

# Effetto della densità di energia e della direzione di costruzione sulla microstruttura di campioni in lega Al-Si10-Mg processati per Selective Laser Melting

P. Leo, G. Renna, A. De Luca, N. Soni, R. Nobile, C. Mele, S. Bagheri

In questo studio è stato analizzato l'effetto della densità di energia e della modalità di costruzione sulla qualità di parti in lega Al-Si10-Mg processate per Selective Laser Melting. Parallelepipedo a base rettangolare sono stati processati in direzione verticale (campioni V) e orizzontale (campioni H) cioè, con il loro asse longitudinale rispettivamente parallelo e perpendicolare alla direzione di applicazione del fascio laser.

A parità di parametri di processo, la modalità di costruzione verticale induce un ingrossamento della microstruttura. All'aumentare della densità di energia la microstruttura e proprietà dei campioni V evolvono significativamente mentre le caratteristiche dei campioni H rimangono più simili tra loro. Alla minima densità di energia il campione H esibisce un maggior numero di vuoti a morfologia non circolare. Le differenti microstrutture e difettosità non comportano significative differenze nella risposta a corrosione dei campioni H e V che risulta comunque migliorata dal trattamento superficiale di Ultrasonic Peening (UPT).

**PAROLE CHIAVE:** FUSIONE LASER SELETTIVA, MICROSTRUTTURA, DIFETTOSITÀ, CORROSIONE, TRATTAMENTO DI ULTRASONIC PEENING

## INTRODUZIONE

Le leghe alluminio-silicio (Al-Si), che rappresentano l'85-90% della produzione di getti in alluminio, sono particolarmente apprezzate per la loro elevata colabilità, favorita dalla presenza del silicio [1]. Oggigiorno, la fusione laser selettiva (Selective Laser Melting - SLM) offre un'alternativa innovativa per la produzione di componenti in queste leghe, permettendo di realizzare geometrie complesse e di ottenere proprietà meccaniche superiori. Questo processo impiega un fascio laser ad alta energia per fondere completamente una polvere metallica depositata in strati successivi, all'interno di una camera ad atmosfera controllata. Il metallo fuso solidifica rapidamente, creando la geometria del componente desiderata strato dopo strato [2]. Nonostante i numerosi vantaggi di questa tecnologia, i componenti prodotti

P. Leo, G. Renna, A. De Luca, N. Soni,  
R. Nobile, C. Mele, S. Bagheri  
Università del Salento

via SLM presentano ancora significative limitazioni in termini di finitura superficiale e porosità. Questi fattori compromettono le prestazioni complessive del componente [3-5]. Per ovviare a questi problemi, vengono spesso impiegati trattamenti superficiali post-produzione come ad esempio la sabbatura, pallinatura, elettrolucidatura e Lapping (lucidatura meccanica). Tra i vari trattamenti superficiali post-produzione, la pallinatura ultrasonica (UPT) si configura come una promettente alternativa per migliorare la rugosità superficiale migliorandone pertanto, le proprietà meccaniche e la resistenza alla corrosione [6]. Inoltre, l'orientamento di costruzione nei componenti prodotti con SLM introduce anisotropia ed eterogeneità microstrutturali, influenzando significativamente le proprietà meccaniche. Studi come quello di T. Maconachie et al. [7] analizzano l'effetto dell'orientamento di costruzione (orizzontale, verticale e 45°) sulle proprietà meccaniche di campioni in lega Al-Si10-Mg prodotti con una densità di energia volumetrica (VED) di 54 J/mm<sup>3</sup>. Gli autori osservano una riduzione significativa della duttilità nei campioni costruiti verticalmente, senza cambiamenti rilevanti nella resistenza a snervamento e nella resistenza ultima a trazione. Sebbene la duttilità è fortemente influenzata dall'orientamento di costruzione, la resistenza alla corrosione, essenziale per la vita utile dei componenti, sembra essere meno sensibile a questa variabile. Come riportato da A. Tiwari et al. [8], per le leghe Al-Si10-Mg prodotte con SLM, l'orientamento di costruzione (orizzontale o verticale) ha un effetto trascurabile sulla resistenza alla corrosione, a parità di VED e dimensioni dei campioni.

