Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Studio sulle tecnologie di fabbricazione additiva dei metalli con fascio laser

Fabrizia Caiazzo
Vittorio Alfieri

Report RdS/PTR(2021)/231

STUDIO SULLE TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE ADDITIVA DEI METALLI CON FASCIO LASER

Fabrizia Caiazzo e Vittorio Alfieri
Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Salerno

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità
Obiettivo: *Tecnologie*
Progetto: Materiali di frontiera per usi energetici
Work package: WP3 "Sviluppo dei materiali per Additive Manufacturing, per la produzione di componenti metallici in sostituzione dei prodotti di fonderia"
Linea di attività: LA 3.20 Realizzazione del dimostratore
Responsabile del Progetto: Ing. Daniele Mirabile Gattia
Responsabile del Work package: Ing. Daniele Mirabile Gattia

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Studio e realizzazione mediante Additive Manufacturing di componenti per il miglioramento dell'efficienza energetica dei sistemi elettrici"
Responsabile scientifico ENEA: Ing. Daniele Mirabile Gattia
Responsabile scientifico Università degli Studi di Salerno : Prof.ssa Fabrizia Caiazzo

Indice

SOMMARIO 4
1 INTRODUZIONE 5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI 5
2.1 ANALISI DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE 5
2.2 ANALISI DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE 16
2.3 RISULTATI MODELLISTICI E DISCUSSIONI 25
2.4 STAMPA DEI DIMOSTRATORI 31
3 CONCLUSIONI 35

Sommario

Nel periodo in oggetto, il gruppo di ricerca TESEO ha proseguito lo studio sull'effetto che i fattori di processo esercitano sulle caratteristiche meccaniche e fisiche dei componenti ottenuti per fabbricazione additiva. In particolare, dopo aver misurato le variabili di risposta d'interesse industriale, condivise nei report precedenti, si è proceduto all'elaborazione dei dati al fine di stilare la mappa di processo. Con riferimento alle grandezze normalizzate, sono stati elaborati i modelli di Gibson-Ashby per la correlazione fra le proprietà meccaniche e la densità frazionaria risultante.

Si è proceduto poi alla stampa dei dimostratori, in forma di scambiatori di calore miniaturizzati al fine di sfruttare le potenzialità della tecnica additiva: sono state identificate e confrontate varie soluzioni, intervenendo sui condotti del fluido e sulle alette di raffreddamento. Attraverso lo studio si è dimostrato come la tecnologia di fabbricazione additiva a letto di polvere con fascio laser consenta valide applicazioni per l'efficientamento energetico.

1 Introduzione

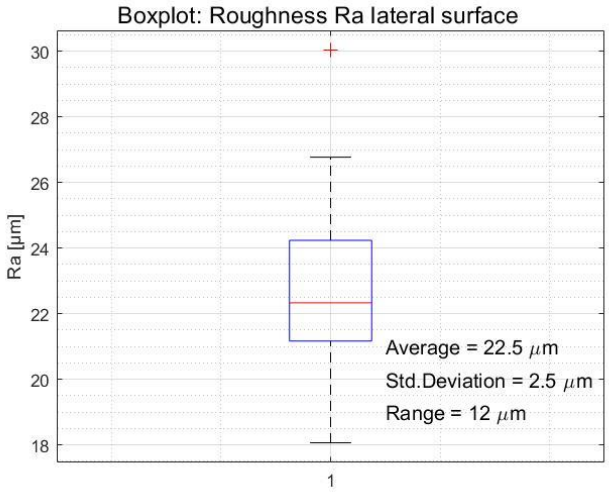
Nel periodo in oggetto, il gruppo di ricerca TESEO ha proseguito lo studio sull'effetto che i fattori di processo esercitano sulle caratteristiche meccaniche e fisiche dei componenti ottenuti per fabbricazione additiva. Le variabili di risposta d'interesse industriale sono state individuate, discusse e classificate nel corso delle attività rendicontate precedentemente; in particolare, i valori misurati sono stati condivisi nel report inerente all'annualità 2020. Infine, si è mostrato come l'opportuna riprogettazione e l'adozione di forme suggerite dall'ottimizzazione topologica consenta il ricorso alla fabbricazione additiva a letto di polvere quale tecnologia vincente per l'efficientamento energetico.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

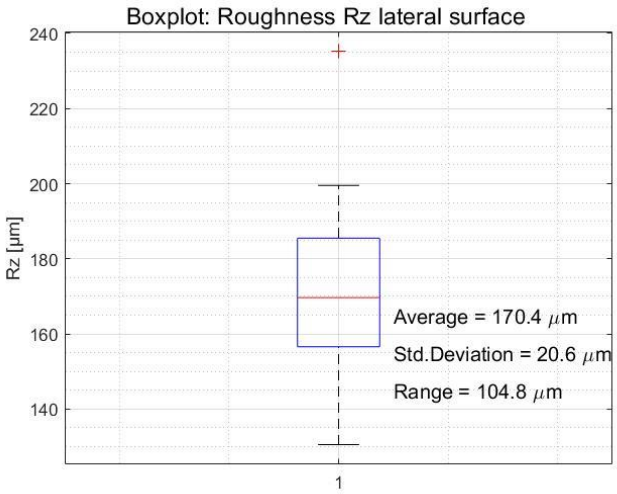
2.1 Analisi della rugosità superficiale

È interessante l'analisi di questa tipologia di risposta, ovvero la rugosità superficiale rilevata sulla superfice laterale del solido, per capire come essa si adatti alle variazioni dei fattori di processo e quali fenomeni potrebbero essere coinvolti. L'analisi coinvolge entrambe le tipologie di misura, media aritmetica rispetto alla superficie media e in modalità picco-valle, *peak to valley*.

La distribuzione dei dati schematizzata descrittivamente in *box plot* (con coefficiente di variazione 0.12) presenta un solo dato anomalo nella rappresentazione inerente alla rugosità media aritmetica; chiaramente, l'anomalia si ripresenta nell'analisi eseguita nei termini della media picco-valle.



Boxplot dei valori della risposta Ra superficie laterale



Boxplot dei valori della risposta Rz superficie laterale

Il test di adattamento alla distribuzione normale a due parametri, media e deviazione standard della popolazione, si applica tramite la suddivisione in sei classi. I gradi di libertà della χ^2 di riferimento risultano ancora pari a 3, con livello di significatività α = 0.95:

Test di bontà di adattamento alla distribuzione normale risposta rugosità superficie laterale: valori statistici e valori di riferimento

Roughness lateral surface	**χ^2**	
Response	**Stat**	**Ref**
Ra	0.07	7.81
Rz	0.12	7.81

L'asserzione di normalità per entrambe le popolazioni sorgenti è ampiamente sostenuta. Lo studio si sposta quindi adesso verso i singoli fattori, con l'obiettivo di capire i legami partendo dal fattore di processo potenza laser:

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Power

Processing parameter	**Roughness Ra lateral surface**		**Roughness Rz lateral surface**	
Power [W]	**Average [µm]**	**Std. Dev. [µm]**	**Average [µm]**	**Std. Dev. [µm]**
150	21.2	2.2	160.4	19.5
175	22.8	2.2	171.5	18.1
195	23.3	2.7	176.9	22.3

C'è una differenziazione tra le medie afferenti ai tre gruppi di livello ma associata a indici di dispersione non trascurabili (coefficiente di variazione *cv* pari a circa 0.11), la prima indicazione è di proporzionalità diretta tra fattore di processo e risposta. Altre informazioni provengono dal fattore spessore di stesura:

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Thickness

Processing parameter	Roughness Ra lateral surface		Roughness Rz lateral surface	
Thickness [µm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]
20	20.6	2.0	155.1	16.7
30	22.4	1.3	170.1	11.3
40	25.1	1.9	190.7	17.6

il delta fra i valori è più evidente, con relativa dispersione dei dati meno accentuata (*cv* tra 0.06-0.10). L'aumento dello spessore di stesura fa osservare la crescita delle medie di rugosità in entrambe le modalità, infatti non si manifestano contraddizioni fra i due andamenti. Suddividendo per il parametro velocità di avanzamento:

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Speed

Processing parameter	Roughness Ra lateral surface		Roughness Rz lateral surface	
Speed [mm/s]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]
900	22.9	2.6	174.3	23.2
1200	22.7	2.5	170.8	18.8
1600	21.5	2.5	163.2	19.5

La divisione in classi per velocità di avanzamento indica proporzionalità inversa fra fattore e risposta ma con variabilità dei dati stimata dal coefficiente di variazione *cv* di 0.12 circa, maggiore del fattore precedente. Il parametro *Hatch* che varia soltanto su due livelli risulta il meno determinante per la rugosità della facciata laterale:

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Hatch

Processing parameter	Roughness Ra lateral surface		Roughness Rz lateral surface	
Hatch [mm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]
0.06	21.7	1.9	169.3	23.5
0.09	21.9	1.8	171.7	17.1

La differenza fra le medie è sottile, e lo studio prosegue costruendo i test di correlazione fra parametri di processo e risposte utilizzando la statistica chi-quadro.

Risultati dei test di correlazione risposta rugosità superficie laterale

Roughness lateral surface	Ra		Rz	
Processing parameter	χ^2-Stat	χ^2-Ref	χ^2-Stat	χ^2-Ref
Power	4.07	9.49	3.55	9.49
Thickness	29.67	9.49	29.13	9.49
Speed	3.20	9.49	2.31	9.49
Hatch	0.62	5.99	0.42	5.99

Il test individua proprio nello spessore il fattore di gran lunga più influente sulla rugosità della facciata laterale dei provini.

