



Ricerca di Sistema elettrico

Studio sulle tecnologie di fabbricazione additiva dei metalli con fascio laser

Fabrizia Caiazza
Vittorio Alfieri

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 2020

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II 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: 3.19 "Realizzazione mediante Additive Manufacturing di campioni metallici"

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia - ENEA

Responsabile del Work package: Daniele Mirabile Gattia - ENEA

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: 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 MODELLAZIONE E FABBRICAZIONE DELLA SCHIUMA A GEOMETRIA CASUALE	5
2.2 VERIFICHE DI ACCURATEZZA DIMENSIONALE	7
2.3 REALIZZAZIONE DI CAMPIONI PER LO STUDIO DEI FATTORI DI PROCESSO	8
3 CONCLUSIONI.....	17

Sommario

Nel periodo in oggetto, il gruppo di ricerca TESEO ha proseguito lo studio sulle schiume metalliche per l'alleggerimento dei componenti metallici realizzati attraverso fabbricazione additiva con tecnologia a letto di polvere con fascio laser.

È stata verificata la validità dell'algoritmo per la progettazione delle strutture alleggerite, stampando componenti rappresentativi e verificandone l'accuratezza dimensionale.

Successivamente è stato investigato l'effetto dei fattori di processo sulle caratteristiche meccaniche e fisiche dei componenti. In particolare, sono stati indagati gli effetti di potenza del laser, velocità di scansione, distanza fra tracce adiacenti e spessore di stesura della polvere metallica. Per investigare l'effetto di quest'ultimo fattore, per motivazioni tecniche c'è la necessità di realizzare job separati per ciascuno spessore di lavorazione; è possibile, invece, modificare i livelli degli altri fattori all'interno dello stesso job.

Il piano sperimentale è stato elaborato con approccio Design of Experiment, in modo da predisporre l'indagine allo studio di effetti principali e interazioni con significatività statistica. Le risposte d'interesse, individuate anche in base alla letteratura del settore, sono state: rugosità superficiale e laterale dei campioni, modulo elastico a compressione, densità.

1 Introduzione

Nel periodo in oggetto, il gruppo di ricerca TESEO ha proseguito lo studio sulle schiume metalliche per l'alleggerimento dei componenti metallici realizzati attraverso fabbricazione additiva con tecnologia a letto di polvere con fascio laser. È stata verificata la validità dell'algoritmo per la progettazione delle strutture alleggerite, stampando componenti rappresentativi e verificandone l'accuratezza dimensionale.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Modellazione e fabbricazione della schiuma a geometria casuale

Per testare la validità dell'algoritmo elaborato nelle attività pregresse, è stata considerata una struttura cilindrica alleggerita attraverso geometria a schiuma. Il diametro nominale del cilindro è stato impostato a 20 mm, l'altezza a 50 mm, per un volume totale di 15700 mm³. L'alleggerimento è stato perseguito attraverso la generazione di pori sferici a distribuzione casuale (Figura 1), con diametro compreso fra 1 e 6 mm, così da evitare la generazione di supporti di tenuta nel corso della fabbricazione. Lo spessore di ciascun livello di progettazione su cui applicare l'algoritmo per l'interconnessione e la tenuta della struttura vale 2.5 mm e non va confuso con lo spessore di stesura della polvere che è invece fissato da necessità tecnologiche.