In questo studio è stato analizzato l'impatto della densità energetica volumetrica e dell'orientamento di costruzione sulla microstruttura e sulla qualità di componenti in lega

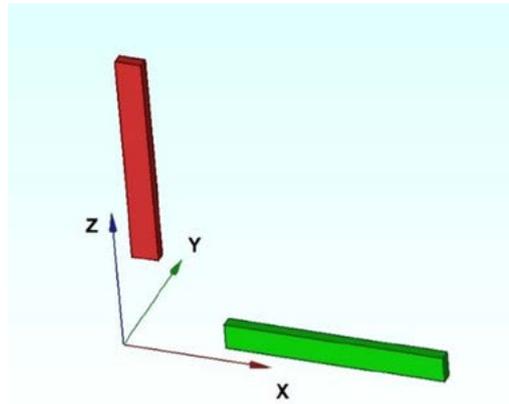
Al-Si10-Mg realizzati tramite Selective Laser Melting (SLM). Sono stati prodotti campioni parallelepipedi (base 50 mm<sup>2</sup>, altezza 100 mm) con due orientamenti: verticale (campioni V) e orizzontale (campioni H), corrispondenti a un allineamento dell'asse longitudinale rispettivamente parallelo e perpendicolare alla direzione del fascio laser. L'analisi microstrutturale è stata condotta utilizzando microscopia ottica e microscopia elettronica a scansione. Mentre la qualità dei componenti è stata valutata mediante analisi di immagini utilizzando il software Image J. Inoltre, al fine di ottimizzare la finitura superficiale e favorire una maggiore resistenza alla corrosione, i campioni prodotti in entrambe le orientazioni (H e V) sono stati trattati con pallinatura a ultrasuoni.

## MATERIALI E METODI

I campioni sono stati prodotti mediante stampa 3D utilizzando il processo di fusione a letto di polvere laser (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) con una macchina Renishaw AM 400. È stata utilizzata una polvere di AlSi10Mg, ottenuta tramite atomizzazione da gas e con una granulometria media di 40 µm, la cui composizione è riportata nella Tabella 1. È stata adottata una strategia di scansione a Meander, e i parametri di processo sono riportati nella Tabella 2. Per ridurre le tensioni residue, la camera di costruzione è stata preriscaldata a 250°C. Tutti i campioni hanno una forma parallelepipeda (5x10x100 mm) ma si differenziano per l'orientamento della sezione di costruzione (XY) rispetto al fascio laser: orizzontale (campioni H) e verticale (campioni V).

**Tab.1** - Composizione (in massa) della polvere AlSi10Mg / Powder Composition ( weight %).

Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Cu	Zn	Pb	Sn	Ni	Al
10.20	0.34	0.17	0.01	0.34	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	bal.



**Fig.1** - Direzione di costruzione per i campioni SLM / Building Mode for SLM parts.

**Tab.2** - Parametri di processo / Process Parameters.

Samples	set power (W)	Exposure time (us)	TOFF ( $\mu$ s)	Point distance ( $\mu$ m)	Hatch distance (mm)	L Thickness (mm)	VED ( $J/mm^3$ )
H/V	250	40	20	90	0.09	0.03	67
H/V	350	40	20	90	0.09	0.03	84

Per valutare le differenze microstrutturali indotte dalle diverse orientazioni di costruzione (H e V), sono state effettuate analisi al microscopio ottico (Nikon Ephiplot 200 OM) ed elettronico a scansione (Zeiss EVO SEM). La durezza Vickers è stata misurata utilizzando uno strumento digitale Affri Wiki 200JS (Affri, Varese, Italia) applicando una forza di 0,5 Kg per un tempo di indentazione di 15 s ( $HV_{0,5/15}$ ).