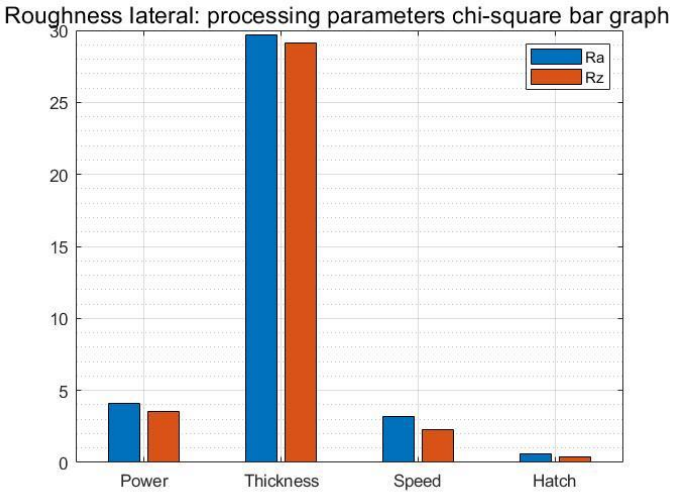
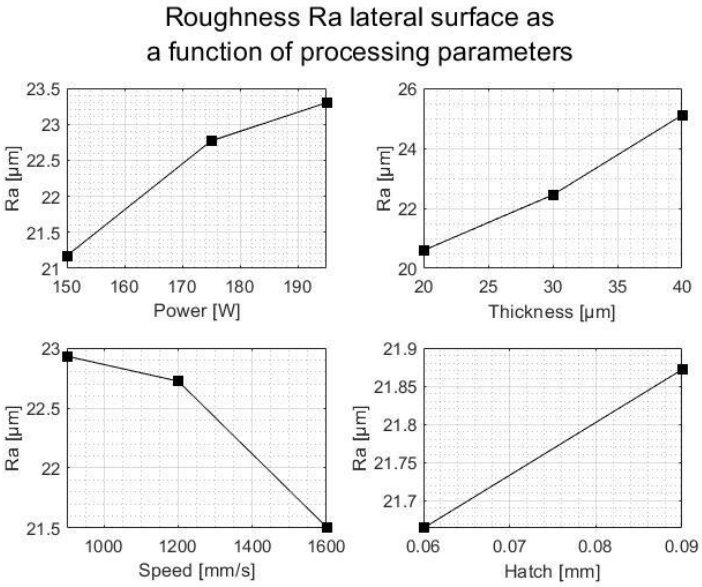
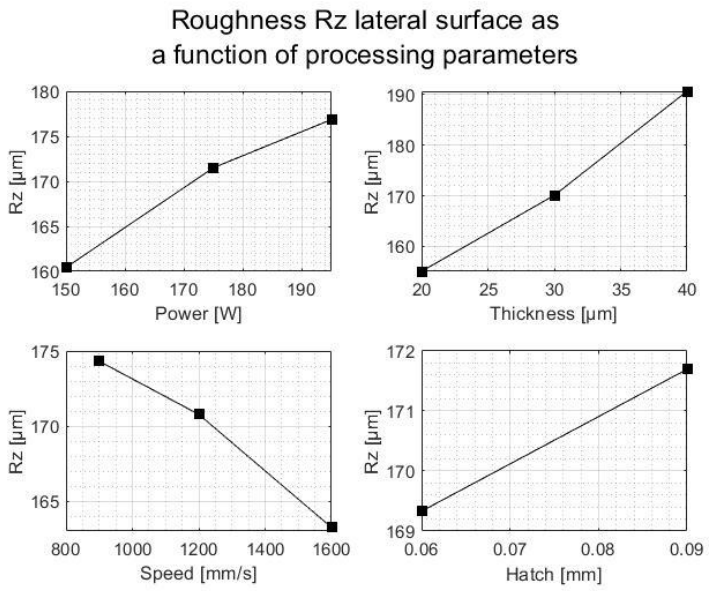


Diagramma a barre test χ^2

La rappresentazione grafica per la media aritmetica della rugosità *Ra* e per i valori delle altezze picco-valle *Rz* conferma l'analisi del passo precedente in quanto gli andamenti delle due modalità sono perfettamente coerenti.



Grafici dei valori medi della risposta rugosità Ra superficie laterale in funzione dei parametri di processo



Grafici dei valori medi della risposta rugosità Rz superficie laterale in funzione dei parametri di processo

Il modello basato sui metodi di approssimazione, sviluppato per *Ra*, mediante regressione multipla considera fortemente l'influenza principale dello spessore di stesura della polvere con l'equazione:

$$Ra = B_1\, Thickness^3 + B_2\, Thickness^2 + B_3\, Thickness + B_4 \frac{Power}{Speed}$$

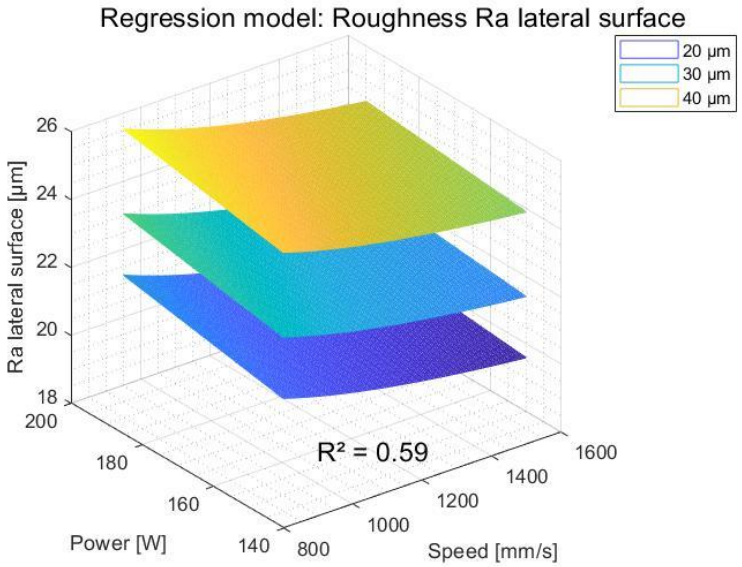
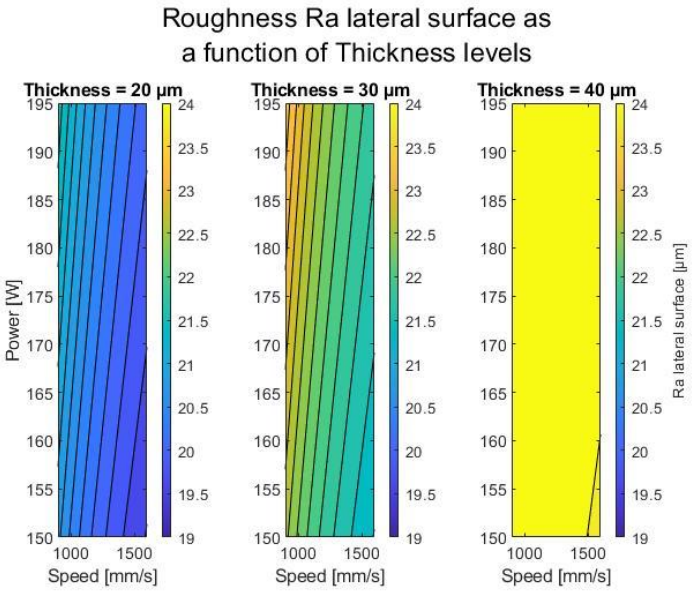


Grafico dell'analisi di regressione della risposta rugosità Ra superficie laterale



Curve di livello della risposta rugosità Ra superficie laterale

L'ultimo termine dell'equazione rappresenta l'indice sintetico input termico. I livelli si riferiscono alle categorie di spessore e sono ben distanziati. La precisione del modello non è elevata, il sistema è caotico. Le mappature rispetto ai valori della risposta evidenziano la forte influenza dello spessore di stesura della polvere. I coefficienti dell'equazione sono indicativi dei livelli di influenza dei termini della modellazione.

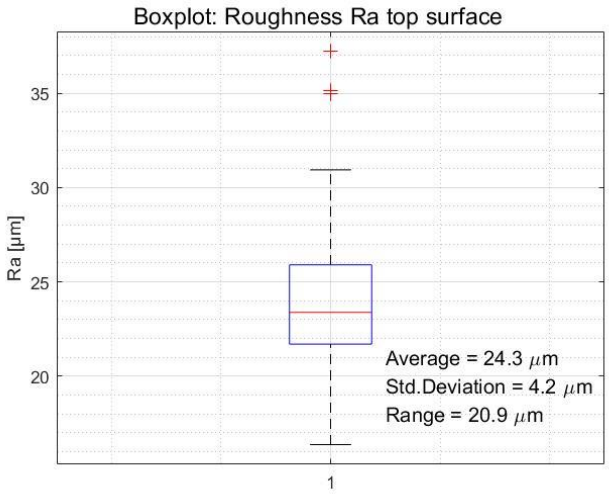
Coefficienti dell'equazione e intervalli di variazione

Roughness lateral surface: regression model			
Coefficients	**value**	**min**	**max**
B_1	1.46	0.65	2.26
B_2	-3.09	-4.39	-1.80
B_3	2.38	1.83	2.93
B_4	0.07	0.01	0.13

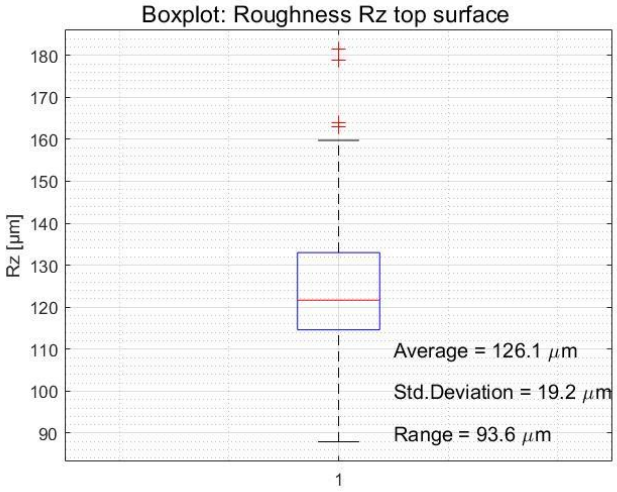
Lo spessore di stesura risulta, con forti evidenze, il fattore determinante sulla qualità superficiale verticale: l'effetto scalino, *staircase effect*, che si amplifica a spessori di stesura più consistenti, giustifica principalmente questo andamento.

La rugosità rilevata sulla faccia superiore dei parallelepipedi, ovvero sulla superficie direttamente esposta al fascio laser, ricopre un ruolo particolare perché influenza l'adesione reciproca fra gli strati. Anche questa risposta in prima fase è analizzata attraverso le due modalità di acquisizione della rugosità, per poi procedere con la rugosità media aritmetica nel caso gli andamenti coincidano.

Nuovamente, la raccolta dei dati è sintetizzata in forma grafica per entrambe le modalità di rugosità, *Ra* e *Rz*. Si visualizzano tre condizioni in *Ra* a cui corrispondono valori anomali o eccedenti, quattro se ne verificano in *Rz*.



Boxplot dei valori della risposta Ra superficie superiore



Boxplot dei valori della risposta Rz superficie superiore

Si è eseguito il test-misura di adattamento delle popolazioni alla distribuzione normale, proseguendo per la strada di Pearson e con l'utilizzo del medesimo livello di significatività 0.95.

