POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Caratterizzazione e analisi di variabilità dei difetti di un componente in alluminio prodotto tramite DMLS

Relatori Prof. Luca Iuliano Prof.ssa Flaviana Calignano

Referente aziendale Arch. Stefano Paradiso

> Tesista Luciano Monaco





Sommario

Indice delle figure	4
Indice delle tabelle	8
Introduzione	11
Additive Manufacturing	12
Descrizione generale: cenni storici, classificazione delle tecniche e mercato	12
Design for Additive Manufacturing e progettazione	17
Direct Metal Laser Sintering	26
Processo	26
Parametri di processo	28
Finitura superficiale	30
Materiali	31
Generazione dei difetti	32
Difetti associati a componenti in lega di alluminio prodotti per DMLS	32
Effetto dei parametri di processo	34
Influenza del materiale	37
La lega AlSi10Mg	37
Analisi dei difetti	48
Realizzazione dei provini	48
Tomografia computerizzata industriale e raccolta dei dati grezzi	51
Analisi dei dai e creazione del database	58
Provino 1DtestaM404_1ov	59
Provino 1DtestaM404_2ov	64
Provino 2DgambaM404_1ov	69
Provino 3DtestaM404_1	74
Provino 3DtestaM404_2	79
Provino 4DgambaM404_1	84
Provino 4DgambaM404_2ov	90
Provino 5DtestaM290_1	95
Provino 5DtestaM290_2	100
Provino 6DgambaM290_1	106

Defects characterization and variability analysis of an aluminium component produced by DMLS technology



Provino 6DgambaM290_2	111
Confronto tra la EOS M 400-4 e la EOS M 290 nella generazione dei difetti	116
Confronto tra la presenza e l'assenza di overlapping nella generazione dei difetti	117
Confronto tra la disposizione "testa" e "gamba" nella generazione dei difetti	118
Creazione del database	120
Conclusioni	121
Riferimenti	122



