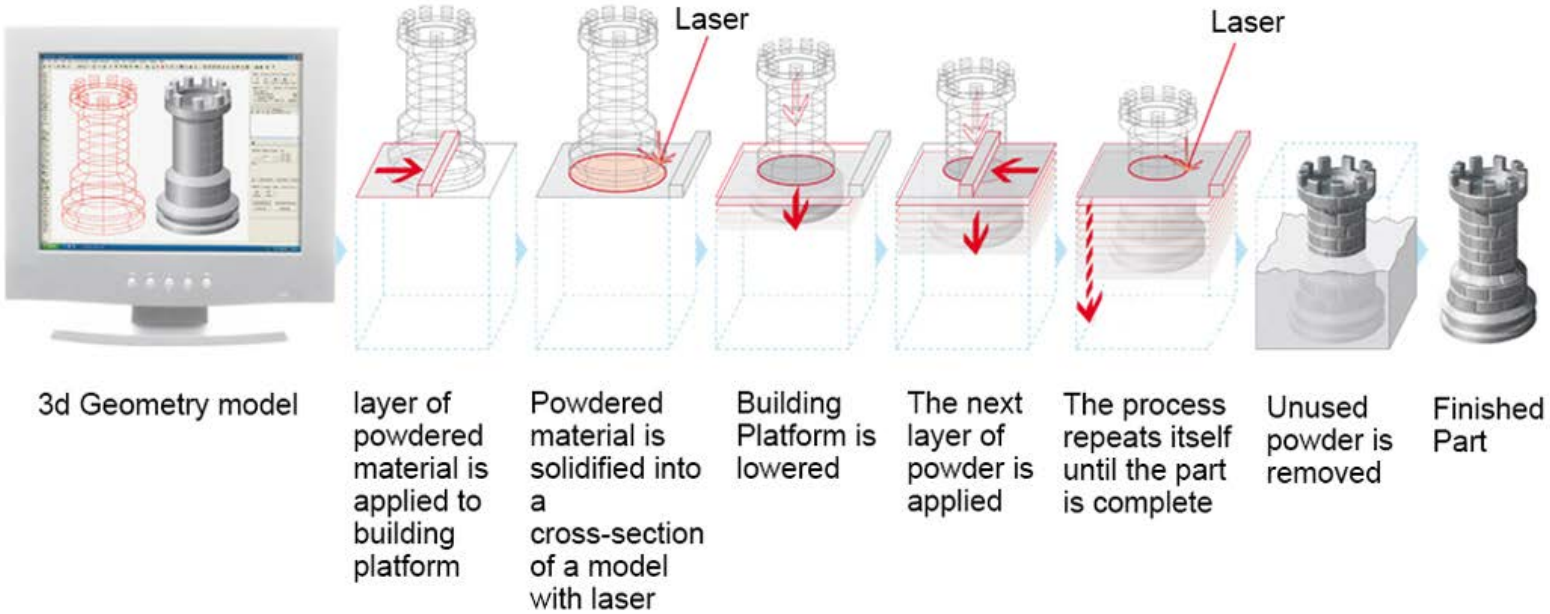








Laser Powder Bed Fusion

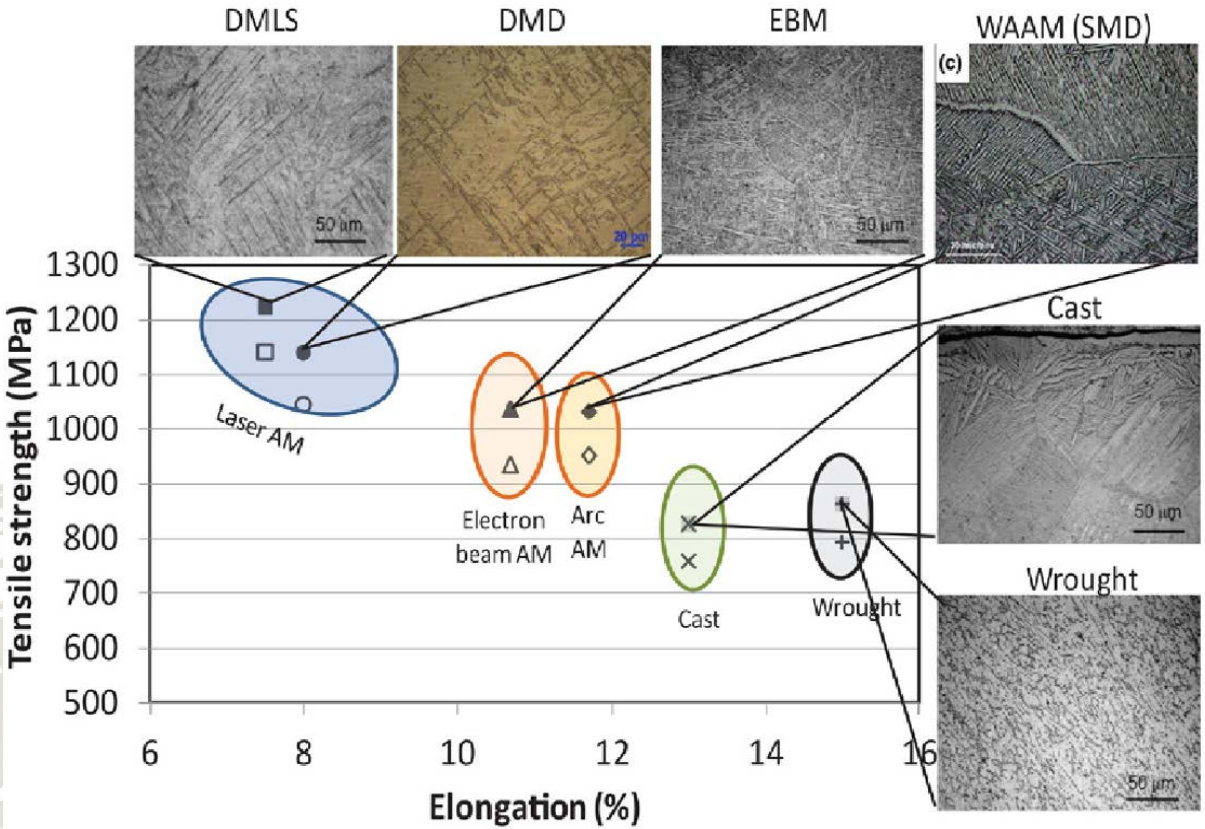


▪Courtesy of EOS

Caratteristiche delle leghe ottenute per AM

- Elevate velocità di raffreddamento
- Differente solubilità degli elementi di lega
- Precipitazione di seconde fasi
- Dipendenza dalla direzione di crescita
- Modifica della microstruttura tramite trattamenti termici post-processing