Test di bontà di adattamento alla distribuzione normale risposta rugosità superficie superiore: valori statistici e valori di riferimento

Roughness top surface	χ^2	
Response	**Stat**	**Ref**
Ra	0.25	7.81
Rz	0.16	7.81

Le distribuzioni dei valori della risposta, nelle due modalità, sono da ritenersi normali. Il test di normalità consente di adoperare le successive analisi degli andamenti rispetto ai fattori di processo. Il primo in studio è il parametro potenza del fascio laser:

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Power

Processing parameter	Roughness Ra top surface		Roughness Rz top surface	
Power [W]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]
150	23.4	3.3	122.6	15.3
175	24.5	4.2	125.8	17.8
195	24.8	5.1	129.0	23.8

È confermata la tendenza osservata nell'analisi della faccia laterale ma con dispersione maggiore, la deviazione standard si attesta stabilmente sopra 3 µm (*cv* circa 0.20), senza contraddizione fra andamenti di *Ra* e *Rz*. Il secondo fattore in discussione è lo spessore *Thickness*:

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Thickness

Processing parameter	Roughness Ra top surface		Roughness Rz top surface	
Thickness [µm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]
20	22.5	3.8	117.3	16.8
30	25.4	4.4	130.7	19.6
40	25.3	4.1	131.9	19.4

La tendenza in funzione del parametro, soprattutto in Ra, non è nettamente definita tra il livello 30 µm e il livello 40 µm, mentre l'indicazione che si può sottolineare è quella di un peggioramento della qualità superficiale all'accrescimento dello strato di stesura della polvere, dopo i 20 µm. Il terzo fattore di processo in studio è la velocità di avanzamento:

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Speed

Processing parameter	Roughness Ra lateral surface		Roughness Rz lateral surface	
Speed [mm/s]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]
900	26.1	5.7	133.6	24.8
1200	23.9	3.0	125.4	15.3
1600	22.0	1.1	114.9	5.6

Anche per questo fattore la tendenza della variazione della finitura superficiale sulla faccia superiore è in analogia rispetto alla faccia laterale anche se l'osservazione della dispersione dei dati fatta precedentemente è smentita nel terzo livello, quello che afferisce alla velocità di avanzamento più alta, in cui la deviazione standard crolla vistosamente a 1.1 µm. Il parametro *Hatch spacing* è leggermente più influente sulla rugosità laterale, con differenziazione più netta delle medie:

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Hatch

Processing parameter	Roughness Ra lateral surface		Roughness Rz lateral surface	
Hatch [mm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]	Average [µm]	Std. Dev. [µm]
0.06	26.1	4.6	133.9	21.3
0.09	22.0	2.3	115.9	10.1

Indicazioni qualitative derivano dal test chi-quadro per definire il grado di correlazione fra parametri e risposta:

Risultati dei test di correlazione risposta rugosità superficie superiore

Roughness top surface	**Ra**		**Rz**	
Processing parameter	**χ^2-Stat**	**χ^2-Ref**	**χ^2-Stat**	**χ^2-Ref**
Power	1.32	9.49	7.91	9.49
Thickness	7.50	9.49	9.59	9.49
Speed	11.46	9.49	12.22	9.49
Hatch	9.67	5.99	9.58	5.99

La distribuzione delle statistiche chi-quadro tra i fattori denota incertezza maggiore rispetto alla risposta precedente rugosità laterale.

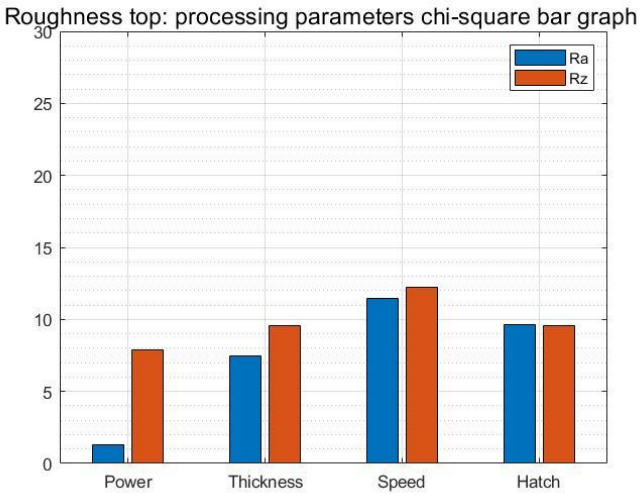
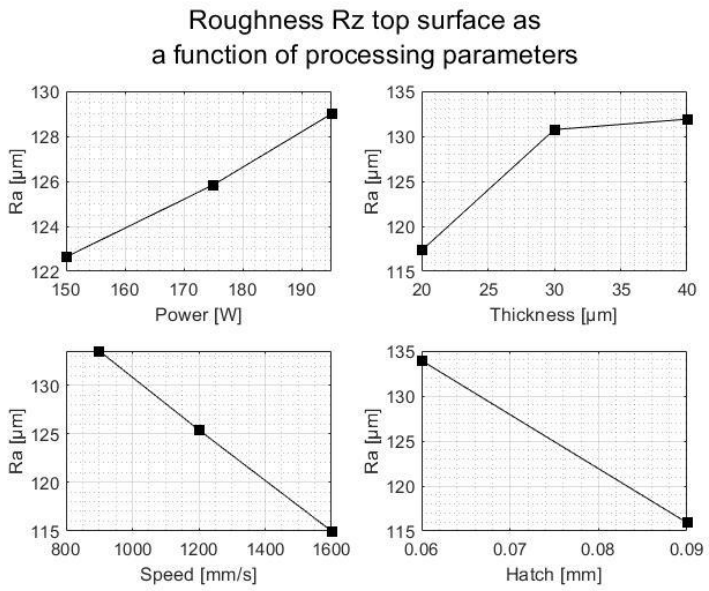
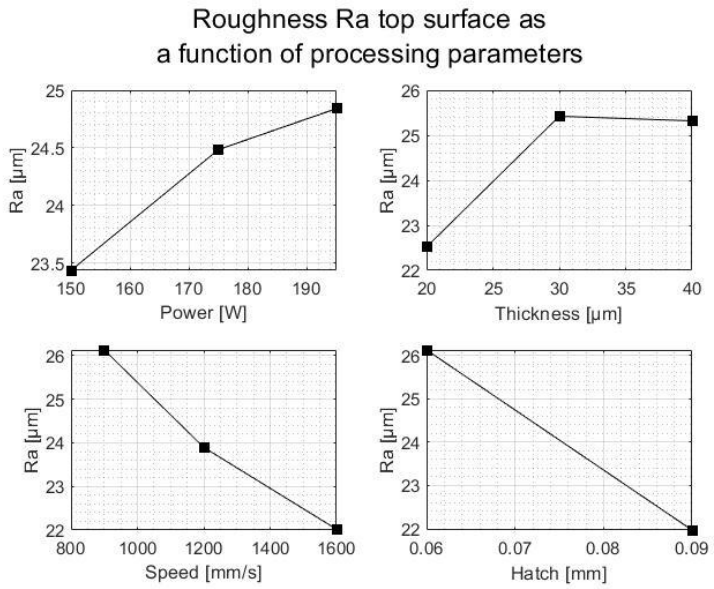


Diagramma a barre test χ^2

Procedendo con l'analisi degli andamenti tipici, si osservano coerenze fra le due modalità di rugosità *Ra* e *Rz*. È lecito dunque proseguire l'analisi, ritenendo che la sola *Ra* fornisca informazioni in modo esaustivo.



Grafici dei valori medi della risposta rugosità Rz superficie superiore in funzione dei parametri di processo



Grafici dei valori medi della risposta rugosità Ra superficie superiore in funzione dei parametri di processo

È stata proposta per la modellazione regressiva un'equazione articolata. La precisione non è soddisfacente e l'incertezza dei coefficienti non è trascurabile, il sistema risulta non integralmente deterministico:

$$Ra = B_1\, Thickness^2 + B_2\, Thickness + B_3\, Speed^2 + B_4\, Speed + B_5\, Power^2 + B_6\, (Thickness \cdot Speed \cdot Hatch)^2 + B_7\, Hatch^2$$

Coefficienti dell'equazione e intervalli di variazione

Roughness top surface: regression model

Coefficients	value	min	max
B_1	-1.09	-1.82	-0.37
B_2	1.69	0.66	2.73
B_3	-0.55	-1.26	0.16
B_4	0.50	-0.52	1.54
B_5	0.18	0.03	0.33
B_6	0.07	-0.35	0.49
B_7	-0.25	-0.40	-0.11

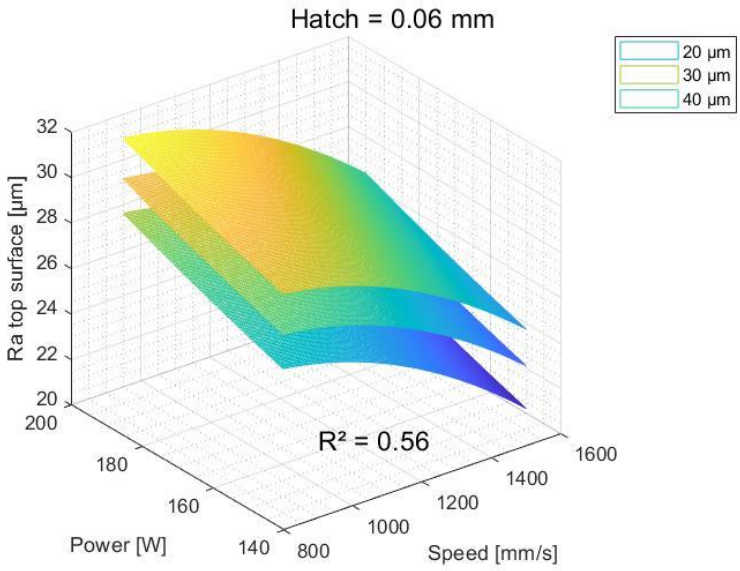
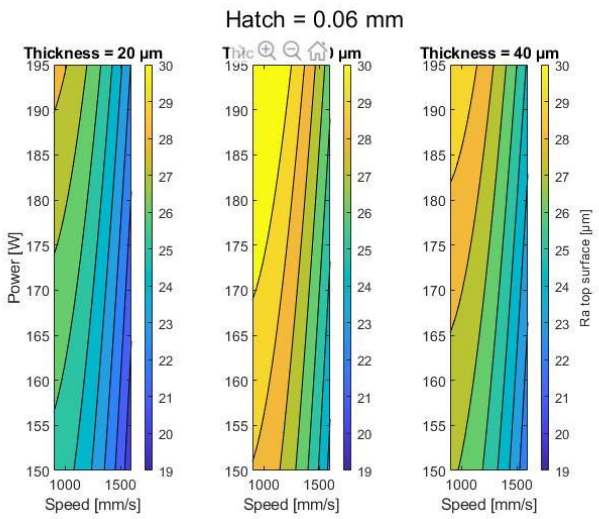


Grafico dell'analisi di regressione della risposta rugosità Ra superficie superiore (Hatch=0.06 mm)



Curve di livello della risposta rugosità Ra superficie superiore (Hatch = 0.09 mm)

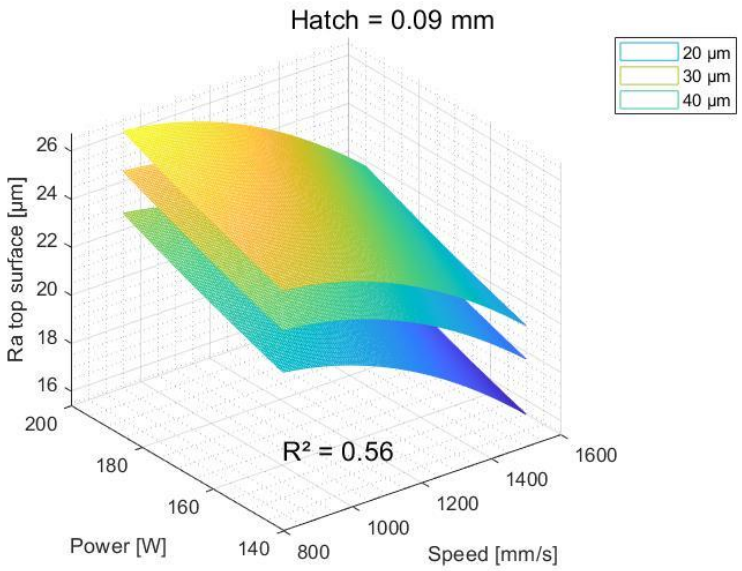
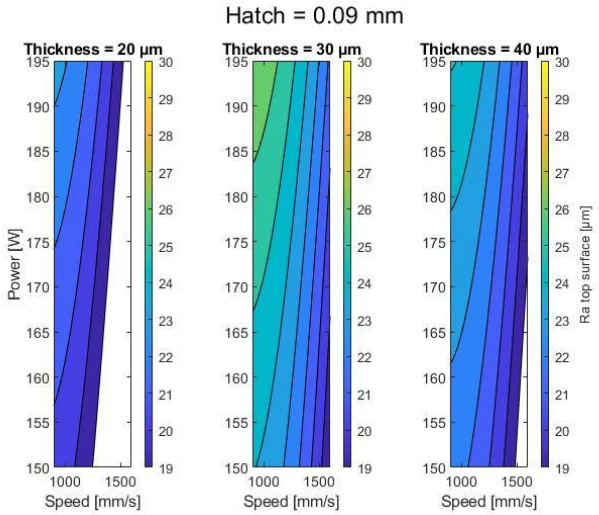