Indice delle figure

FIGURA 1. SCHEMA STEREOLITHOGRAPHY [2]	12
FIGURA 2. SLA-1 [3]	13
FIGURA 3. SCHEMA FUSED DEPOSITION MODELLING [4]	13
FIGURA 4. SCHEMA SELECTIVE LASER SINTERING [8]	14
FIGURA 5. CLASSIFICAZIONE DELLE TECNICHE DI AM IN FUNZIONE DELLO STATO DEL	
MATERIALE DI PARTENZA	15
FIGURA 6. ANALISI DI MERCATO E PREVISIONE DI SVILUPPO DELL'AM	15
FIGURA 7. OTTIMIZZAZIONE DI UNA STAFFA AUTOMOBILISTICA [12]	17
FIGURA 8. OTTO CANALI DI RAFFREDDAMENTO IN UNO STAMPO METALLICO [13]	18
FIGURA 9. SCARICO AUTOMOBILISTICO PRODOTTO DA 3D SYSTEMS [14]	18
FIGURA 10. PROTESI PRODOTTA CON TECNOLOGIE AM [15]	19
FIGURA 11. MICROSTRUTTURA DI UNA PALA DI TURBINA RIPARATA IN PUNTA PER LASER	
DEPOSITION [16]	19
FIGURA 12. STRUTTURA LATTICE PER IMPIANTI ORTOPEDICI [17]	20
FIGURA 13. RAPPORTO COSTO DI PRODUZIONE - COMPLESSITÀ GEOMETRICA, COFRONTO TR	łA
AM E TECNICHE TRADIZIONALI [18]	20
FIGURA 14. ESEMPIO DI ANALISI DI UN COMPONENTE AUTOMOBILISTICO TRAMITE IL	
SOFTWARE INSPIRE [20]	21
FIGURA 15. ESEMPIO DI DEFINIZIONE DI DESIGN E NON DESIGN SPACE DI UN COMPONENTE	
AUTOMOBILISTICO TRAMITE IL SOFTWARE INSPIRE [20]	22
FIGURA 16. ESEMPIO DI OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA DI UN COMPONENTE	
AUTOMOBILISTICO TRAMITE IL SOFTWARE INSPIRE [20]	22
FIGURA 17. ESEMPIO CONVERSIONE IN STL DI UN COMPONENTE AUTOMOBILISTICO [20]	23
FIGURA 18. ESEMPIO MESSA IN MACCHINA E GENERAZIONE DEI SUPPORTI (IN BLU) DI UN	
COMPONENTE AUTOMOBILISTICO TRAMITE IL SOFTWARE MATERIALISE MAGICS [20]	24
FIGURA 19. DIFFERENZA TRA SLICING COSTANTE E SLICING ADATTATIVO	25
FIGURA 20. SCHEMA DIRECT METAL LASER SINTERING [21]	26
FIGURA 21. SCHEMA DI ALCUNI PARAMETRI DI PROCESSO PER LA DMLS [24]	29
FIGURA 22. ALCUNE TRA LE PRINCIPALI TIPOLOGIE DI STRATEGIE DI SCANSIONE: (A) A LINE	ΞE
PARALLELE, (B) A SCACCHIERA O AD ISOLA [25]	30
FIGURA 23. CLASSIFICAZIONE DEI DIFETTI PRINCIPALI NEI COMPONENTI IN ALLUMINIO	
PRODOTTI PER DMLS	32
FIGURA 24. CLASSIFICAZIONE DELLE CAUSE DELLA FORMAZIONE DI POROSITÀ NEI	
COMPONENTI IN ALLUMINIO PRODOTTI PER DMLS	33
FIGURA 25. SCHEMA DEI FENOMENI DI SCAMBIO TERMICO DURANTE LA FUSIONE [27]	35
FIGURA 26. TIPOLOGIE DI ORIENTAMENTO DEL PEZZO SULLA PIATTAFORMA DI	
COSTRUZIONE: (A) VERTICALE CON BASE PARALLELA LA PIANO YZ, (B) ORIZZONTALE	
CON BASE PARALLELA AL PIANO XY, (C) ORIZZONTALE CON BASE PARALLELA AL PIAN	N
YZ [25]	36
FIGURA 27. SUPERFICI DI SCORRIMENTO DEI LEGAMI DELLA TRACCIA DEL POZZO DI	
FUSIONE:(A) TRACCIA DEL POZZO DI FUSIONE, (B) SUPERFICIE DI SCORRIMENTO STRAT	O

Defects characterization and variability analysis of an aluminium component produced by DMLS technology