Leghe di titanio ottenute per AM (by D. Manfredi)



B. Dutta, Francis H. (Sam) Froes***
*DM3D Technology, Auburn Hills, MI, USA
**Consultant to the Titanium Industry, Tacoma, WA, USA

Comportamento a corrosione delle leghe prodotte per AM

- **Effetti microstrutturali sulla lega appena prodotta:**
  - Fasi metastabili
  - Segregazione di seconde fasi o alterazione della composizione (ad esempio tra bordo e centro del pozzetto)
  - Orientamento rispetto al piano di crescita
- **Effetti di superficie:**
  - Film passivo differente
    - *Superfici tal quali*
    - *Dopo trattamento termico (vuoto o in aria)*
    - *Dopo pulizia chimica*
    - *Dopo rimozione meccanica (shoot peening o sabbiatura o lucidatura)*
  - Porosità, ossidi e parti di polvere non legata
- **Effetto dei trattamenti termici post-processing**

Necessità di qualifica dei materiali prodotti per AM per impieghi specifici

- ES. progetto AMCRA cofinanziato Regione Lombardia – INSTM
- «Additive Manufacturing di leghe resistenti alla corrosione per componenti di valvole (IN-RL2)»

DNV·GL

CLASS GUIDELINE

DNVGL-CG-0197 Edition November 2017

Additive manufacturing - qualification and certification process for materials and components

Principali leghe ottenibili (attualmente) per AM

Comportamento attivo

- Acciai Maraging MSI
- Acciai inossidabili (AISI 316L, 17-4 PH)
- Titanio e sue leghe: TiCP, Ti6Al4V, Ti64ELI
- Leghe Cr-Co-Mo
- Leghe di Nichel (Nichel HX, IN625, IN718)
- Leghe di alluminio: AlSi10Mg, AlSi7, AlSi12

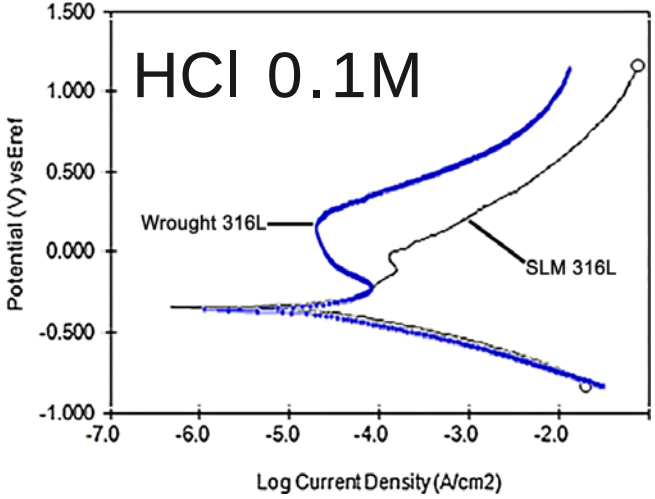
Comportamento attivo/passivo

Corrosione dei materiali attivi (acciaio)

- Non sono state riscontrate differenze tra il comportamento elettrochimico dell'acciaio AISI 4340 ottenuto per AM e con tecniche tradizionali
- Porosità, dimensione/bordi di grano, inclusioni, composizione, sforzi residui e irregolarità superficiali potrebbero influenzarne la velocità di corrosione
- Morfologia di corrosione dipendente dai parametri di stampa
- Da valutare la resistenza all'EAC

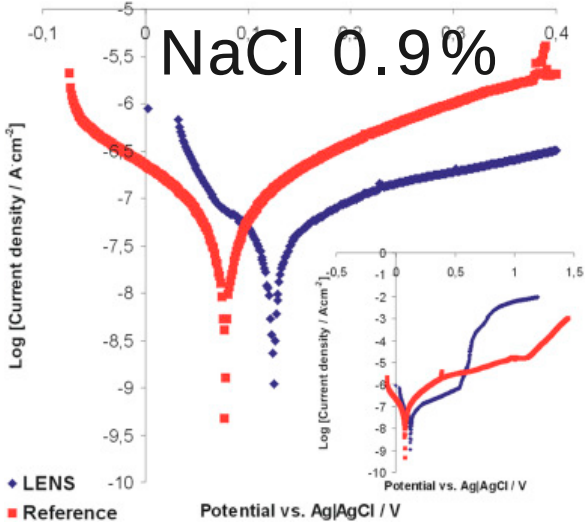
Schmidt, D., Jelis, E., Clemente, M., & Ravindra, N. (2015). CORROSION OF 3D PRINTED STEEL. *Proceedings - Materials Science & Technology 2015*. Columbus, Ohio, USA.

Materiali a comportamento attivo/passivo: AISI 316L



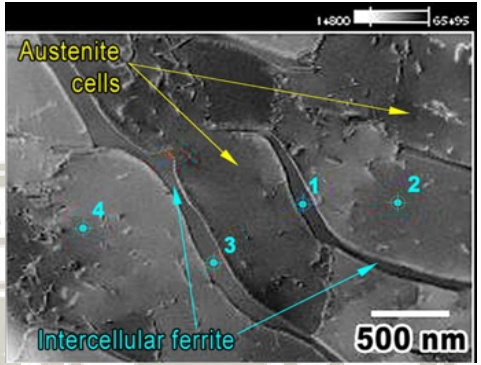
increased anodic current density.