Grafico dell'analisi di regressione della risposta rugosità Ra superficie superiore (Hatch=0.09 mm)



Curve di livello della risposta rugosità Ra superficie superiore (Hatch = 0.09 mm)

Le immagini dimostrano la differenza tra i valori di rugosità raggiunti per i due livelli di Hatch spacing caratteristici. Il violento gradiente termico generato dall'aumento di potenza del fascio, associato a basse velocità, (incremento dell'input termico), favorisce la formazione di superfici micro-ondulatorie, il cui contributo è dato anche dal tempo di permanenza del fascio stesso (funzione della velocità). Lo spessore Thickness incide sulla qualità superficiale perché a parità di tempo di esposizione la fusione completa è favorita al basso livello 20 µm, in cui anche l'espulsione di polvere non fusa all'impatto col fascio è resa più difficoltosa. La decrescita della risposta all'aumentare del fattore *Hatch spacing* (a cui corrisponde minore overlapping) è attribuibile all'effetto ingobbamento, *humping*, dovuto alla diversa tensione superficiale di fluidi a contatto.

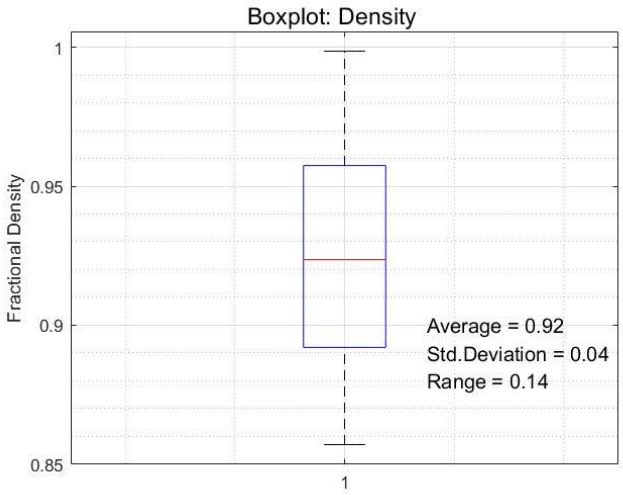
2.2 Analisi delle caratteristiche meccaniche

Dall'osservazione preliminare dei dati sperimentali della risposta critica *Fractional Density*, oltre alle condizioni relative ai provini la cui fabbricazione è stata sospesa, si considerano non idonei altri quattro campioni il cui modulo elastico di compressione risulta inferiore a 0.40 in termini frazionari. Questi dati vengono stralciati dall'analisi, per cui la popolazione della campagna sperimentale viene ridotta a 46 unità, in modo da rafforzarne la significatività statistica anche a rischio di perdite di informazioni. Da una prima considerazione di carattere qualitativo si denota, inoltre, che le condizioni escluse si riferiscono a livelli di energia per unità di volume inferiori a 42 J/mm³.

Condizioni escluse dall'analisi

Sample	VED [J/mm³]	Fractional Compression Modulus
11	41	0.33
23	34	0.31
33	35	0.31
36	39	0.26

Non si osservano valori anomali o estremanti nella popolazione della risposta, il coefficiente di variazione è circa 0.04.



Boxplot dei valori della risposta Density

Il test di adattamento alla distribuzione normale utilizza anche in questa analisi due parametri, media e deviazione standard della popolazione, mentre quest'ultima viene suddivisa in sei classi in funzione proprio dei parametri che definiscono la standardizzazione *Z*. I gradi di libertà risultano pari a tre per cui il valore di riferimento non muta per α = 0.95:

$$\chi^2_{rif} = 7.81$$

$$\chi^2_{stat} = 0.05$$

La popolazione sorgente è pertanto distribuita normalmente, in quanto la chi-quadro rientra abbondantemente nella zona di accettazione dell'ipotesi nulla. Lo studio si indirizza sulla ricerca della

correlazione della risposta rispetto al parametro potenza laser. La popolazione è divisa in gruppi in funzione del livello del fattore.

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Power

Processing parameter	Fractional Density	
Power [W]	**Average**	**Std. Deviation**
150	0.91	0.03
175	0.92	0.04
195	0.94	0.04

Come prima indicazione di indagine si evidenzia l'andamento di proporzionalità diretta fra la potenza del fascio e la densità frazionaria (*cv* circa 0.04). Suddividendo rispetto ai gruppi a spessore costante la differenza fra le medie risulta differenziata in maniera più omogenea (*cv* compreso tra 0.03-0.04), con andamento di proporzionalità inversa tra spessore e risposta.

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Thickness

Processing parameter	Fractional Density	
Thickness [µm]	**Average**	**Std. Deviation**
20	0.95	0.04
30	0.92	0.04
40	0.90	0.03

Il fattore velocità *Speed*, composto al pari da tre livelli, manifesta in prima istanza una differenza più intensa fra le medie delle densità afferenti ai raggruppamenti selezionati (*cv* circa 0.03), e si afferma la tendenza alla diminuzione della frazione di massa volumica al crescere della velocità di avanzamento.

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Speed

Processing parameter	Fractional Density	
Speed [mm/s]	**Average**	**Std. Deviation**
900	0.95	0.03
1200	0.92	0.04
1600	0.89	0.03

La variabile di processo *Hatch spacing*, che varia sempre soltanto su due livelli, possiede il delta fra i valori più piccolo (*cv* circa 0.04). Se si approfondisce lo studio, tramite l'utilizzo del test di Student, la differenza tra medie dei due gruppi può ritenersi nulla al livello di significatività dello 0.70.

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Hatch

Processing parameter	Fractional Density	
Hatch [mm]	**Average**	**Std. Deviation**
0.06	0.93	0.04
0.09	0.92	0.04

L'analisi di correlazione fra le variabili in ingresso e le risposte con utilizzo del riferimento statistico chi-quadro fornisce i seguenti numeri:

Risultati dei test di correlazione risposta Density

Fractional Density	χ^2	
Processing parameter	**Stat**	**Ref**
Power	4.65	9.49
Thickness	13.95	9.49
Speed	12.50	9.49
Hatch	1.22	5.99

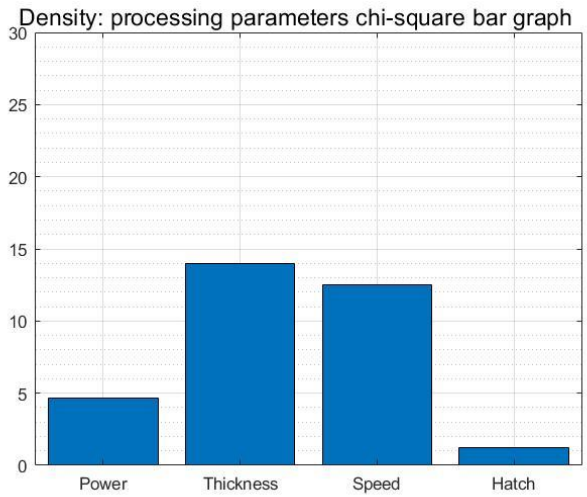
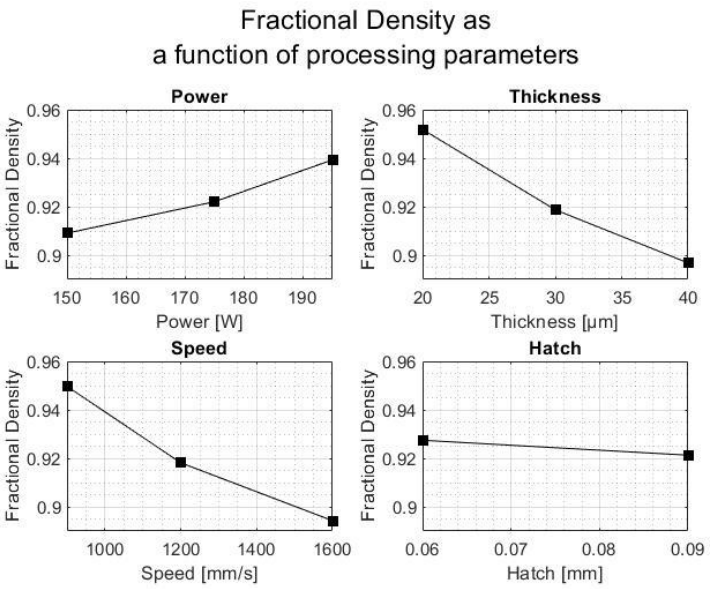


Diagramma a barre del test χ^2

Spessore di stesura e velocità di avanzamento del fascio laser si affermano indicativamente i parametri più influenti sull'output, l'*Hatch spacing* è evidenziato come quello meno incisivo.

I grafici mostrano gli andamenti medi rispetto ai fattori di processo che rappresentano le indicazioni ottenute in precedenza.