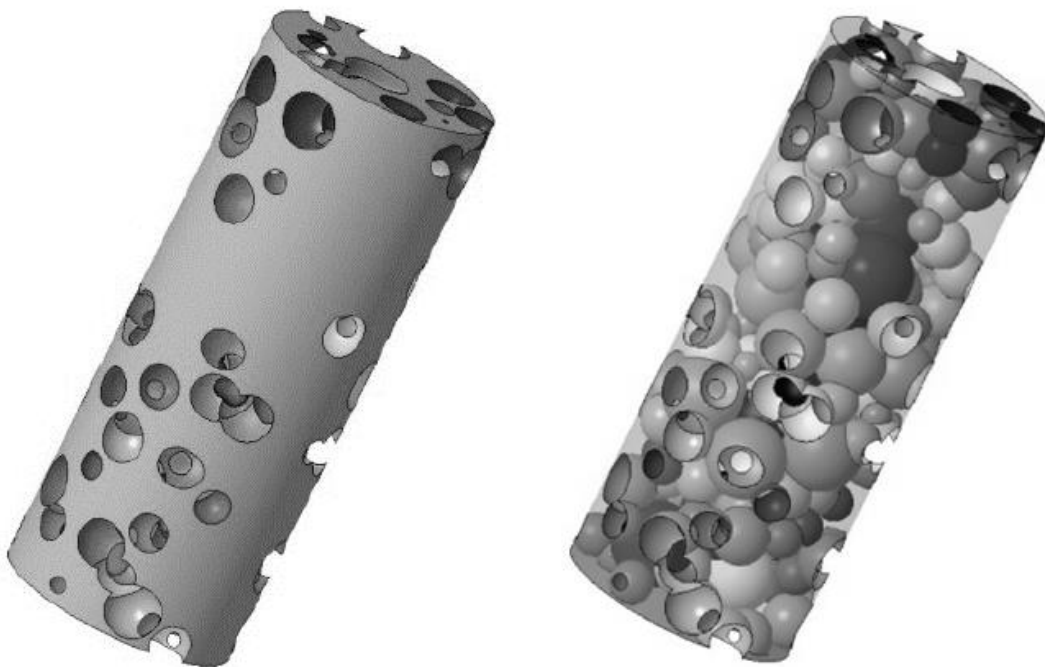


Figura 1. Frazione solida e frazione vuota della struttura.

L'algoritmo ha generato in totale 192 pori; l'analisi in distribuzione di frequenza dei diametri mostra una concentrazione di pori con diametro compreso nella classe di estremi 1.5 e 2.5 mm (Figura 2). Pori con diametro prossimo al limite fissato nell'algoritmo sono meno frequenti perché non favorevoli al rispetto dei requisiti di resistenza meccanica in esercizio.

La densità frazionaria ottenuta vale 42%. L'interconnessione dei pori, necessaria per l'espulsione della polvere non fusa e non sinterizzata, è stata verificata attraverso sezioni longitudinali virtuali (Figura 3) della schiuma. Ulteriori controlli sono stati condotti nelle sezioni trasversali, per accertare che la misura dello spessore di parete generato dall'algoritmo fosse compatibile con il minimo spessore di parete di 0.2 mm che è possibile ottenere dalla fabbricazione.

A valle di questi controlli, si è proceduto con la fabbricazione dei campioni metallici (Figura 5), da sottoporre alle successive analisi di accuratezza dimensionale.

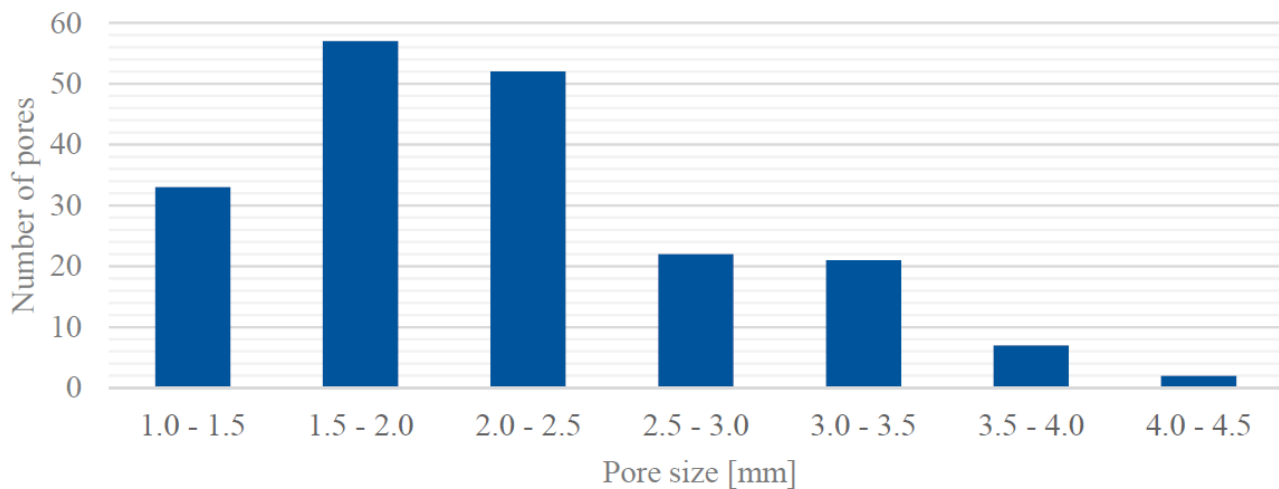


Figura 2. Distribuzione dei diametri dei pori generati casualmente.