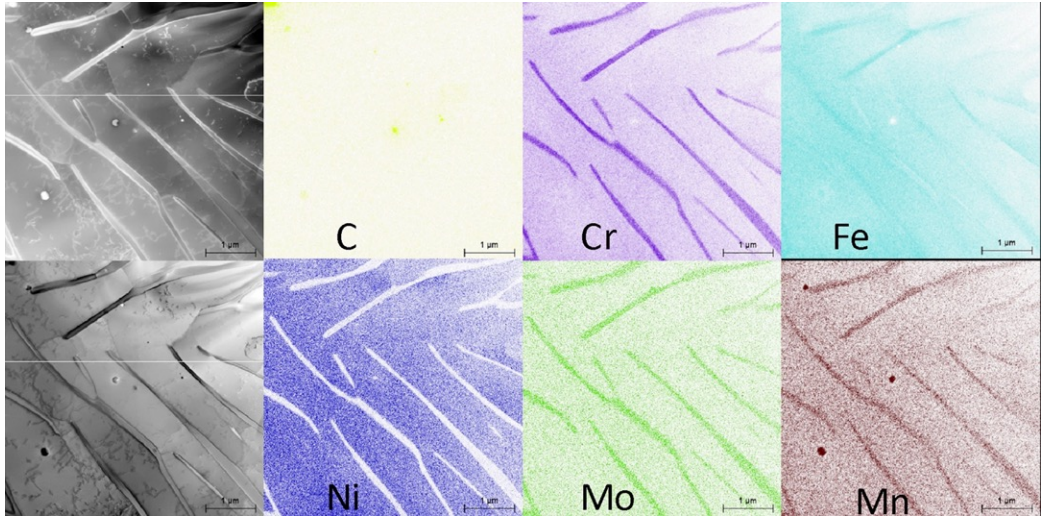
Trelewicz, J., Halada, G., Donaldson, O., & Manogharan, G. (2016). Microstructure and Corrosion Resistance of Laser Additively Manufactured 316L Stainless Steel. *JOM*, *68*(3), 850-859



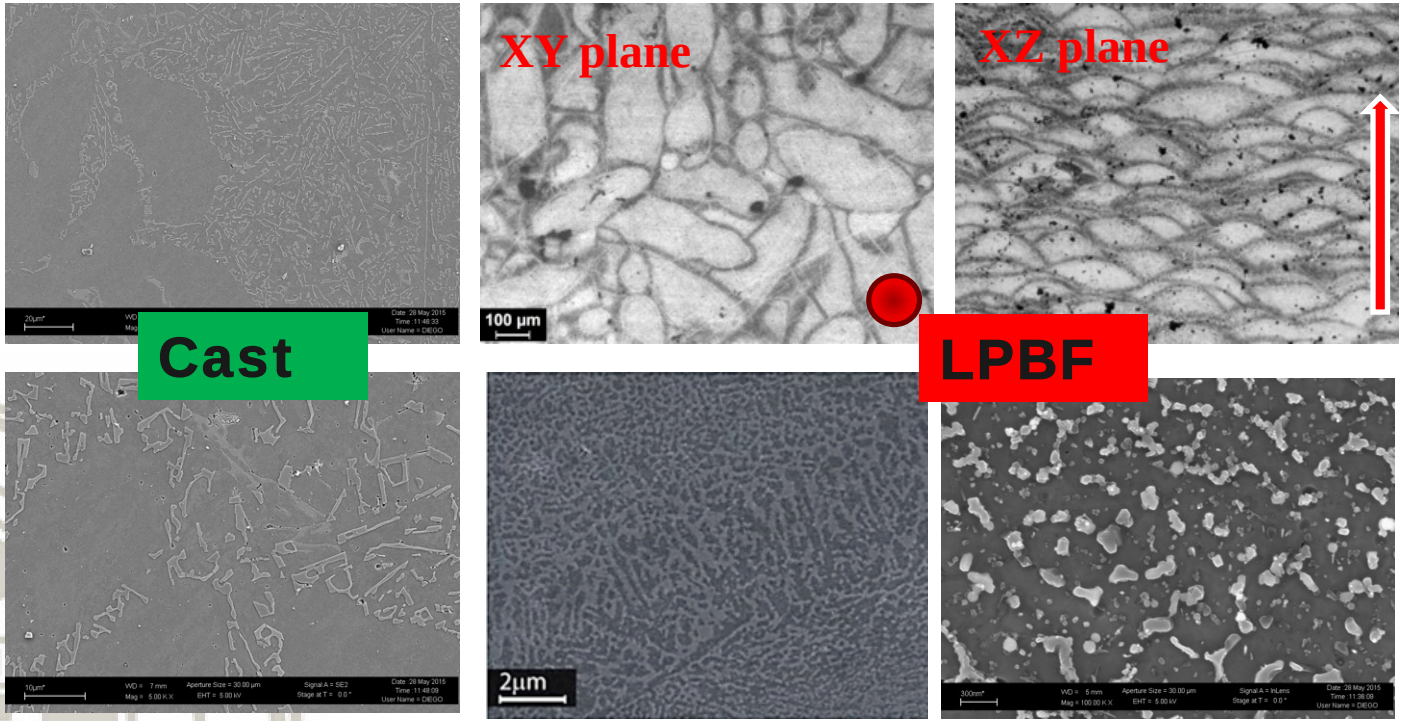
Ziętala, M., Durejko, T., Polański, M., Kunce, I., Płociński, T., Zieliński, W., . . . Bojar, Z. (2016). The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping. *Materials Science and Engineering: A*, *677*, 1-10.

Effetto della segregazione di Cr e Mo con formazione di ferrite delta e fase sigma (Ziętala et al, 2016)

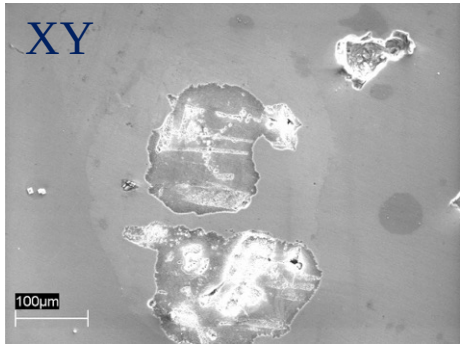


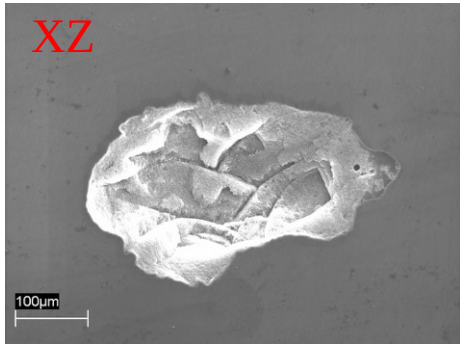


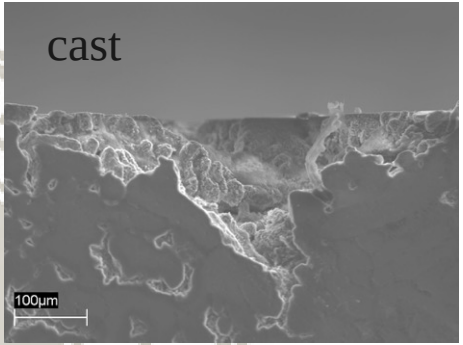
Microstruttura lega AlSi10Mg (cortesia di D.Manfredi, IIT@Polito)