Per i campioni processati a 250 W e costruiti con orientazione H e V, è stata condotta un'analisi approfondita dei difetti utilizzando microscopia ottica e il software ImageJ. In particolare, sono stati quantificati parametri come numero, distribuzione, morfologia, dimensione media e percentuale di area dei difetti rispetto alla sezione di costruzione.

Per tutti i campioni, la resistenza alla corrosione è stata valutata nella sezione centrale del lato longitudinale (sezione XZ) su un'area di 10 mm<sup>2</sup>. Prima delle misurazioni, la superficie esposta è stata levigata con carta abrasiva in SiC da 2000 grit. Le misure sono state effettuate a temperatura ambiente utilizzando un potenziostato Gamry

Potentiostat 1010E (Gamry Instruments, Warminster, PA, USA) in una soluzione acquosa di NaCl al 3,5%, in condizioni di aerazione naturale. Durante i test è stata adottata una configurazione standard a tre elettrodi: contro elettrodo a rete espansa di grafite, elettrodo di riferimento Ag/AgCl e campioni come elettrodo di lavoro.

Un trattamento di pallinatura ultrasonica (UPT) è stato applicato per 1 minuto sulla superficie longitudinale dei campioni V e H (sezione XZ - 10 mm<sup>2</sup>), allo scopo di migliorare la finitura superficiale. Il trattamento è stato effettuato con un dispositivo Sintes UP 600, utilizzando un punzone di diametro 3 mm e una frequenza di vibrazione di 20 kHz.

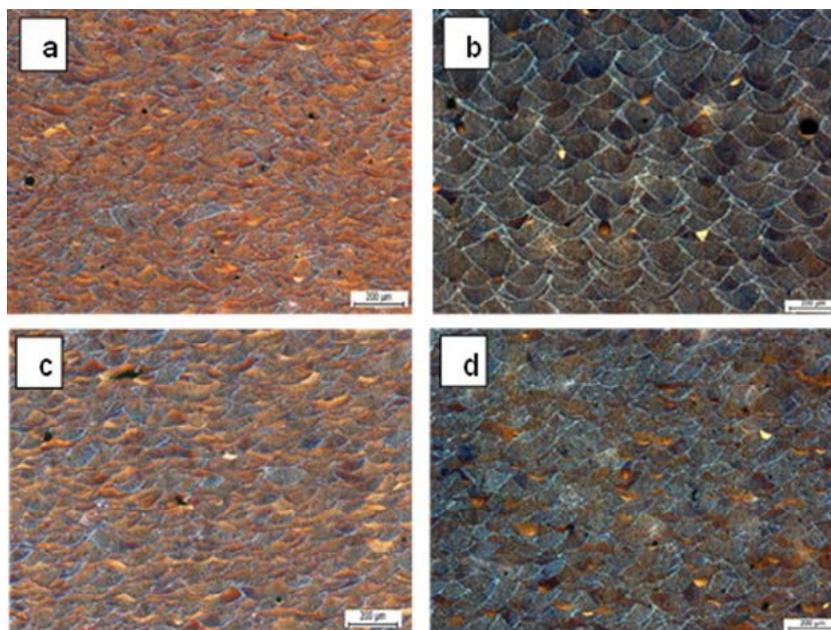
Infine, utilizzando un profilometro Sigmatest D 2,068 Forster e un conduttivimetro MahrSurf PS10, sono state determinate rispettivamente la conducibilità elettrica e la dei rugosità campioni.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