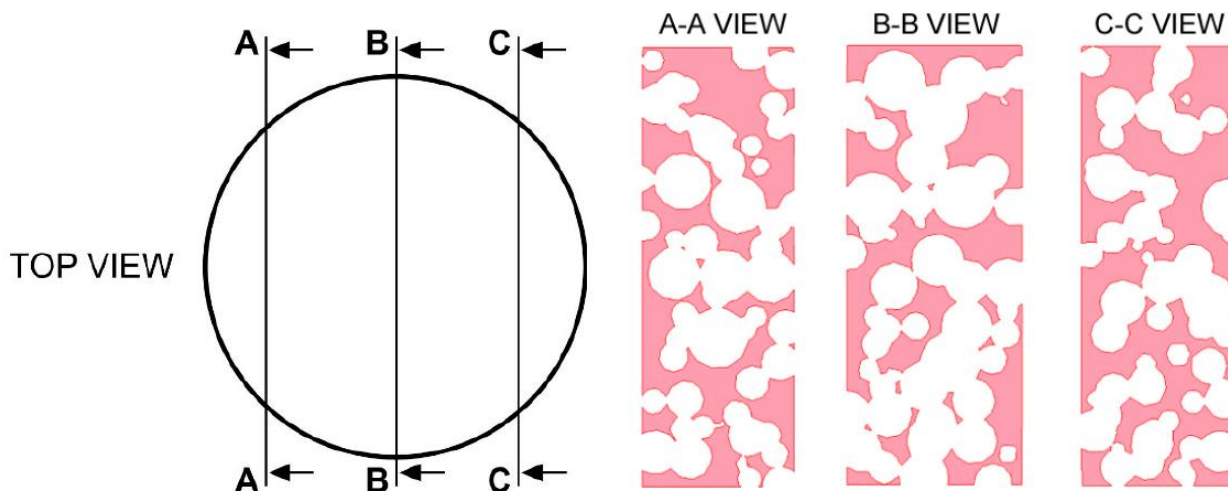


Figura 3. Viste in sezione per la verifica dell'interconnessione dei pori.



Figura 4. Verifica dell'interconnessione e dello spessore di parete nelle sezioni trasversali della schiuma.



Figura 5. Campioni fabbricati attraverso processo additivo a letto di polvere con fascio laser.

2.2 Verifiche di accuratezza dimensionale

I campioni sono stati tagliati in direzione trasversale (Figura 6) alla direzione di crescita in fabbricazione, quindi in un piano parallelo alla piattaforma di costruzione. La sezione così ricavata è stata confrontata con la sezione nominale ottenuta con taglio virtuale del file CAD alla medesima quota (Figura 7).

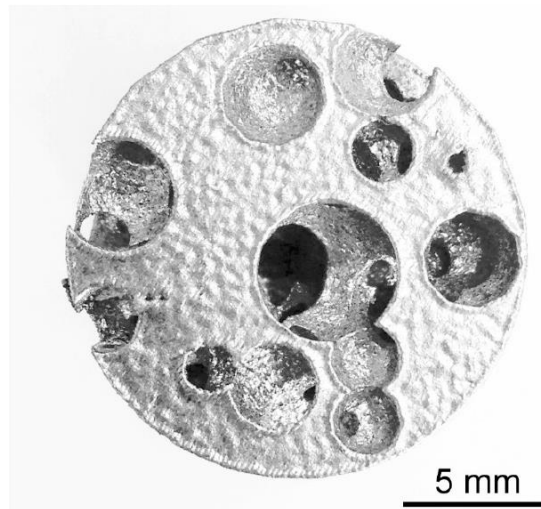


Figura 6. Sezione trasversale reale della schiuma.