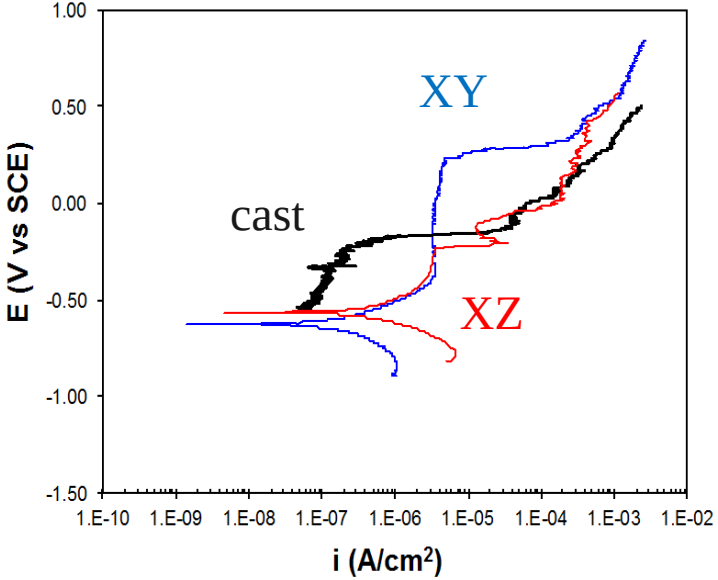


Effetto della microstruttura: confronto tra il getto e il LPBF

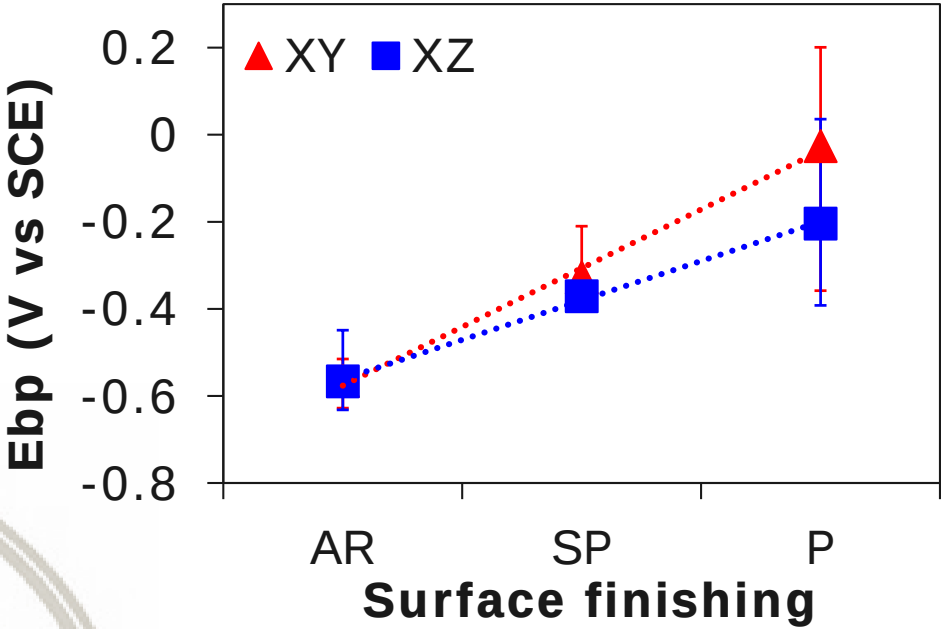






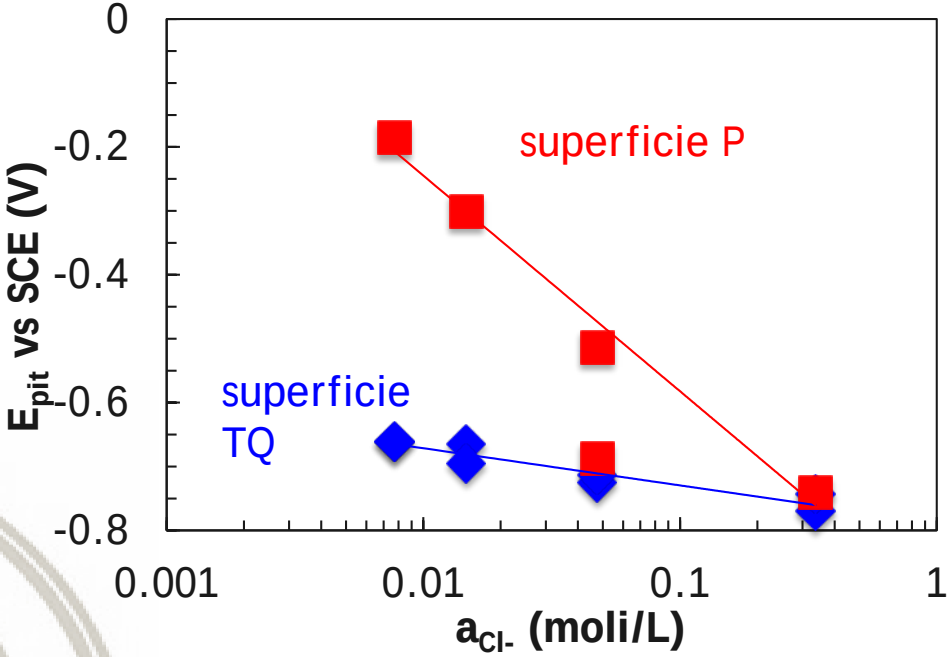


Effetto della condizione superficiale
(prove in soluzione di Harrison, 0,5% Cl^- pH 5.5)



Cabrini, M., Lorenzi, S., Pastore, T., Pellegrini, S., Manfredi, D., Fino, P., . . . Badini, C. (2016). Evaluation of corrosion resistance of Al–10Si–Mg alloy obtained by means of Direct Metal Laser Sintering. *JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 231* , 326-335.