La microstruttura dei campioni H e V, processati alla minima e massima densità energetica, è stata analizzata nella

sezione longitudinale a metà altezza dopo la preparazione metallografica e l'attacco chimico (Fig. 2). È evidente la caratteristica geometria delle pozze fuse, determinata dal meccanismo dominante di trasporto del calore, cioè la conduzione. Inoltre, è anche possibile osservare che nei campioni H, nonostante la notevole differenza nella densità di energia (Fig. 2 c, d), le microstrutture appaiono più simili tra loro mentre, nei campioni V (Fig. 2a, b) si osserva una più significativa differenza. In particolare, nel campione V processato alla massima densità di energia (Fig. 2b) si osserva un significativo aumento delle dimensioni, in

particolare della profondità delle pozze fuse. La differente microstruttura potrebbe essere correlata all'accumulo preferenziale di calore che risulta favorito per i campioni V a causa della minore area di scambio di calore della sezione di costruzione che è pari a 50 mm<sup>2</sup> mentre nei campioni H è pari a 500 mm<sup>2</sup> [9]. Così, sebbene l'incremento della densità di energia sia lo stesso per le differenti direzioni di crescita, l'effetto sulla microstruttura e relative proprietà è particolarmente significativo per i campioni costruiti verticalmente (campioni V).



**Fig.2** - Micrografie ottiche per i campioni V (a,b) e H (c, d) processati a 250 W (a,c) e 350 W (b,d)  
/ Optical micrographs for the V (a,b) and H (c,d) parts processed at 250W (a,c) and 350W (b,d)

Poiché un maggiore accumulo di calore nel substrato favorisce sia un maggiore volume di materiale portato a fusione che una velocità di raffreddamento più contenuta, in accordo ai principi di solidificazione, laddove la pozza fusa esibisce dimensioni maggiori, anche la microstruttura sarà più grossolana e quindi la durezza delle parti processate subirà un decremento. A conferma di quanto sopra, in Tabella 3 sono riportati i valori di microdurezza HV<sub>0,5/15</sub> rilevati nelle sezioni trasversali dei campioni H e V. Si osserva che, all'aumentare della densità di energia la riduzione della durezza è particolarmente significativa per i campioni verticali (V) mentre è più contenuta per gli orizzontali (H), in accordo a quanto osservato dal punto

di vista microstrutturale. Per ulteriore verifica, la conducibilità elettrica è stata valutata a metà altezza nei campioni verticali (V) processati a 250 W e 350 W. I rispettivi valori sono riportati in Tabella 4. Nel campione verticale processato alla massima densità di energia (V-350W), si osserva un leggero incremento della conducibilità elettrica. Questo incremento è attribuibile principalmente alla ridotta sovrassaturazione della matrice e alla microstruttura più grossolana, che facilita il passaggio della corrente elettrica.

**Tab.3** - Microdurezza Vickers per le sezioni trasversali campioni H e V processati a 250W e 350W / Microhardness evaluated for the H and V samples at 250W and 350W.

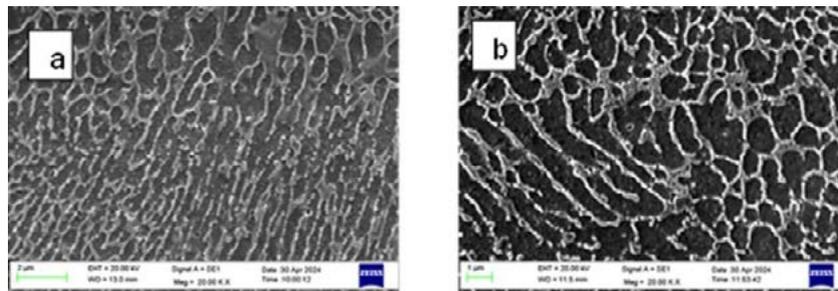
Campioni	HV <sub>0,5/15</sub>
V - 250W	138 ± 3
H - 250W	145 ± 4
V - 350W	126 ± 2
H - 350W	139 ± 4

**Tab.4** - Conducibilità elettrica (60Hz) per i campioni V processati a 250W e Microdurezza 350W / Electrical Conductivity for the V samples at 250W and 350W.