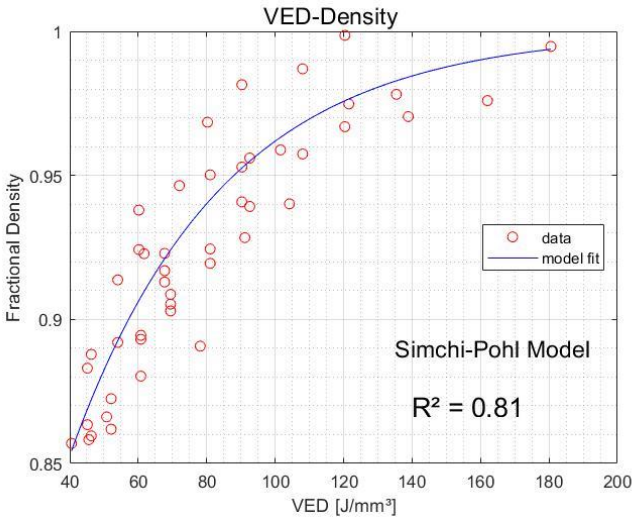


Grafici dei valori medi della risposta Fractional Density in funzione dei parametri di processo

L'ipotesi del forte legame fra la risposta finora trattata, *Density*, e la densità di energia *VED*, trova un riscontro nel modello Simchi-Pohl. Il modello rappresenta una visione semplificata, ma completa, delle dinamiche di processo. La densità frazionaria, che in alcune condizioni sfiora l'unità, messa in relazione con l'energia per unità di volume, fornisce un andamento asintotico i cui parametri dell'equazione sono particolarizzati, mediante algoritmo di ottimizzazione, con i valori :

$$k = 0.02 \quad C = 0.36$$

$$Fractional\ Density = 1 - 0.36\, e^{-0.02\, VED}$$



Relazione densità frazionaria-energia per unità di volume, modello di Simchi-Pohl

Per la modellazione con analisi di regressione si propone un'equazione non lineare:

$$Fractional\ Density = B_1\ Speed^2 + B_2\ Speed + B_3\ Thickness^2 + B_4\ Thickness + B_5\ (Power \cdot Hatch)^2 + B_6\ Power \cdot Hatch + B_7$$

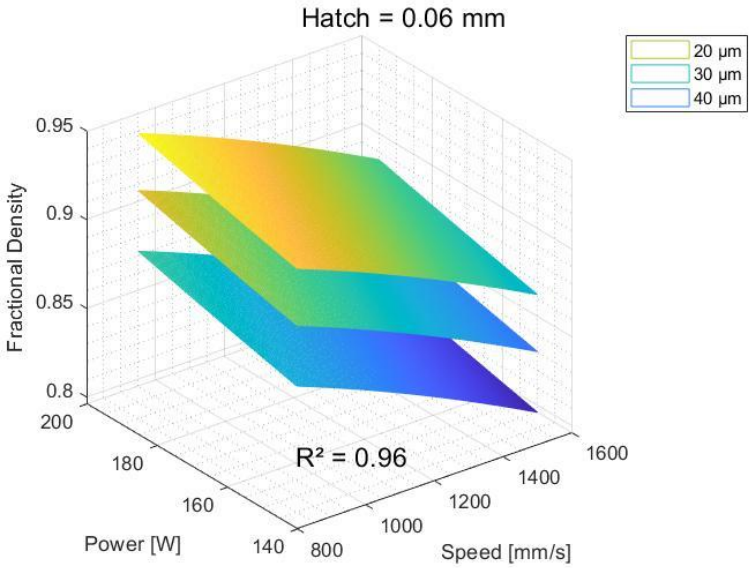
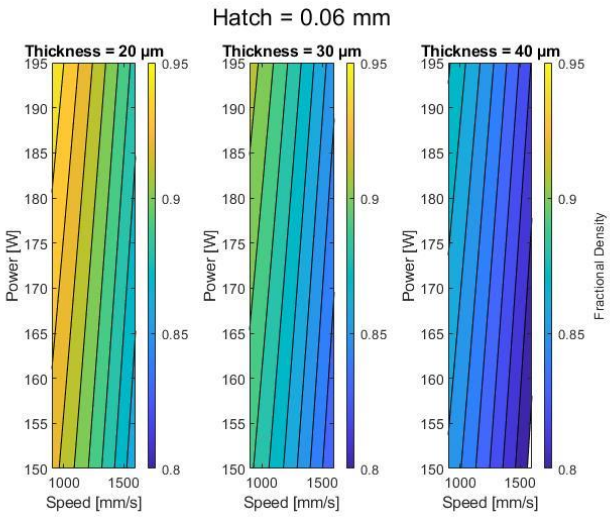


Grafico dell'analisi di regressione della risposta Fractional Density in funzione dei parametri di processo (Hatch = 0.06 mm)



Curve di livello della risposta Fractional Density (Hatch = 0.06 mm)

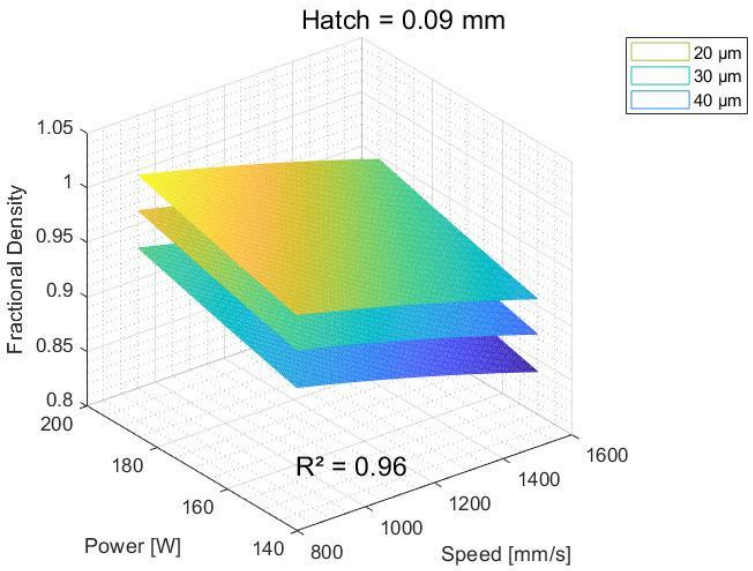
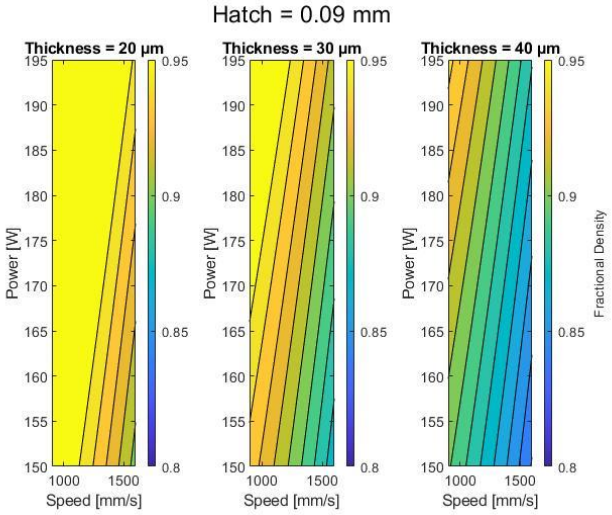


Grafico dell'analisi di regressione della risposta Fractional Density in funzione dei parametri di processo (Hatch = 0.09 mm)



Curve di livello della risposta Fractional Density (Hatch = 0.09 mm)

I grafici sono differenziati in funzione del parametro Hatch e tracciati secondo i livelli del fattore Thickness. Si riportano i coefficienti caratteristici dell'equazione approssimante:

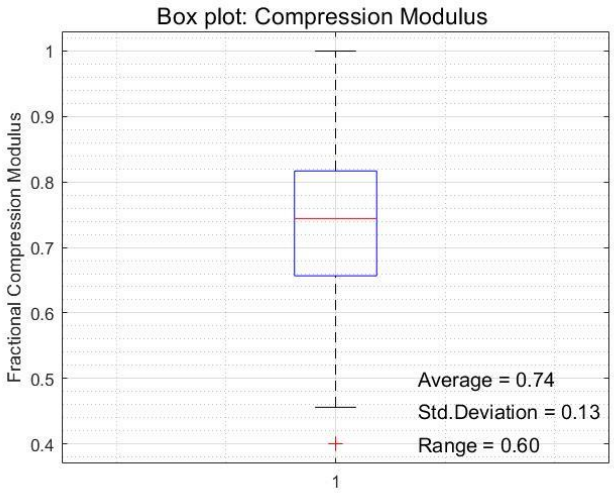
Coefficienti dell'equazione di regressione e intervalli di variazione

Density: regression model						
	Hatch = 0.06 mm			Hatch = 0.09 mm		
Coefficients	**value**	**min**	**max**	**value**	**min**	**max**
B_1	-0.05	-0.21	0.10	0.07	-0.11	0.25
B_2	-0.06	-0.31	0.19	-0.35	-0.63	-0.06

B_3	-0.02	-0.14	0.10	0.09	-0.05	0.22
B_4	-0.11	-0.29	0.07	-0.28	-0.49	-0.08
B_5	0.05	-0.53	0.62	0.05	-0.60	0.71
B_6	0.09	-0.93	1.11	0.14	-1.02	1.31
B_7	0.98	0.51	1.44	1.11	0.57	1.65

I modelli evidenziano il ruolo chiave della densità di energia sulla densità. La potenza irradiante del laser, al crescere della sua intensità, favorisce l'angolo di inclinazione delle goccioline di metallo liquido e l'espulsione di queste. Il tempo necessario per la formazione di fenomeni ordinati, quali emissione di vapore metallico ed espulsione della colonna fluida decresce all'aumentare dell'input termico, quindi l'incremento della velocità non darebbe il tempo necessario all'espletazione completa di tali processi. L'influenza dello spessore di stesura della polvere sulla densità frazionaria è legata anche ai meccanismi che determinano la formazione di pori: al crescere dello strato di polvere aumenta la probabilità di particelle gassose intrappolate che non riescono a fluire in superficie. In aggiunta l'inspessimento del layer condiziona una maggiore resistenza termica per la fusione completa. L'andamento qualitativo in evidenza rispetto alla distanza *Hatch* trova conferma in letteratura si giustifica con gli effetti di overlapping sulla polvere sottoposta al passaggio del fascio laser.

I dati della popolazione sono riportati in rappresentazione modello box plot: l'outlier è relativo alla condizione cinque (*cv* circa 0.17) con dispersione maggiore rispetto alla popolazione della densità frazionaria.



Boxplot dei valori della risposta Compression Modulus

Il test di adattamento della popolazione alla distribuzione normale utilizza due parametri, media aritmetica e deviazione standard, con raggruppamento in sei classi, i *gdl* risultano di conseguenza tre. Si mettono a confronto la χ^2_{rif} di riferimento, relativa ai tre gdl e al livello di significatività α = 0.95, con la χ^2_{stat} estrapolata dai calcoli per mettersi in condizioni di decidere sull'esito del test:

$$\chi^2_{rif} = 7.81$$

$$\chi^2_{stat} = 0.01$$

quindi l'asserzione di normalità della popolazione non è rifiutata a un livello di probabilità pressoché unitario. Si procede con lo studio della correlazione della risposta rispetto al parametro *Power*. La popolazione è divisa in gruppi in funzione del livello del fattore, le prime indicazioni qualitative d'indagine provengono dai valori medi: il modulo elastico cresce all'aumentare della potenza laser (*cv* compreso tra 0.17-0.18).

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Power

Processing parameter	**Fractional Compression Modulus**	
Power [W]	**Average**	**Std. Deviation**
150	0.68	0.12
175	0.75	0.13
195	0.77	0.14

La divisione in classi, rispetto al parametro *Power* e rispetto ai percentili della distribuzione, con tabelle a doppia entrata fornisce uno strumento qualitativo di analisi per l'incidenza della correlazione. I risultati che riguardano tutti i fattori d'input sono raccolti in tabella. Suddividendo rispetto ai gruppi a spessore costante (coincidenti con i job) la differenza fra le medie risulta marcata fra lo spessore 20 µm e gli altri due, formando una sorta di gradino (*cv* tra 0.11-0.20).

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Thickness

Processing parameter	**Fractional Compression Modulus**	
Thickness [µm]	**Average**	**Std. Deviation**
20	0.82	0.13
30	0.69	0.14
40	0.69	0.08

Anche il fattore Speed è composto da tre livelli ma in questo caso le medie della risposta risultano più omogeneamente diversificate: i valori mostrano in prima osservazione una proporzionalità inversa. C'è coerenza di andamenti rispetto all'indice input termico (*cv* tra 0.11-0.24).

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Speed

Processing parameter	**Fractional Compression Modulus**	
Speed [mm/s]	**Average**	**Std. Deviation**
900	0.81	0.09
1200	0.74	0.13
1600	0.63	0.15

La variabile di processo Hatch varia soltanto su due livelli e il delta fra i valori è più sottile (*cv* medio 0.18).