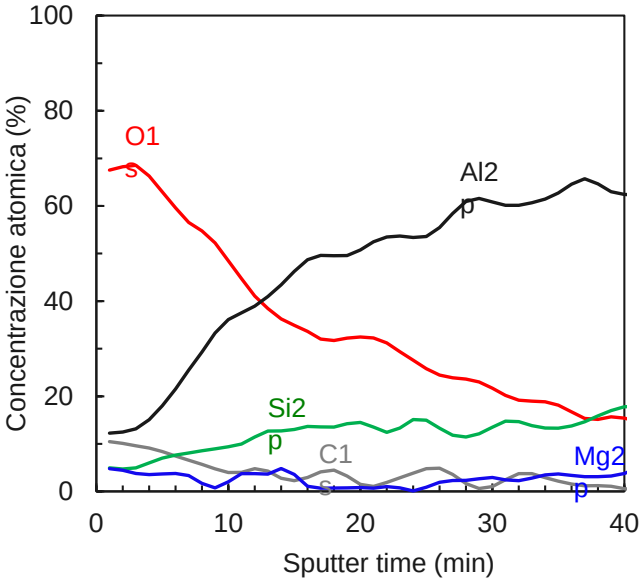
Effetto della condizione superficiale e del contenuto di Cl^-



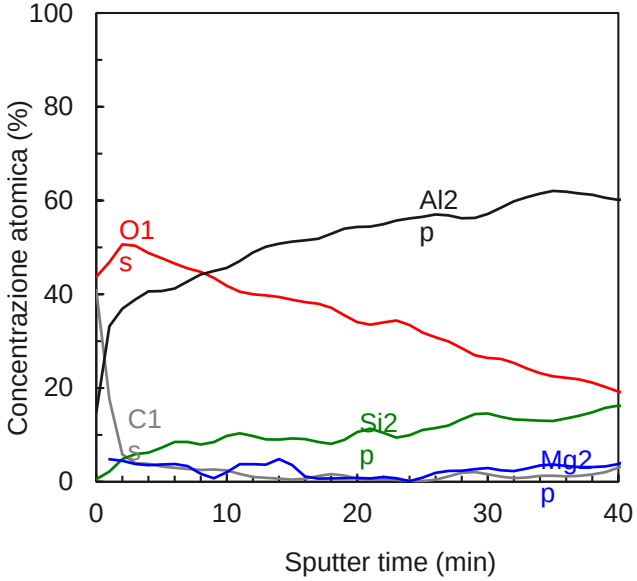
Cabrini, M., Lorenzi, S., Pastore, T., Pellegrini, S., Testa, C., Manfredi, D., . . . Fino, P. (2016). Analysis of corrosion resistance of the AlSi10Mg alloy obtained by Additive Manufacturing in chloride solution. *LA METALLURGIA ITALIANA*, 137-146.

Profili XPS sui provini TQ e P

Superficie tal quale

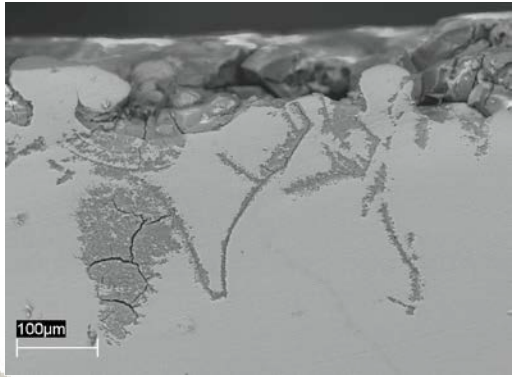


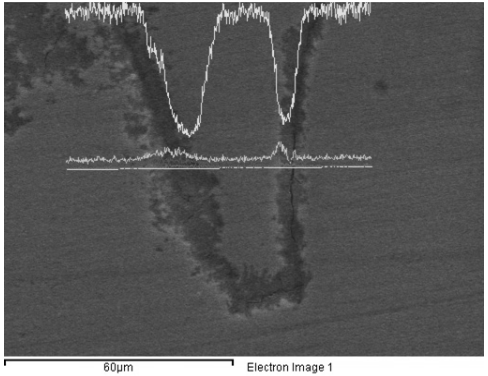
Superficie lucidata

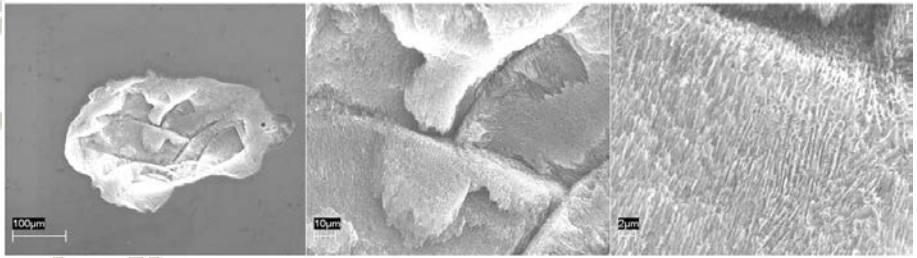


Cabrini, M., Lorenzi Sergio, S., Pastore, T., Pellegrini, S., Pavese, M., Fino, P., . . . Manfredi, D. (2016). Corrosion resistance of direct metal laser sintering AlSiMg alloy. *SURFACE AND INTERFACE ANALYSIS*, *48*, 818-826.