Campioni	Conducibilità media [ $\mu\text{S}\cdot\text{m}$ ]
V - 250W	19,7 ± 0,1
V - 350W	21,1 ± 0,1

La microstruttura dei campioni orizzontali e verticali processati a 250W è stata inoltre caratterizzata mediante microscopia elettronica a scansione (Fig. 3). È possibile

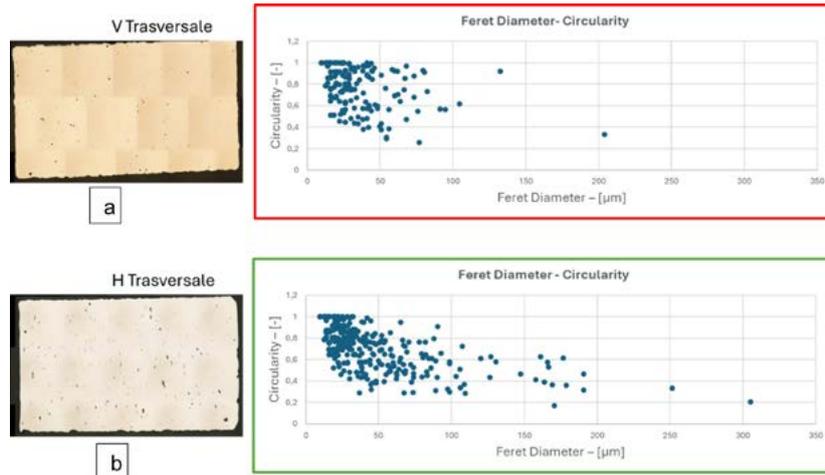
osservare che in prossimità della zona di rifusione la microstruttura appare a grani equiassici, mentre all'interno delle pozze le dendriti assumono morfologia allungata.



**Fig.3** - Micrografie SEM per i campioni H (a) e V (b) processati a 250W. / SEM micrographs for the H(a) and V (b) parts processed at 250W.

Inoltre, dall'analisi al SEM il campione costruito verticalmente (V) sembrerebbe caratterizzato da una microstruttura più grossolana (Fig. 3b), compatibile con il maggior accumulo di calore che caratterizza le sezioni ad area ridotta a parità di densità di energia. Tuttavia, i valori di microdurezza in Tabella 3 evidenziano come i valori di microdurezza dei campioni H e V a 250 W siano molto simili. Tali valori potrebbero essere influenzati quindi da altri fattori, quali la difettosità. Per tale ragione l'analisi dei vuoti è stata effettuata mediante software Image J nelle sezioni trasversali a metà altezza dei campioni H e V. Il risultato della caratterizzazione dei vuoti ha fatto emergere interessanti caratteristiche come

risulta dalla Figura 4 e dalla Tabella 5. La percentuale e numerosità dei vuoti è molto superiore nel campione H (Tabella 5). Inoltre, dalle distribuzioni dei vuoti in Fig. 4 si rivelava che il campione H esibisce vuoti di dimensioni maggiori e a bassa circolarità riconducibili a vuoti da mancata fusione (Fig. 4b). Tale risultato è correlabile a un accumulo di calore favorito nel campione V, a parità di densità di energia. Inoltre, spiegherebbe anche i valori di durezza confrontabili per i campioni V e H, nonostante la microstruttura più fine rilevata per il campione H, a causa della maggiore occorrenza di difettosità nel campione costruito orizzontalmente (0,6% per campione H Vs 0,2% per il campione V).