PRECEDENTE-SUCCESSIVO, (C) SUPERFICIE DI SCORRIMENTO SULLO STESSO STRATO [2	5]
	36
FIGURA 28. IMMAGINE FESEM DELLA POLVERE DI ALSI10MG PRODOTTA PER GAS	
ATOMIZZAZIONE [25]	40
FIGURA 29. DIAGRAMMA DI FASE AL-SI [34]	40
FIGURA 30. IMMAGINI MICROGRAFICHE DELLA STRUTTURA CLASSICA PER COLATA DELLA	
LEGA ALSI10MG [16]	41
FIGURA 31. CONFRONTO DELLA MICROSTRUTTURA DELLA LEGA ALSI10MG PER COLATA (A)) E
PER DMLS (B) [16]	41
FIGURA 32. DIREZIONE 0° (A), DIREZIONE 45° (B) E DIREZIONE 90° (C) [34]	42
FIGURA 33. SCHEMA DELLE CONDIZIONI DEI GRUPPI DI PROVINI [34]	42
FIGURA 34. GRUPPO #12: 30°C / 45° / T6 (LUCIDATO, NON INTAGLIATO)	43
FIGURA 35. GRUPPO #17: 300°C / 45° / AS-BUILT (LUCIDATO, NON INTAGLIATO)	43
FIGURA 36. GRUPPO #10: 30°C / 0° / T6	44
FIGURA 37. GRUPPO #11 (PRIMA DEL TRATTAMENTO T6): 30°C / 90° / AS-BUILT	44
FIGURA 38. GRUPPO #11: 30°C / 90° / T6	44
FIGURA 39. GRUPPO #13: 300°C / 0° / AS-BUILT	45
FIGURA 40. GRUPPO #14: 300°C / 0° / T6	45
FIGURA 41. CONFRONTO DEI RISULTATI SUL DIAGRAMMA TENSIONE-DEFORMAZIONE	47
FIGURA 42. EOS M 290 (A SINISTRA) E EOS M 400-4 (A DESTRA) [6]	48
FIGURA 43. CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLE MACCHINE [6]	48
FIGURA 44. ZONE DI CONTROLLO DEI LASER DELLA EOS M 400-4 E ZONE DI OVERLAPPING	49
FIGURA 45. SCHEMA DEL PROCESSO DI FUNZIONAMENTO DEL TOMOGRAFO [35]	51
FIGURA 46. TOMOGRAFO PHOENIX V TOME X S [36]	52
FIGURA 47. ILLUSTRAZIONE DELLA DIMENSIONE PROIETTATA	54
FIGURA 48. ILLUSTRAZIONE DELL'AREA PROIETTATA	56
FIGURA 49. 1DTESTAM404_1OV: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	59
FIGURA 50. 1DTESTAM404_1OV: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	60
FIGURA 51. 1DTESTAM404_1OV: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	61
FIGURA 52. 1DTESTAM404_10V: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DELLE	
AREE, AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	62
FIGURA 53. 1DTESTAM404_1OV: IMMAGINE TOMOGRAFICA	63
FIGURA 54. 1DTESTAM404_20V: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	64
FIGURA 55. 1DTESTAM404_20V: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	65
FIGURA 56. 1DTESTAM404_20V: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	66
FIGURA 57. 1DTESTAM404_20V: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DELLE	
AREE, AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	67
FIGURA 58. 1DTESTAM404_20V: IMMAGINE TOMOGRAFICA	68
FIGURA 59. 2DGAMBAM404_10V: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	69
FIGURA 60. 2DGAMBAM404_10V: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	70
FIGURA 61. 2DGAMBAM404_10V: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	71
FIGURA 62. 2DGAMBAM404_10V: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DELLE	
AREE, AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	72
FIGURA 63. 2DGAMBAM404_1OV: IMMAGINE TOMOGRAFICA	73



FIGURA 64. 3DTESTAM404_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	74
FIGURA 65. 3DTESTAM404_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	75
FIGURA 66. 3DTESTAM404_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	76
FIGURA 67. 3DTESTAM404_1: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DELLE A	REE,
AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	77
FIGURA 68. 3DTESTAM404_1: IMMAGINE TOMOGRAFICA	78
FIGURA 69. 3DTESTAM404_2: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	79
FIGURA 70. 3DTESTAM404_2: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	80
FIGURA 71. 3DTESTAM404_2: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	81
FIGURA 72. 3DTESTAM404_2: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DELLE A	REE,
AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	82
FIGURA 73. 3DTESTAM404_2: IMMAGINE TOMOGRAFICA	83
FIGURA 74. 4DGAMBAM404_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	84
FIGURA 75. 4DGAMBAM404_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	85
FIGURA 76. 4DGAMBAM404_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	86
FIGURA 77. 4DGAMBAM404_1: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DELLE	
AREE, AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	87
FIGURA 78. 4DGAMBAM404_1: VISUALIZZAZIONE DEI DIFETTI 0,93 MM(ROSSO) E 0,91 MM (I	BLU)
	88
FIGURA 79. 4DGAMBAM404_1: IMMAGINE TOMOGRAFICA	89
FIGURA 80. 4DGAMBAM404_20V: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	90
FIGURA 81. 4DGAMBAM404_20V: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	91
FIGURA 82. 4DGAMBAM404_20V: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	92
FIGURA 83. 4DGAMBAM404_20V: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DEL	LE
AREE, AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	93
FIGURA 84. 4DGAMBAM404_20V: IMMAGINE TOMOGRAFICA	94
FIGURA 85. 5DTESTAM290_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	95
FIGURA 86. 5DTESTAM290_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	96
FIGURA 87. 5DTESTAM290_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	97
FIGURA 88. 5DTESTAM290_1: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DELLE A	REE,
AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	98
FIGURA 89. 5DTESTAM290_1: IMMAGINE TOMOGRAFICA	99
FIGURA 90. 5DTESTAM290_2: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	100
FIGURA 91. 5DTESTAM290_2: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	101
FIGURA 92. 5DTESTAM290_2: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	102
FIGURA 93. 5DTESTAM290_2: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DELLE A	REE,
AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	103
FIGURA 94. 5DTESTAM290_2: VISUALIZZAZIONE DEI DIFETTI 1,31 MM(ROSSO) E 1,23 MM (B	LU)
	104
FIGURA 95. 5DTESTAM290_2: IMMAGINE TOMOGRAFICA	105
FIGURA 96. 6DGAMBAM290_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	106
FIGURA 97. 6DGAMBAM290_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	107
FIGURA 98. 6DGAMBAM290_1: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	108