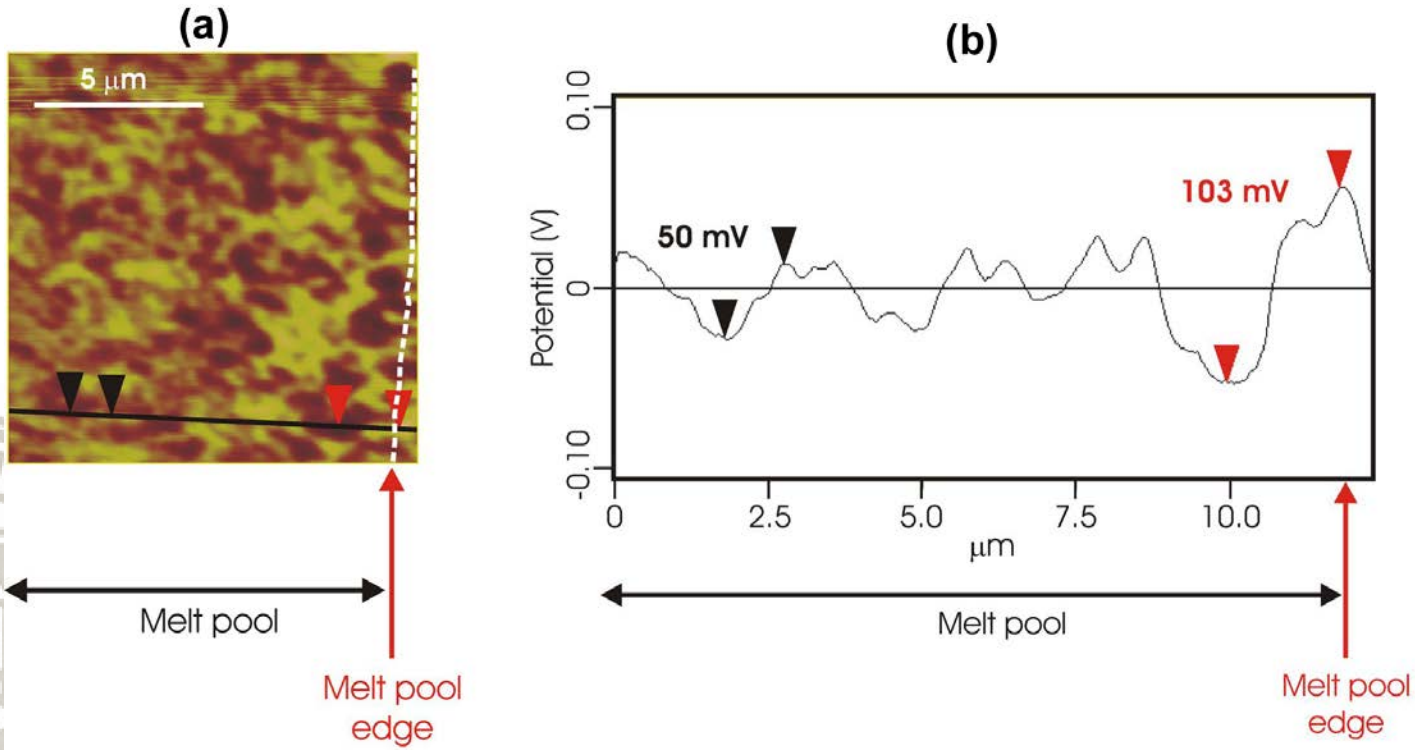
Corrosione selettivca dell’α-Al e dissoluzione preferenziale del bordo del pozzetto di fusione





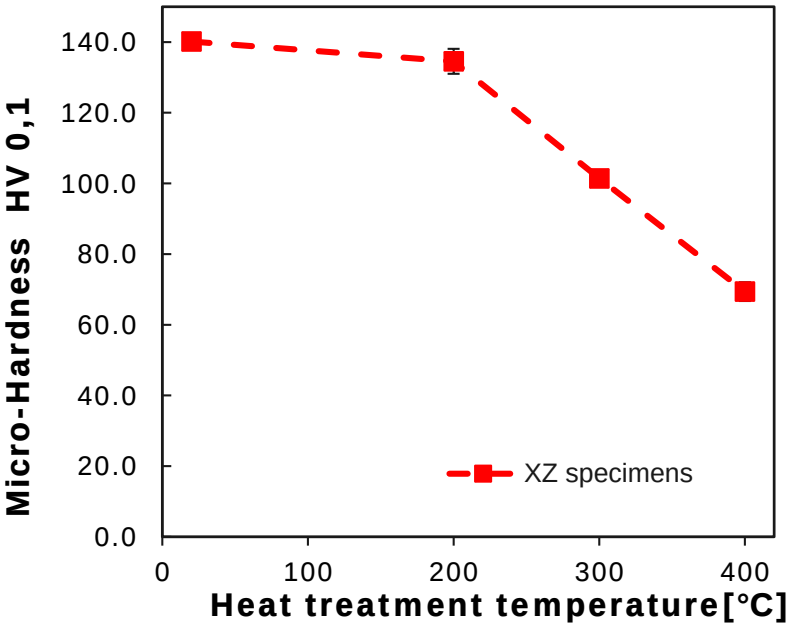


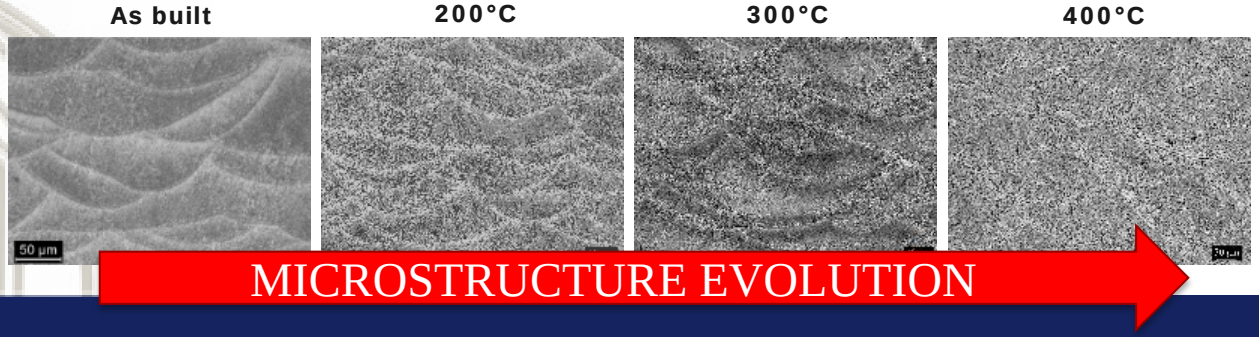
SKPFM XZ-P (by F. Andreatta)



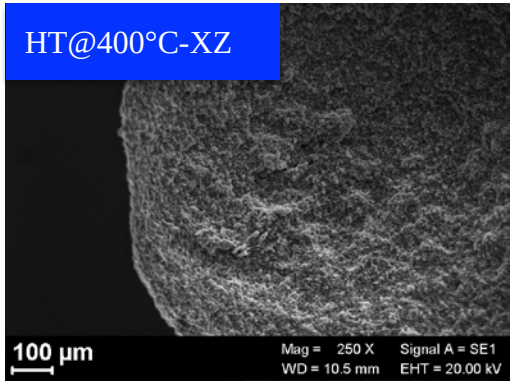
Trattamenti termici post-processing

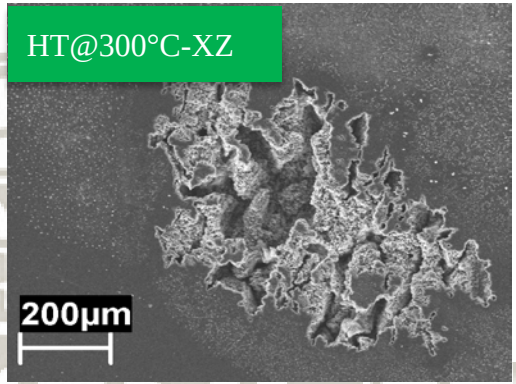
- Rimozione delle tensioni interne
- Temperatura di trattamento termico a 200, 300, 400°C for 2h, and cooling in air
- Eventuali trattamenti T6 (solubilizzazione e invecchiamento artificiale)
- Variazione della microstruttura e delle proprietà meccaniche