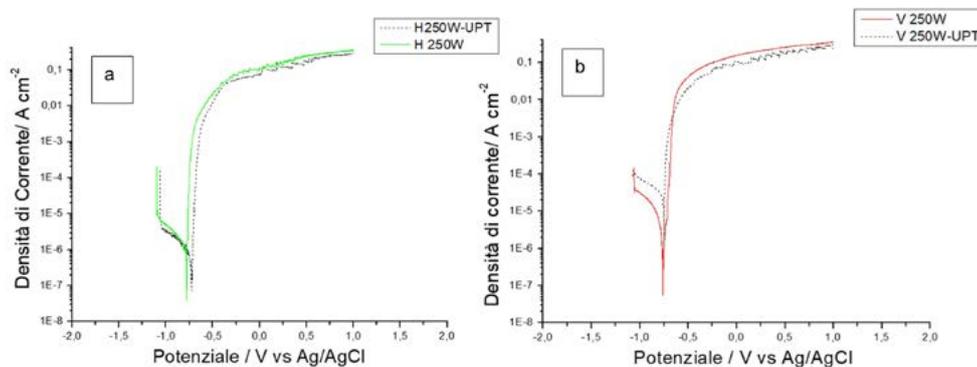
**Fig.4** - Distribuzione dei vuoti nelle sezioni trasversali del campione V (a) e H (b) processati 250W / Voids distributions for the H(b) and V (a) parts processed at 25.

**Tab.5** - Percentuale di area dei vuoti e densità dei vuoti per i campioni processati a 250W / Area voids (percentage) and voids density for H and V samples processed at 250W.

Campioni	Vuoti [%]	Densità dei vuoti [N°vuoti/ $\mu\text{m}^2$ ]
V Trasversale	0,2	5,996E-06
H Trasversale	0,6	1,139E-05

Il comportamento a corrosione (Figura 5) non rileva significative differenze per i campioni H e V, in accordo a quanto riportato in letteratura [8]. Per entrambi i campioni, l'applicazione del trattamento superficiale di UPT, determina solo una leggera riduzione della corrente di corrosione. L'ottimizzazione dei parametri del trattamento superficiale potrebbe ulteriormente migliorare la risposta

a corrosione dei campioni processati via Selective Laser Melting. Le ragioni di tale miglioramento sono in genere imputate a riduzione di rugosità, ad un affinamento della microstruttura e all'introduzione di tensioni residue di compressione. Successivi studi interesseranno la verifica di tali effetti e l'ottimizzazione dei parametri di processo del trattamento superficiale.



**Fig.5** - Curve potenziodinamiche per le sezioni longitudinali del campione H (a) e V(b) processati 250W prima e dopo l'applicazione del trattamento superficiale / Potentiodynamic curves for H(a) and V (b) parts processed at 250.

## CONCLUSIONI

Di seguito le principali conclusioni raggiunte in questo studio sull' effetto della densità di energia e della direzione di costruzione sulla microstruttura di campioni in lega Al-Si10-Mg processati via Selective Laser Melting:

- 1) Incrementando la densità di energia volumetrica da 67 J/mm<sup>3</sup> a 84 J/mm<sup>3</sup> si osservano modifiche significative nella microstruttura e proprietà dei campioni verticali mentre per i campioni orizzontali la microstruttura e proprietà rimangono più confrontabili.
- 2) Parità di densità di energia (67 J/mm<sup>3</sup>) la microstruttura del campione verticale risulta più grossolana rispetto a quello del campione orizzontale. Mentre i valori di durezza per i due campioni non differiscono significativamente.
- 3) A parità di densità di energia, nei campioni processati a 250W si osserva la massima occorrenza di vuoti per il campione H. In particolare nel campione H si osserva una maggior incidenza di vuoti di mancata fusione. Tale maggiore numerosità e dimensione media dei difetti nel campione orizzontale spiegherebbe i valori di durezza confrontabili per i campioni H e V nonostante la microstruttura più fine rilevata nel campione oriz-

zontale.

Le precedenti conclusioni sono correlabili ad un accumulo preferenziale di calore per i campioni verticali a causa della minore area di scambio della sezione di costruzione, Come conseguenza si osserva una minore incidenza dei vuoti da mancata fusione e una microstruttura più grossolana e caratterizzata da minore durezza.