Valori medi della risposta in funzione dei livelli del parametro Hatch

Processing parameter	Fractional Compression Modulus	
Hatch [mm]	Average	Std. Deviation
0.06	0.75	0.12
0.09	0.73	0.15

L'analisi di correlazione coi test non parametrici fornisce dei numeri indicativi sul livello di incidenza dei fattori sul modulo elastico di compressione frazionario, e quindi sul comportamento meccanico del provino. Queste informazioni sono utili anche per lo studio che rafforza l'ipotesi del legame fra modulo elastico e densità frazionaria.

Risultati dei test di correlazione risposta Compression Modulus

Fractional Compression Modulus	χ^2	
Processing parameter	Stat	Ref
Power	2	9.49
Thickness	17.05	9.49
Speed	12.50	9.49
Hatch	1.22	5.99

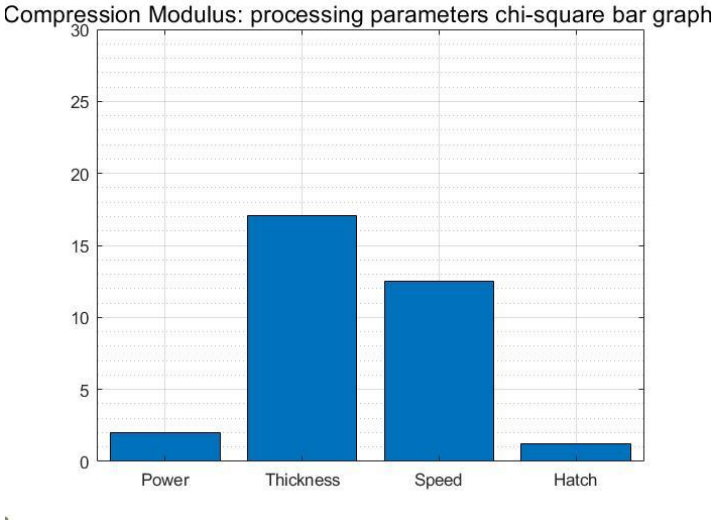
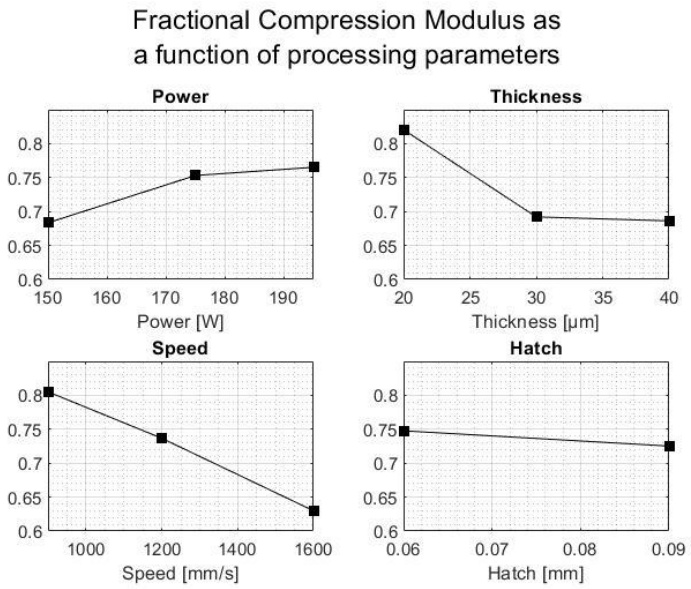


Diagramma a barre del test χ^2

2.3 Risultati modellistici e discussioni

Una trasposizione grafica dell'andamento qualitativo delle medie consente di trarre indicazioni sul grado di incidenza dei fattori sulla variabile modulo elastico. Maggiore concentrazione energetica favorisce le proprietà meccaniche del solido, dai diagrammi si osserva che nell'input termico la velocità di avanzamento è più influente rispetto alla potenza del laser. Lo spessore incide maggiormente quando si lascia lo strato di deposizione 20 µm verso quelli superiori.



Grafici dei valori medi della risposta Fractional Compression Modulus in funzione dei parametri di processo

La ricerca di correlazione tra l'indice sintetico *VED* e il modulo di compressione può prendere come modello quello di Simchi-Pohl. L'equazione asintotica è funzione di due parametri:

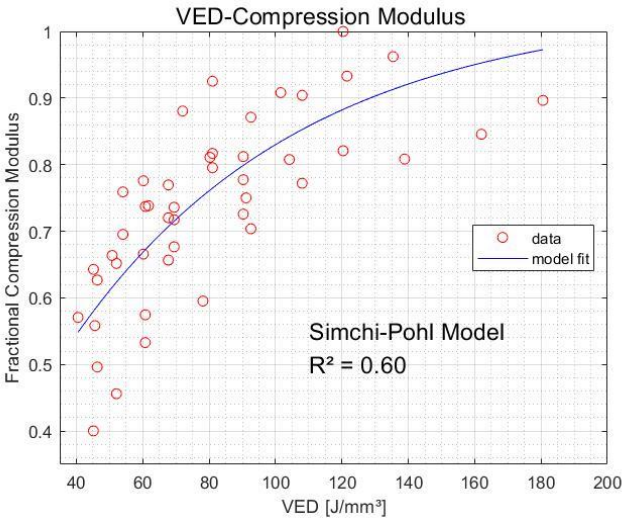
$$FCM = 1 - Ce^{-kVED}$$

tali parametri sono determinati mediante un algoritmo di ottimizzazione inserito in un codice di calcolo:

$$k = 0.01 \qquad C = 0.85$$

$$FCM = 1 - 0.85\, e^{-0.01\, VED}$$

Nel grafico l'indice sintetico *VED* è ordinato in senso crescente con i valori corrispondenti sperimentali del modulo in ordinata (target della funzione approssimante asintotica):



Relazione modulo di compressione frazionario-energia per unità di volume, modello di Simchi-Pohl

La modellazione che utilizza i metodi della regressione multipla consente di graficare la risposta in funzione dei parametri *Power* e *Speed*, lasciando costante il fattore *Hatch*, con rappresentazione secondo i livelli della variabile in ingresso spessore di stesura *Thickness*. Si ricalca il modello della densità, ipotizzando un forte legame diretto fra le due risposte. L'equazione di regressione è non lineare con termine costante:

$$FCM = B_1\, Speed^2 + B_2\, Speed + B_3\, Thickness^2 + B_4\, Thickness + B_5\, (Power \cdot Hatch)^2 + B_6\, Power \cdot Hatch + B_7$$

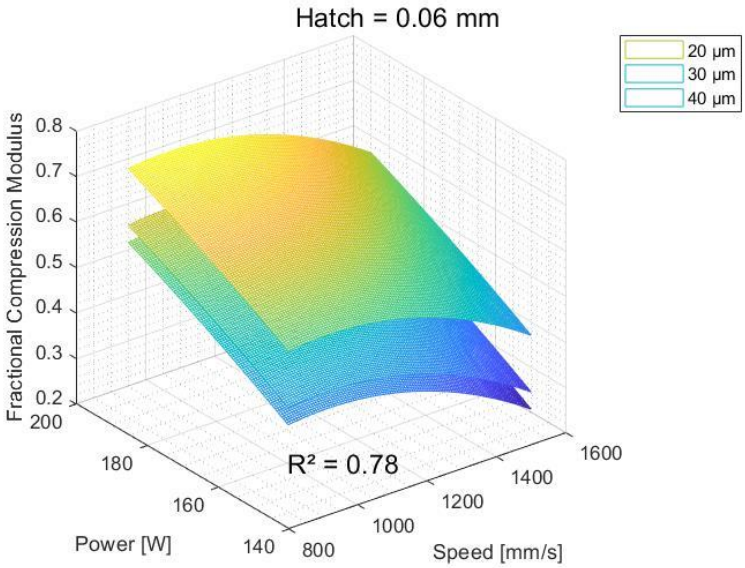
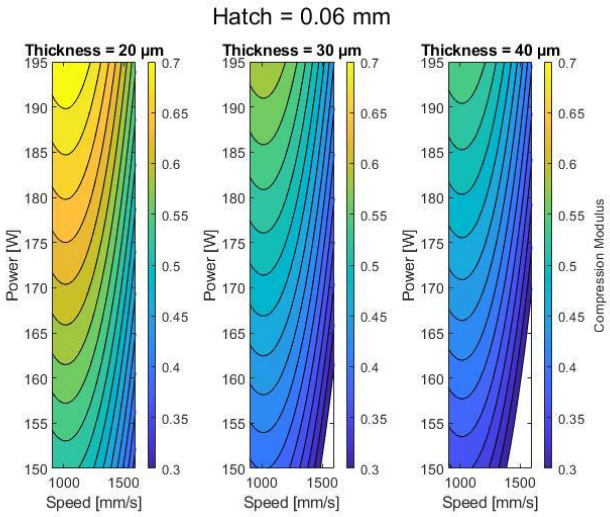


Grafico dell'analisi di regressione della risposta Fractional Compression Modulus in funzione dei parametri di processo (Hatch = 0.06 mm)



Curve di livello della risposta Fractional Compression Modulus (Hatch = 0.06 mm)

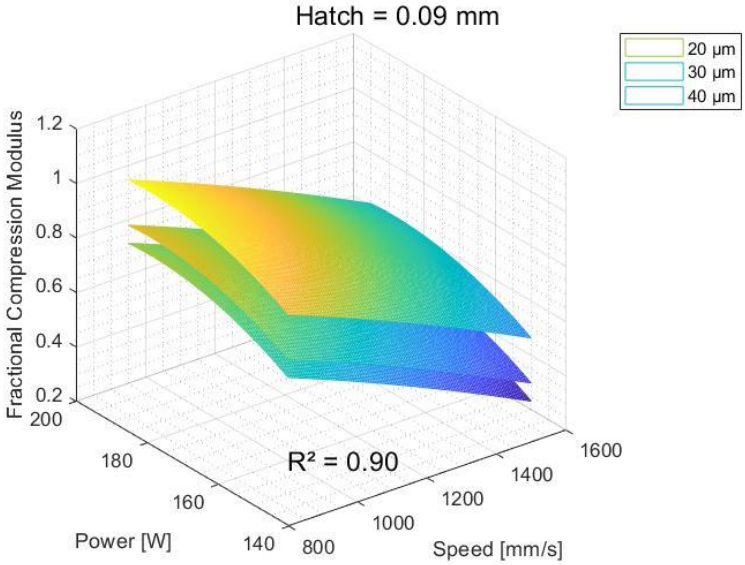
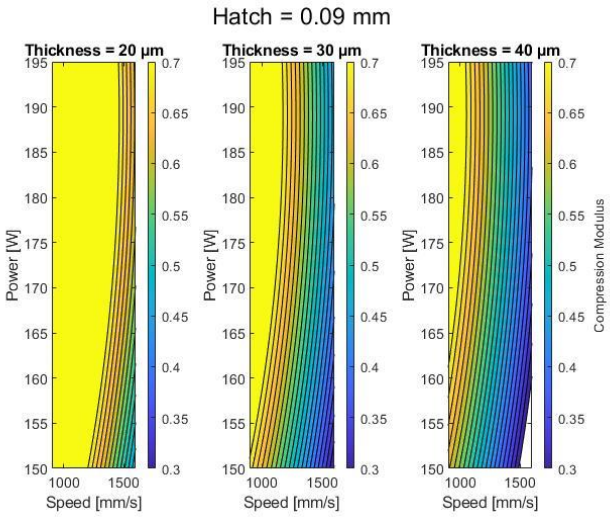