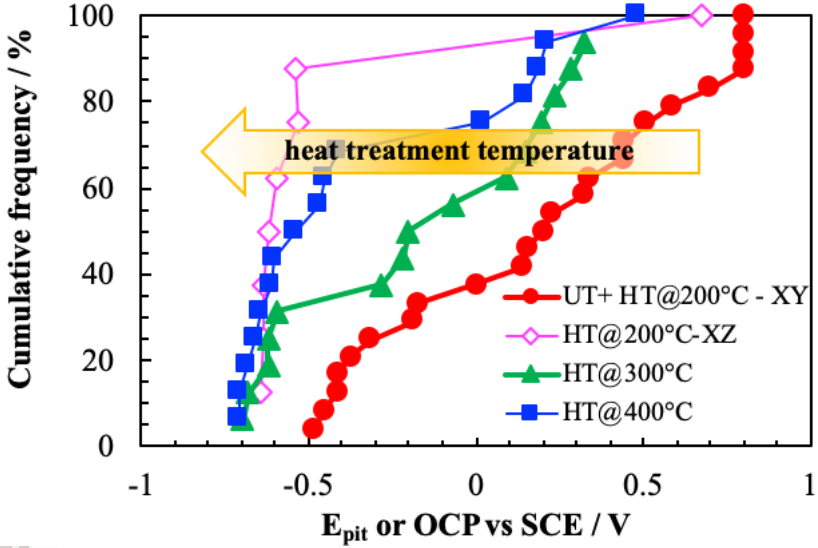


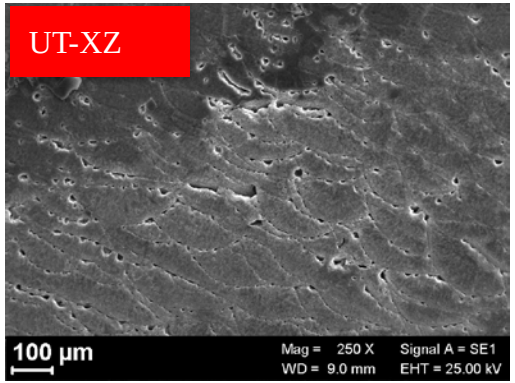


Distribuzione statistica dei potenziali di pitting in funzione del trattamento termico post-processing

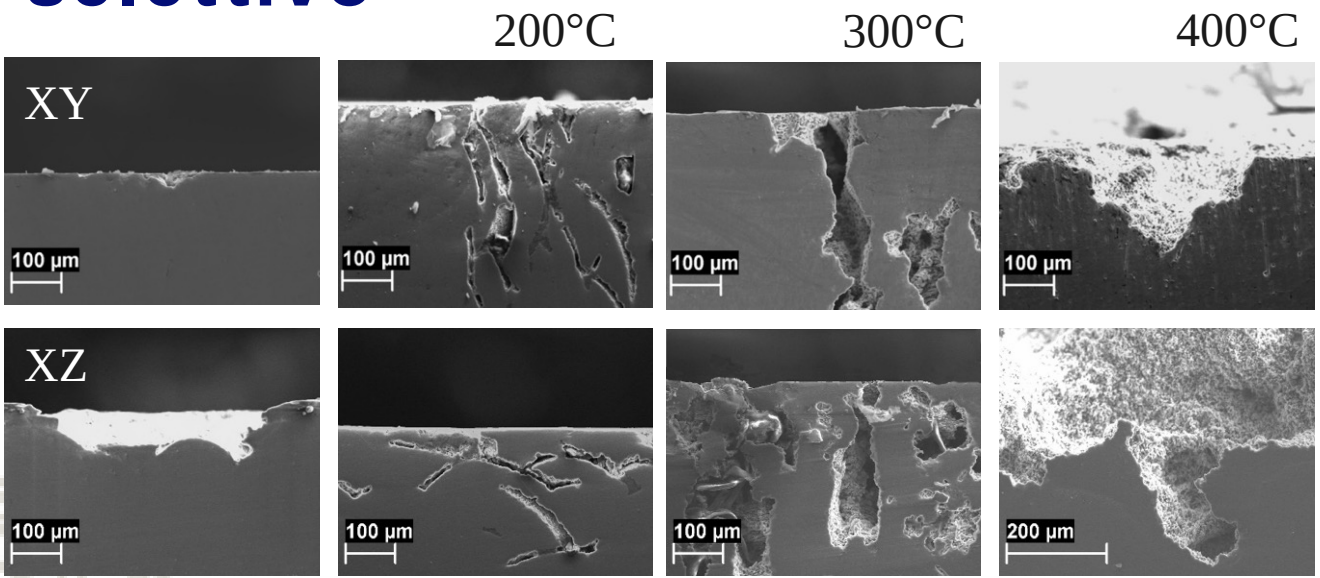








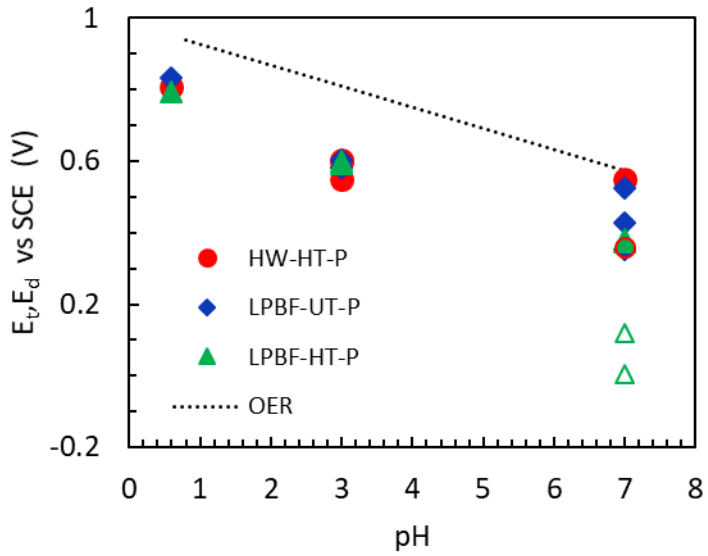
Trattamento termico e attacco selettivo

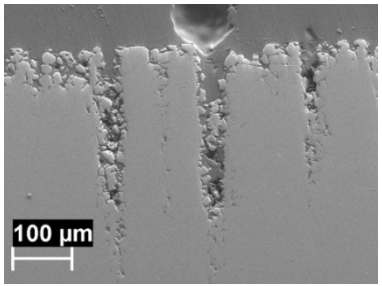


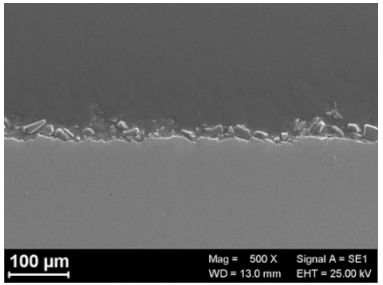
Cabrini, M., Lorenzi, S., Pastore, T., Pellegrini, S., Ambrosio, E., Calignano, F., . . . Fino, P. (2016). Effect of heat treatment on corrosion resistance of DMLS AlSi10Mg alloy. *Electrochimica Acta*, *206*, 346-355.