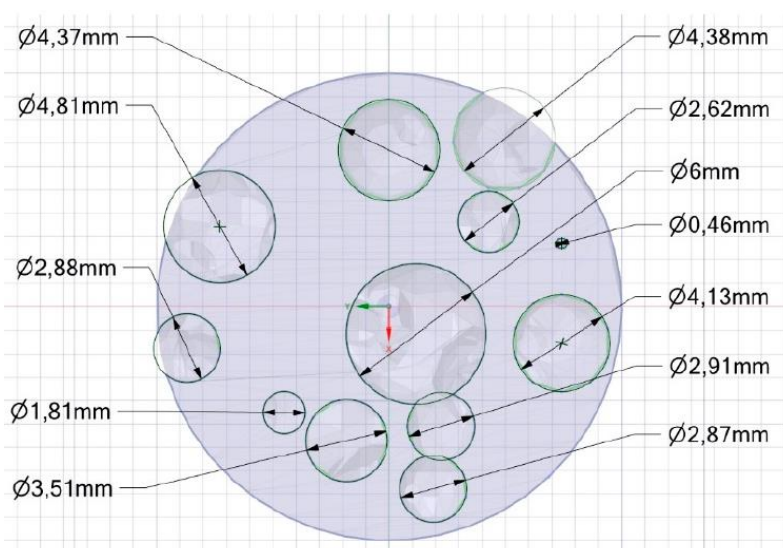


Figura 7. Sezione trasversale nominale della schiuma.

Tabella 1. Diametri nominali e diametri reali dei pori in sezione trasversale.

Nominal (mm)	Actual (mm)	Mismatch (%)
0.46	0.51	8.9
1.81	1.97	8.8
2.62	2.71	3.2
2.87	2.91	1.4
2.88	2.98	3.6
2.91	3.07	5.3
3.51	3.79	8.1
4.13	4.12	0.0
4.37	4.45	1.8
4.38	4.32	1.4
4.81	4.92	2.2
6.00	6.17	2.8

Il diametro di ciascun poro è stato misurato con microscopio stereoscopico per valutare lo scostamento percentuale rispetto al diametro nominale (Tabella 1). Mediamente, lo scostamento vale 4% ed è ritenuto accettabile per le applicazioni di alleggerimento in oggetto.

2.3 Realizzazione di campioni per lo studio dei fattori di processo

I provini sperimentali sono di forma parallelepipedica con sezione quadrata 25 mm × 25 mm e altezza nominale 45 mm. I fattori principali di processo considerati (Tabella 2) sono lo spessore di stesura della polvere, la potenza del fascio laser, la velocità di avanzamento, la distanza (*hatch spacing*) fra due tracce adiacenti.

Tabella 2. Livelli di variazione dei fattori principali di processo.

Spessore [µm]	Potenza [W]	Velocità [mm/s]	Hatch [mm]
20	150	900	0.06
30	175	1200	0.09
40	195	1600	

Variando i parametri secondo logica di permutazione con ripetizione, risulta un piano fattoriale completo con 54 condizioni, organizzate come da Tabelle seguenti. La costruzione è organizzata in tre job, all'interno di ogni job lo spessore di stesura è costante (Figura 8).

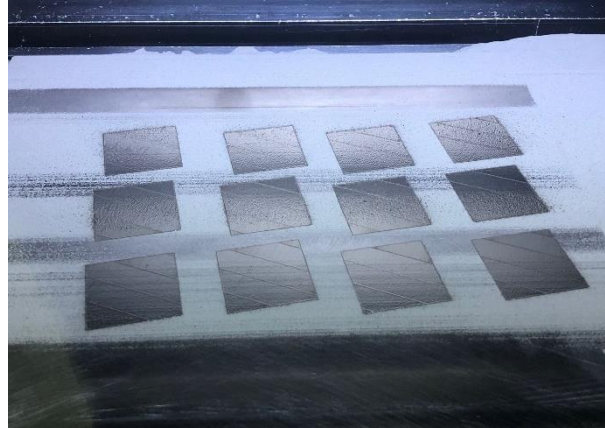


Figura 8. Esposizione del primo strato di fabbricazione.

Tabella 3. Condizioni di processo nel job con spessore di fabbricazione 30 μm

Sample	Thickness [μm]	Power [W]	Speed [mm/s]	Hatch [mm]
1	30	195	900	0.09
2	30	195	900	0.06
3	30	195	1200	0.09
4	30	195	1200	0.06
5	30	195	1600	0.09
6	30	195	1600	0.06
7	30	175	900	0.09
8	30	175	900	0.06
9	30	175	1200	0.09
10	30	175	1200	0.06
11	30	175	1600	0.09
12	30	175	1600	0.06
13	30	150	900	0.09
14	30	150	900	0.06
15	30	150	1200	0.09
16	30	150	1200	0.06
17	30	150	1600	0.09
18	30	150	1600	0.06

Tabella 4. Condizioni di processo nel job con spessore di fabbricazione 30 μm

Sample	Thickness [μm]	Power [W]	Speed [mm/s]	Hatch [mm]
19	40	195	900	0.09
20	40	195	900	0.06
21	40	195	1200	0.09
22	40	195	1200	0.06
23	40	195	1600	0.09
24	40	195	1600	0.06
25	40	175	900	0.09
26	40	175	900	0.06
27	40	175	1200	0.09