Grafico dell'analisi di regressione della risposta Fractional Compression Modulus in funzione dei parametri di processo (Hatch = 0.09 mm)



Curve di livello della risposta Fractional Compression Modulus (Hatch = 0.09 mm)

Si osserva una interessante mappatura previsionale per la combinazione di fattori a cui corrisponde approssimativamente il livello della risposta. In alcune condizioni di incrocio tra lo spessore, 40 µm, velocità e potenza il modulo elastico risulta basso da rendere il provino in condizioni di fallita adesione. Si riportano i coefficienti dell'equazione applicata alla risposta:

Coefficienti dell'equazione di regressione e intervalli di variazione

Compression Modulus: regression model						
	Hatch = 0.06 mm			**Hatch = 0.09 mm**		
Coefficients	**value**	**min**	**max**	**value**	**min**	**max**
B_1	-1.21	-2.46	0.04	-0.25	-1.57	1.06
B_2	1.53	-0.43	3.50	-0.50	-2.50	1.49
B_3	0.72	-0.21	1.66	0.80	-0.19	1.78
B_4	-1.42	-2.82	-0.01	-1.65	-3.12	-0.19
B_5	-1.21	-5.65	3.24	-3.79	-8.42	0.85
B_6	2.74	-5.12	10.60	7.35	-0.89	15.59
B_7	-0.50	-4.07	3.07	-1.56	-5.31	2.19

si osserva elevata incertezza su alcuni coefficienti che variano tra valori negativi e positivi. Come per altri tipi di metallo, le caratteristiche meccaniche finali dei provini d'acciaio UNS S17400 in costruzione sono attese come dipendenti dalla densità frazionaria, come si evidenzia anche dai livelli di influenza dei fattori al confronto fra le due risposte. Il modulo elastico di compressione però è leggermente più complesso da modellare perché subisce influenze anche dalla direzione di crescita, con conseguenze sull'anisotropia, e ciò giustifica anche una maggiore dispersione dei dati (coefficiente di variazione quasi quattro volte superiore rispetto alla densità).

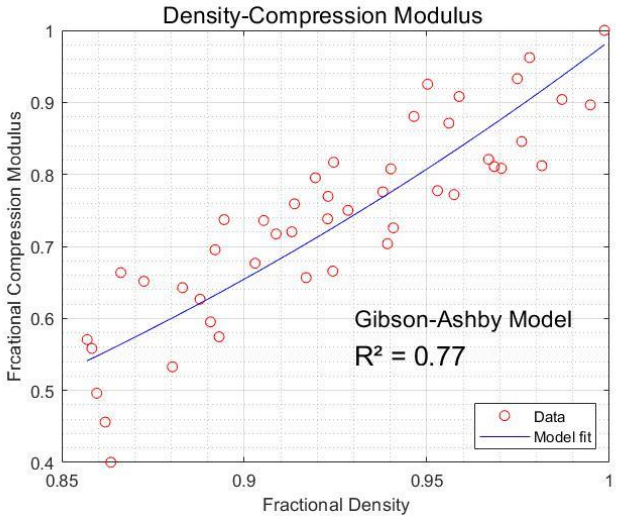
I dati evidenziano l'ipotesi di una stretta correlazione fra densità del solido e proprietà meccaniche. La densità di massa del solido condiziona le proprietà meccaniche e quindi in particolare la risposta modulo elastico di compressione. Il modello di Gibson-Ashby formalizza il legame con la legge:

$$E_c = E_{rif} C \left(\frac{\rho}{\rho_{rif}} \right)^n$$

in cui E_c è il modulo elastico a compressione, E_{rif} il modulo elastico di riferimento (si particolarizza come il modulo elastico massimo), mentre il rapporto rappresenta la densità di massa frazionaria $\rho\ /\rho_{rif}$. C e n sono costanti, risultano dall'algoritmo di minimizzazione dei quadrati degli scarti della regressione lineare:

$$C = 0.98 \qquad n = 3.88$$

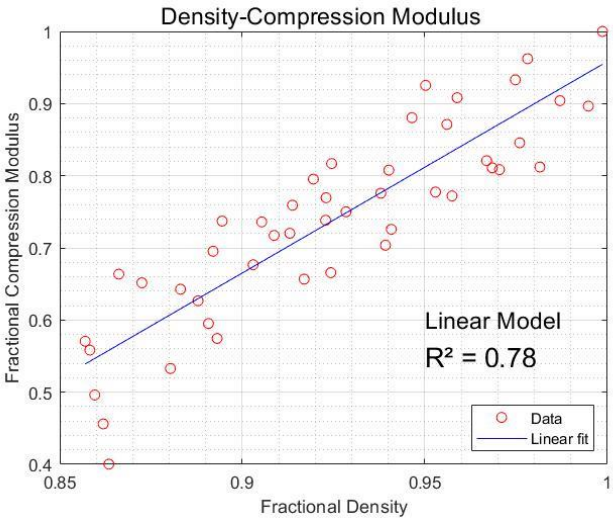
La precisione del modello è indicata da R^2 dello 0.77 (come riportato nel grafico). Infatti, ordinando i dati sperimentali della densità frazionaria in senso crescente sull'ascissa, con associazione dei relativi valori del modulo elastico, anch'esso sotto forma frazionaria, si ottiene questa visualizzazione.



Relazione densità-modulo elastico: modello di Gibson-Ashby

Una alternativa al modello Gibson-Ashby è la legge lineare fra le due risposte, elaborata dall'algoritmo di regressione lineare semplice:

$$FCM = m\ (Fractional\ Density) + q$$



Relazione densità-modulo elastico: modello lineare

Il modello migliora leggermente la propria precisione pur essendo matematicamente meno complesso. L'equazione della retta ha i seguenti parametri:

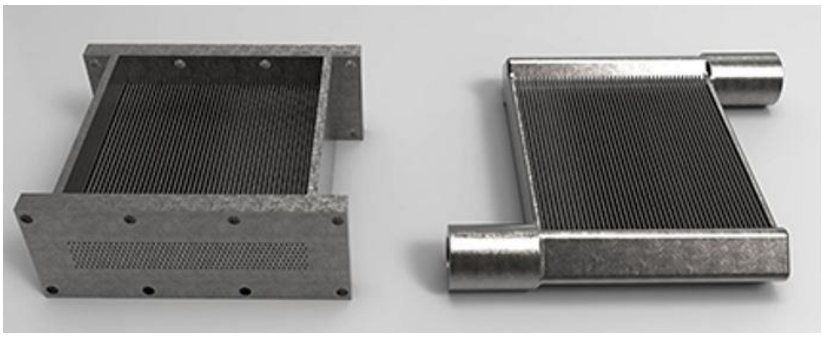
$$m = 2.9 \quad q = -2$$

dove *m* è il coefficiente angolare e *q* l'ordinata all'origine:

$$FCM = 2.9\,(Fractional\ Density) - 2$$

2.4 Stampa dei dimostratori

La produzione di uno scambiatore di calore tramite processi convenzionali richiede la realizzazione dei diversi componenti e il successivo assemblaggio, mentre la possibilità di poter costruire il prodotto finito strato dopo strato mediante fabbricazione additiva permette potenzialmente di realizzare lo scambiatore come monolitico, con riduzione dei tempi di produzione, degli sfridi di lavorazione ed inevitabile ricaduta sui costi e sull'impatto ambientale; inoltre, la fabbricazione additiva apre anche alla possibilità di miniaturizzazione spinta e miglioramento dell'efficienza nello smaltimento del calore. Ciò è stato confermato dall'analisi della letteratura di settore, analisi della quale si offre una sintesi di seguito.
Bisogna considerare prima di tutto che in uno scambiatore di calore compatto si impiegano sottili lamine metalliche che vengono saldate insieme. La complessità, ai fini dell'opportuno processo di trasmissione del calore, suggerisce l'utilizzo di tecniche di fabbricazione additiva, in modo da ottenere prodotti più leggeri e più efficienti; in letteratura sono disponibili degli studi che hanno permesso un aumento di efficienza dello scambio termico del 20% attraverso dispositivi realizzati per stampa 3D.



Scambiatori di calore realizzati attraverso stampa 3D di metalli.

Lo stesso guadagno in termini di efficienza è stato raggiunto in un altro studio mirato alla miniaturizzazione degli scambiatori da 1 kW di potenza; attraverso la stampa 3D, inoltre, il tempo di fabbricazione ha beneficiato di una considerevole riduzione da mesi a settimane, con un guadagno nell'ordine del 50%; è anche significativo che la Nasa abbia concesso l'approvazione al processo di fabbricazione additiva di scambiatori di calore con canali 0.5 mm.
Inoltre, si consideri che è stato possibile spingere la sperimentazione anche oltre questo limite e realizzare in un tempo di 80 ore uno scambiatore con canali del diametro di 150 µm; questo produce, complessivamente, uno scambiatore più compatto e più leggero del 30%; ulteriori benefici si possono conseguire adottando strutture con frazioni nominali di vuoti, sotto forma di schiume metalliche o superfici a curvatura media nulla.
La potenzialità della fabbricazione additiva, quindi, è dimostrata e condivisa, il che giustifica l'interesse nei confronti della tecnologia. Tuttavia, in funzione delle applicazioni specifiche, si rendono necessarie le opportune sperimentazioni, non solo in termini di procedure di fabbricazione, ma anche in termini di riconfigurazioni e riprogettazione dei componenti, i cui effetti tangibili sono stati dimostrati con successo anche in settori cruciali come l'aerospazio e l'automotive.
In definitiva, sulla base delle informazioni reperite, si riassumono nel seguito i vantaggi potenziali derivanti dall'adozione della fabbricazione additiva per la realizzazione degli scambiatori di calore. Dal punto di vista tecnico:

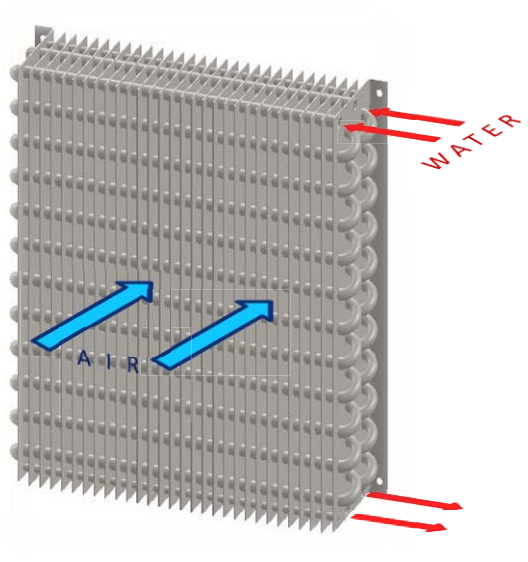
- Miglioramento dell'efficienza nell'ordine del 20%
- Riduzione del tempo di fabbricazione da mesi a ore
- Possibilità di miniaturizzazione degli scambiatori

Indicatore quantitativo	**Valore di letteratura**
Miglioramento dell'efficienza energetica	20%
Alleggerimento	30%
Diametro dei canali miniaturizzati	150-500 µm

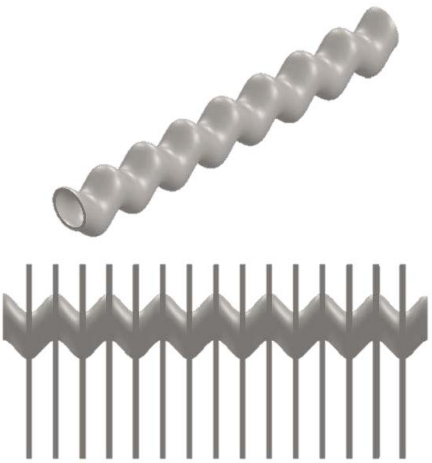
Dal punto di vista economico, si rifletta che per un'azienda sussiste la possibilità di modificare i progetti in approccio *complexity-for-free*, ovvero è possibile applicare migliorie agli scambiatori in funzione dello specifico range di impiego, in termini di materiali e spessori, con impatto irrisorio sul costo complessivo e sul tempo di realizzazione. Questo determina, nel bilancio globale per il sistema industriale e per l'utilizzatore finale, ricaduta notevole in termini di minore consumo di energia non solo nei processi industriali di produzione degli scambiatori, ma anche nell'impiego dell'energia per le singole utenze, per effetto della maggiore efficienza dei dispositivi.