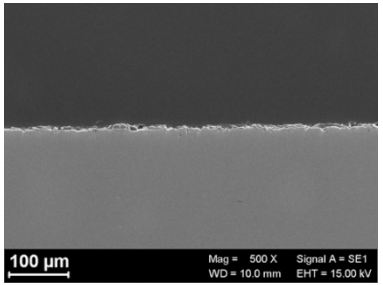
Cabrini et al. Eurocorr 2017 in press

Risultati preliminari sulla lega Inconel

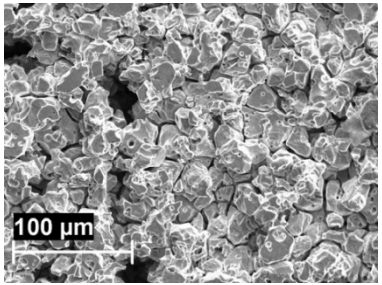


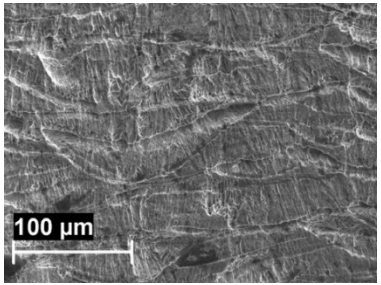


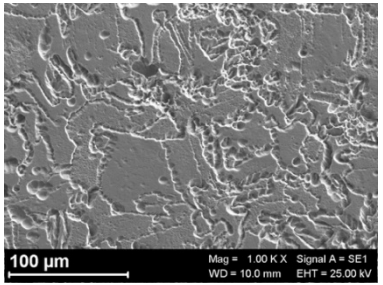




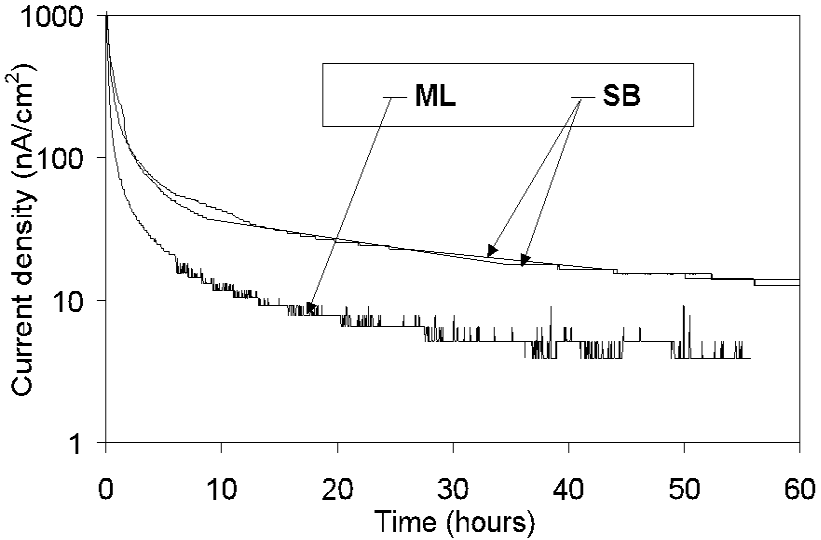
HW-HT LPBF-UT LPBF-HT







Confronto tra densità di corrente della lega Ti6Al4V tradizionale e per LPBF (dati preliminari) in soluzione fisiologica artificiale a 37°C



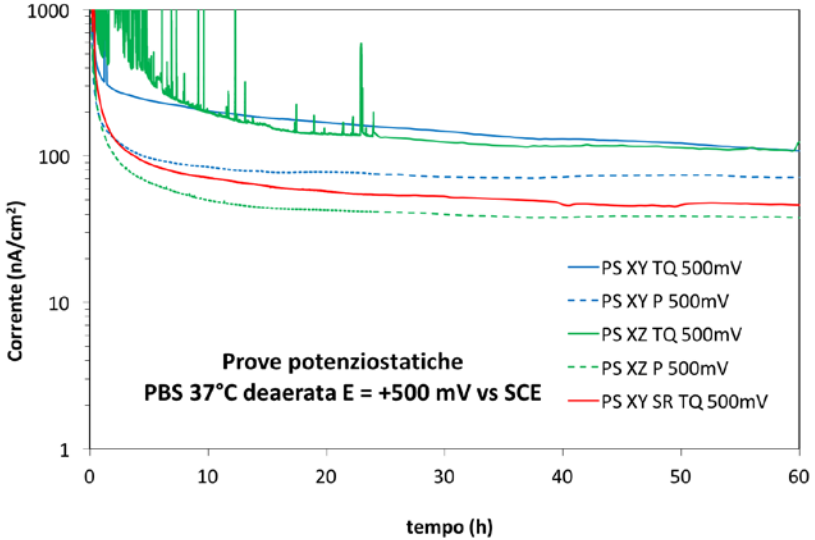


Figure 1: Passivity current of **ML** *and* **SB** *stems*

Cigada A, Cabrini M, Faré S, **Pedeferri P**, Alfonsi S, New Passivation Technique For Titanium Alloys**,** 23th Annual Meeting of the SOCIETY FOR BIOMATERIALS April 30-May 4, 1997, New Orleans, Louisiana, USA

Considerazioni conclusive

- Il comportamento a corrosione delle leghe ottenute per AM è complesso e legato a diversi parametri quali:
  - Porosità
  - Microstruttura
  - Stato superficiale
  - Trattamenti termici post realizzazione
- Richiedono pertanto un accurato studio e la stesura di specifiche di accettazione ad hoc

Grazie per l'attenzione!

marina.cabrini@unibg.it