28	40	175	1200	0.06
29	40	175	1600	0.09
30	40	175	1600	0.06
31	40	150	900	0.09
32	40	150	900	0.06
33	40	150	1200	0.09
34	40	150	1200	0.06
35	40	150	1600	0.09
36	40	150	1600	0.06

Tabella 5. Condizioni di processo nel job con spessore di fabbricazione 20 μm

Sample	Thickness [μm]	Power [W]	Speed [mm/s]	Hatch [mm]
37	20	195	900	0.09
38	20	195	900	0.06
39	20	195	1200	0.09
40	20	195	1200	0.06
41	20	195	1600	0.09
42	20	195	1600	0.06
43	20	175	900	0.09
44	20	175	900	0.06
45	20	175	1200	0.09
46	20	175	1200	0.06
47	20	175	1600	0.09
48	20	175	1600	0.06
49	20	150	900	0.09
50	20	150	900	0.06
51	20	150	1200	0.09
52	20	150	1200	0.06
53	20	150	1600	0.09
54	20	150	1600	0.06

Le risposte critiche del processo sono la densità frazionaria (valutata cioè in rapporto alla densità massima ottenibile in condizioni standard), il modulo elastico a compressione frazionario (valutato cioè in rapporto al modulo elastico a compressione massimo ottenibile in condizioni standard), la rugosità superficiale rilevata sulla faccia laterale del provino, la rugosità rilevata sulla faccia superiore.

La rugosità delle superfici è rilevata in due modalità, come suggerito in letteratura: Ra è il valore della media aritmetica del profilo di superficie rispetto alla linea media; Rz è il valore medio della distanza picco-valle del profilo di superficie. Le misure sono tre per ogni modalità delle due superfici in esame (laterale e superiore), secondo tre direzioni diverse: una direzione parallela a quella di deposizione; una trasversale alla direzione di deposizione (ma parallela al verso di crescita); una obliqua rispetto alle precedenti. Il rugosimetro è il modello Taylor Hobson Form Taylorsuf 50, dotato di tastatore con unità di traslazione e unità elettronica esterne. L'incertezza di misura è inferiore a 0.4 nm.

La massa volumica dei provini è misurata tramite bilancia Gibertini modello Eternity 200 CAL (Figura 9). Questo strumento utilizza il principio di Archimede: dopo aver misurato il peso del campione in aria questo viene immerso in acqua, il valore della differenza fra la spinta ricevuta dal fluido e il peso è la chiave per la misurazione della densità di massa dell'oggetto.



Figura 9. Bilancia Gibertini modello Eternity 200 CAL.

La misura del modulo elastico a compressione è stata eseguita con macchina MTS Landmark servo-idraulica con carico massimo di 250 kN e frequenza di campionamento 3 Hz. I risultati delle analisi sono riportati nelle Tabelle seguenti.

Tabella 6. Valori di rugosità rilevati sui campioni del job con spessore 30 µm.

Sample	Ra lateral surface [µm]	Rz lateral surface [µm]	Ra top surface [µm]	Rz top surface [µm]
1	20.9	161.0	21.7	125.9
2	24.6	180.6	35.0	178.8
3	23.8	189.4	24.8	128.9
4	19.7	144.5	28.6	143.4
5	23.0	169.4	22.0	112.4
6	23.2	171.9	21.5	110.6
7	21.7	163.5	25.2	119.7
8	22.5	171.9	35.1	163.9
9	24.7	187.9	23.1	118.2
10	22.1	160.5	28.6	145.7
11	23.2	163.8	20.8	112.9
12	23.1	180.5	23.6	125.7
13	22.0	170.2	20.7	115.0
14	21.7	169.2	26.0	144.4
15	23.4	175.4	23.3	117.4
16	21.5	163.1	25.2	128.5
17	-	-	-	-
18	21.3	162.6	22.4	113.3

Tabella 7. Valori di rugosità rilevati sui campioni del job con spessore 40 μm .