Come dimostratore di progetto è stato selezionato, in accordo con i partner del progetto, uno scambiatore a pacco alettato con fluidi di lavoro aria-acqua in flusso incrociato, al fine di offrire un banco di prova critico per il processo di fabbricazione additiva. La progettazione dello scambiatore è stata condotta ricorrendo al metodo dell'efficienza e al metodo della temperatura media logaritmica. Le ipotesi formulate sono le seguenti:

- Assenza di scambio termico tra i flussi di fluido e l'ambiente esterno,
- Assenze di perdite tra i flussi di fluidi o nell'ambiente,
- Assenza di generazione di calore per reazioni chimiche o nucleari, lavori meccanici o altri mezzi,
- Conduzione di calore solo nella direzione della normale alla superficie di trasferimento
- Portate del fluido equamente distribuite in tutte le aree trasversali del flusso
- Proprietà dei fluidi costanti nello scambiatore
- Coefficiente di scambio termico complessivo costante in tutte le posizioni dello scambiatore
- Condizioni stazionarie
- Scambio termico per irraggiamento trascurabile

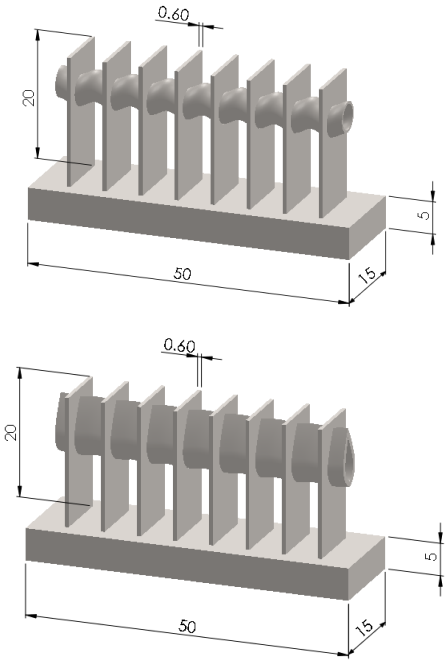


Successivamente, sono stati affrontati i problemi critici specifici del processo di fabbricazione selezionato e quindi sono stati proposti gli accorgimenti costruttivi adottati affinché tutte le superfici, soprattutto quelle negli spazi interni allo scambiatore, siano in grado di autosostenersi senza il ricorso ai supporti di tenuta che avrebbero causato sfrido ma anche difficoltà di rimozione con possibile danneggiamento delle parti. Un primo accorgimento costruttivo riguarda la modifica dell'andamento longitudinale della tubazione, da lineare a sinusoidale: scegliendo opportunamente i valori di ampiezza e periodo della sinusoide è stato possibile definire un angolo di costruzione medio tale che la struttura si autosostenga senza collassare nel corso della fabbricazione.

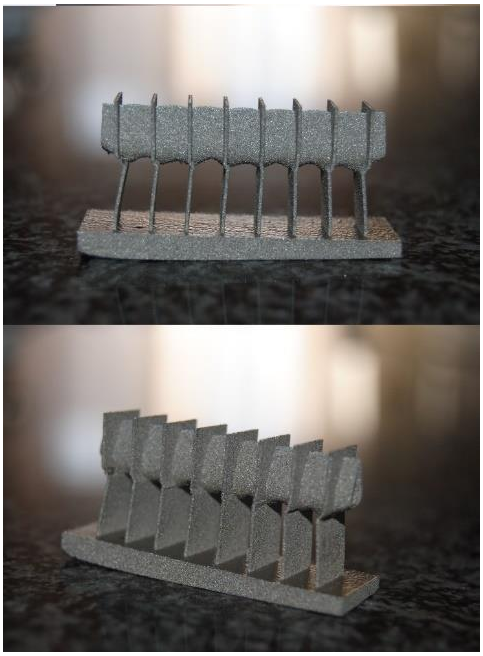


Un secondo accorgimento costruttivo ha riguardato la forma della tubazione: si è sperimentata sia una classica sezione circolare, sia una sezione a goccia con l'obiettivo duplice di semplificare la fabbricazione e migliorare lo scambio termico.

Dunque si è passato all'implementazione di un modello di calcolo in Matlab basato su determinati vincoli costruttivi, legati alla tecnologia di fabbricazione a letto di polvere con fascio laser e alla stampante EOS M270 da impiegare: al modello sono stati forniti in input i dati fondamentali dal punto di vista termico e al variare di alcuni parametri (come la potenza termica richiesta, l'angolo di costruzione medio, il passo fra le alette, lo spessore delle alette e il numero di ranghi); sono stati ricavati in output le temperature di uscita dei due fluidi, le dimensioni finali dello scambiatore, il numero di alette e il numero di tubazioni per rango.
Gli scambiatori dimensionati attraverso questo processo sono stati elaborati quindi attraverso CAD 3D Solidworks e ottimizzati per la stampa tramite Materialise Magics RP. Di seguito si riportano le immagini degli dimostratori stampati, che rappresentano una porzione dello scambiatore progettato e sono costituiti da un solo condotto, con la corrispondente alettatura:



I dimostratori sono stati stampati e analizzati per testare i limiti tecnologici della macchina e l'accuratezza, per scegliere i fattori di progetto definitivi, sia nel caso dello scambiatore di calore con tubazioni dalla sezione circolare, sia dello scambiatore di calore con tubazioni dalla sezione a goccia. Inoltre, la campagna sperimentale e le prove preliminari condotte prima di passare alla stampa dei dimostratori deliberati, ha permesso di ottenere alcuni risultati molto importanti relativi alla lavorazione laser a letto di polvere con la EOS M270, come: angolo di costruzione minimo pari a 2°, spessore minimo di costruzione 0.4mm, generazione con successo di tubazioni dalla sezione circolare e dalla sezione a goccia per diametri inferiori ai 6mm, affidabilità geometrica a valle della stampa rispetto ai valori nominali entro il 14%, come individuato grazie alle verifiche di accuratezza condotte al microscopio elettronico.



Si è mostrata quindi la fattibilità della stampa dei due scambiatori di calore proposti che ci si aspetta possano fornire prestazioni migliori rispetto a scambiatori ottenuti per tecniche convenzionali, sulla base della fase di progettazione e ottimizzazione condotta in simulazione.

3 Conclusioni

Le attività esposte nel report presente chiudono il contributo del partner. In particolare, è stato possibile ricavare le mappe di processo per la predizione delle caratteristiche meccaniche dei prodotti fabbricati, in termini assoluti come funzione dei fattori di processo, e in termini normalizzati come funzione della densità frazionaria. Questi risultati consentono quindi di stampare i componenti per usi energetici specifici, progettando opportunamente la densità. Un esempio è stato fornito attraverso la realizzazione di uno scambiatore di calore miniaturizzato, proposto come dimostratore tecnologico del progetto.

Fabrizia Caiazzo è Professore Associato del settore scientifico disciplinare ING-IND/16 Tecnologie e Sistemi di Lavorazione. I principali temi di ricerca svolti riguardano: sviluppo di tecniche innovative per l'analisi quantitativa dei sistemi di produzione; qualità nelle misure in produzione effettuate con macchina di misura a coordinate; lavorazioni di sinterizzazione laser di polveri metalliche; lavorazioni mediante laser. L'attività scientifica è stata svolta, per tutti i temi trattati, nell'ambito di progetti di ricerca coordinati con altre sedi universitarie, supportati da contratti del MIUR e da collaborazioni con Enti di Ricerca (ENEA, Consorzio CALEF, CIRA Centro Italiano Ricerche Aerospaziali) e aziende (Alenia Aermacchi S.p.A., Avio S.p.A, EMA Europea Microfusioni Aerospaziali S.p.A). E' stata responsabile scientifico di un progetto di ricerca, finalizzato dalla Regione Campania sull'"Integrazione in un sistema di produzione di una macchina di misura a coordinate per il miglioramento della qualità dei prodotti". Attualmente partecipa ai Progetti di ricerca: PON01_01269 ELIOS Emergent Laser fIber Optic welded Structures capofila CALEF, PON_01_00895 LABREP Laboratorio sul repair capofila Avio S.p.A Brindisi e PON_a3_00007 NAFASSY NAtional FAcility for Superconducting Systems capofila Università di Salerno ed è responsabile di un assegno di ricerca nell'ambito della area scientifica "Proprietà meccaniche dei materiali". E' responsabile dei progetti di ricerca PON02_00609 DAC Distretto Aerospaziale Campano Progetto Sifurtec capofila Alenia Aermacchi S.p.A. e PON02_00040 RITAM RIcerca su Tecnologie Avanzate per Motori capofila EMA S.p.A. Nel 2012 ha brevettato un nuovo apparato automatizzato di saldatura laser.

Vittorio Alfieri è Ricercatore al Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Salerno. Ha conseguito con lode la Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica nel 2009 e il titolo di Dottore di ricerca in Ingegneria ed Economia dell'Innovazione nel 2013, è risultato vincitore di Borse di studio e Assegni di Ricerca inerenti le tematiche del settore scientifico disciplinare Tecnologie e Sistemi di Lavorazione. Ha discusso i suoi lavori a congressi scientifici internazionali, nel 2011 ha ricevuto a Bratislava il premio World Association for Innovative Technologies Award per trasferimento tecnologico. Svolge attività di docenza anche per corsi di formazione professionali, è revisore di articoli scientifici per la rivista Materials & Design edita da Elsevier; è membro dell'AITeM (Associazione Italiana delle Tecnologie Manifatturiere). L'attività di ricerca riguarda i processi speciali con fascio laser, saldatura, taglio, foratura e fabbricazione additiva; è documentata da numerose pubblicazioni su riviste internazionali con referee.