- 4) La resistenza a corrosione non varia in maniera significativa in relazione alla direzione di crescita
- 5) Il trattamento superficiale UPT si è rivelato efficace nel ridurre la corrente di corrosione per entrambe le direzioni di costruzione dei campioni processati alla minima densità di energia. L'ottimizzazione dei parametri di processo per l'UPT potrebbe indurre ulteriori miglioramenti nella risposta a corrosione e sarà oggetto di studi futuri.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Smith, W.F. Structure and Properties of Engineering Alloys, 2nd ed.; McGraw-Hill: London, UK, 1993; pp. 218–223.V.
- [2] J. Zhang, B. Song, Q. Wei, D. Bourell, Y. Shi, A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends, *Journal of Materials Science & Technology* 35 (2019) 270–284.
- [3] I. Maskery, N.T. Aboulkhair, M.R. Corfield, C. Tuck, A.T. Clare, R.K. Leach, R.D. Wildman, I.A. Ashcroft, R.J.M. Hague, Quantification and characterisation of porosity in selectively laser melted Al-Si10-Mg using X-ray computed tomography, *Materials Characterization* 111 (2016) 193–204.
- [4] S. Beretta, S.A. Romano, Comparison of fatigue strength sensitivity to defects for materials manufactured by AM or traditional processes, *Int. J. Fatigue* 94 (2017) 178
- [5] Avi Leon, Eli Aghion. Effect of surface roughness on corrosion performance of AlSi10Mg alloy produced by Selective Laser Melting (SLM), *Materials Characterization* 131 (2017) 188–194.
- [6] L. Li, M. Kim, S. Lee, M. Bae, D. Lee Influence of multiple ultrasonic impact treatments on surface roughness and wear performance of SUS301 steel, *Surf. Coat. Technol.* 307 (2016) 517–524
- [7] Tobias Maconachie, Martin Leary, Jianjun Zhang, Alexander Medvedev, Avik Sarker, Dong Ruan, Guoxing Lu, Omar Faruque, Milan Brandt. Effect of build orientation on the quasi-static and dynamic response of SLM AlSi10Mg. *Materials Science and Engineering: A*. Volume 788, 24 June 2020, 139445
- [8] Tiwari, A.; Singh, G.; Jayaganthan, R. Improved Corrosion Resistance Behaviour of AlSi10Mg Alloy due to Selective Laser Melting. *Coatings* 2023, 13, 225.
- [9] G. Mohr, S.J. Altenburg, K. Hilgenberg, Effects of inter layer time and build height on resulting properties of 316L stainless steel processed by laser powder bed fusion, *Addit. Manuf.* 32 (2020), 101080.

# Building modes effect on microstructure and corrosion behavior of Al-Si10-Mg parts processed by Selective Laser Melting

This study investigates the effect of the building modes and surface treatments on the quality of Al-Si10-Mg parts processed by Selective Laser Melting (SLM). The same geometry of the samples was built but the section to be grown (the perpendicular one to the laser beam) has been chosen respectively as the long transversal section (designed as horizontal samples or H) and the short transversal section (designed as Vertical samples or V) of the parts. For the sake of simplicity, we have named the different built samples as Horizontal samples (H) and Vertical samples (V). The different building modes induced a coarser microstructure in the V samples at set process parameters. The microstructural features of the V samples are more sensitive to the increasing of Energy density with respect to the H samples. The corrosion behavior does not differ significant for all the parts. Finally, the UPT surface treatment was found to improve the corrosion resistance of all the parts leading a significant decrease in the corrosion current.

**KEYWORDS:** SELECTIVE LASER MELTING, BUILDING MODE, MICROSTRUCTURE, DEFECTS, CORROSION RESISTANCE, ULTRASONIC PEENING TREATMENT

[TORNA ALL'INDICE >](#)