Sample	Ra lateral surface [μm]	Rz lateral surface [μm]	Ra top surface [μm]	Rz top surface [μm]
19	24.9	188.5	23.8	122.2
20	30.0	235.3	37.2	181.5
21	26.6	196.3	25.1	133.0
22	23.4	170.0	28.0	159.7
23	24.5	191.4	23.7	118.2
24	25.7	196.5	23.8	117.8
25	24.8	183.5	22.7	122.8
26	24.4	196.4	25.9	126.4
27	26.8	198.7	22.9	117.6
28	24.7	185.6	25.8	135.3
29	-	-	-	-
30	24.1	185.1	21.2	108.9
31	24.2	181.7	21.5	123.4
32	24.9	199.5	27.5	139.1
33	24.6	180.6	22.4	119.6
34	21.9	161.6	23.8	126.9
35	-	-	-	-
36	21.0	155.2	21.3	109.4

Tabella 8. Valori di rugosità rilevati sui campioni del job con spessore 20 μm .

Sample	Ra lateral surface [μm]	Rz lateral surface [μm]	Ra top surface [μm]	Rz top surface [μm]
37	23.5	187.4	20.8	106.3
38	21.9	165.5	27.0	124.4
39	21.5	168.3	18.2	102.2
40	24.0	185.5	20.8	110.1
41	19.0	149.3	22.3	114.6
42	20.5	147.4	21.7	121.2
43	21.2	151.1	23.1	117.8
44	21.4	151.6	30.9	163.0
45	22.1	167.0	18.6	105.7
46	23.5	170.8	23.5	119.4
47	19.0	156.6	21.4	117.4
48	18.3	133.5	20.1	106.1
49	20.1	140.8	16.4	87.9
50	18.2	140.0	29.8	141.9
51	18.6	148.0	21.9	110.1
52	18.1	130.5	24.2	129.9
53	-	-	-	-
54	19.4	142.9	22.2	116.4

Tabella 9. Valori di densità relativa rilevati sui campioni del job con spessore 30 µm.

Sample	Fractional Density
1	0.97
2	0.97
3	0.92
4	0.95
5	0.86
6	0.92
7	0.95
8	0.96
9	0.89
10	0.92
11	0.85
12	0.89
13	0.92
14	0.94
15	0.86
16	0.91
17	-
18	0.86

Tabella 10. Valori di densità relativa rilevati sui campioni del job con spessore 40 µm.

Sample	Fractional Density
19	0.94
20	0.94
21	0.88
22	0.92
23	0.83
24	0.87
25	0.91
26	0.92
27	0.86
28	0.89
29	-
30	0.86
31	0.89
32	0.90
33	0.85
34	0.87
35	-
36	0.85

Tabella 11. Valori di densità relativa rilevati sui campioni del job con spessore 20 μm .

Sample	Fractional Density
37	1
38	0.99
39	0.98
40	0.98
41	0.91
42	0.96
43	0.99
44	0.98
45	0.95
46	0.97
47	0.88
48	0.93
49	0.96
50	0.97
51	0.90
52	0.94
53	-
54	0.89

Tabella 12. Valori del modulo elastico a compressione frazionario rilevati sui campioni del job con spessore 30 μm .

Sample	Fractional Compression Modulus
1	0.81
2	0.82
3	0.67
4	0.78
5	0.40
6	0.78
7	0.88
8	0.77
9	0.69
10	0.79
11	0.33
12	0.56
13	0.74
14	0.70
15	0.50
16	0.72
17	-
18	0.46

Tabella 13. Valori del modulo elastico a compressione frazionario rilevati sui campioni del job con spessore 40 μm

Sample	Fractional Compression Modulus
19	0.78
20	0.73
21	0.64
22	0.66
23	0.31
24	0.66
25	0.76
26	0.82
27	0.57
28	0.74
29	-
30	0.56
31	0.63
32	0.74
33	0.31
34	0.65
35	-
36	0.26

Tabella 14. Valori del modulo elastico a compressione frazionario rilevati sui campioni del job con spessore 20 μm

Sample	Fractional Compression Modulus
37	1
38	0.90
39	0.81
40	0.96
41	0.72
42	0.91
43	0.90
44	0.85
45	0.92
46	0.93
47	0.53
48	0.75
49	0.87
50	0.81
51	0.68
52	0.81
53	-
54	0.59

3 Conclusioni

Nel prosieguo delle attività svolte dal gruppo di ricerca si prevede di analizzare i fattori di processo in termini di effetti principali ed interazioni sulle variabili di risposta misurate nell'annualità in oggetto, per condurre analisi di tipo statistico e ricavare modelli di regressione e superfici di risposta. Ulteriormente, si intende valutare la validità dell'impiego di reti neurali a scopo previsionale.

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.