Defects characterization and variability analysis of an aluminium component produced by DMLS technology



FIGURA 99. 6DGAMBAM290_1: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DELLE	
AREE, AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	109
FIGURA 100. 6DGAMBAM290_1: IMMAGINE TOMOGRAFICA	110
FIGURA 101. 6DGAMBAM290_2: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	111
FIGURA 102. 6DGAMBAM290_2: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	112
FIGURA 103. 6DGAMBAM290_2: DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	113
FIGURA 104. 6DGAMBAM290_2: ANALISI QUALITATIVA RISPETTO ALLE PROIEZIONI DELLE	
AREE, AL GAP E ALLA GEOMETRIA SUI DIFETTI PRINCIPALI	114
FIGURA 105. 6DGAMBAM290_2: IMMAGINE TOMOGRAFICA	115
FIGURA 106. ESEMPIO DI PARTE DEL DATABASE IN CUI VIENE MOSTRATA LA FUNZIONE	
FILTRO	120



Indice delle tabelle

TABELLA 1. PROPRIETÀ PRINCIPALI DELL'ALLUMINIO [16]	38
TABELLA 2. COMPOSIZIONE DELLA LEGA ALSI10MG [16]	38
TABELLA 3. EFFETTO DEI PRINCIPALI ELEMENTI IN LEGA NELLE LEGHE DI ALLUMINIO [16]	39
TABELLA 4. DETTAGLI SPECIFICI DEI TRATTAMENTI TERMICI ADOTTATI	46
TABELLA 5. RISULTATI OTTENUTI DAI DIVERSI TRATTAMENTI TERMICI SULLE	
CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLA LEGA	47
TABELLA 6. SINTESI DEI PROVINI ANALIZZATI	50
TABELLA 7. 1DTESTAM404 10V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	59
TABELLA 8. 1DTESTAM404_10V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	60
TABELLA 9. 1DTESTAM404_10V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	61
TABELLA 10. 1DTESTAM404_2OV: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	64
TABELLA 11. 1DTESTAM404_20V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	65
TABELLA 12. 1DTESTAM404_20V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	66
TABELLA 13. 2DGAMBAM404_10V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	69
TABELLA 14. 2DGAMBAM404_10V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	70
TABELLA 15. 2DGAMBAM404_10V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	71
TABELLA 16. 3DTESTAM404_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	74
TABELLA 17. 3DTESTAM404_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	75
TABELLA 18. 3DTESTAM404_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	76
TABELLA 19. 3DTESTAM404_2: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	79
TABELLA 20. 3DTESTAM404_2: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	80
TABELLA 21. 3DTESTAM404_2: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	81
TABELLA 22. 4DGAMBAM404_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	84
TABELLA 23. 4DGAMBAM404_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	85

Defects characterization and variability analysis of an aluminium component produced by DMLS technology



TABELLA 24. 4DGAMBAM404_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	0.6
PROBABILITA SULLA COMPATIEZZA	86
TABELLA 25. 4DGAMBAM404_20V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITA SUL DIAMETRO	90
TABELLA 26. 4DGAMBAM404_20V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITA SULLA SFERICITA	91
TABELLA 27. 4DGAMBAM404_20V: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	92
TABELLA 28. 5DTESTAM290_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	95
TABELLA 29. 5DTESTAM290_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	96
TABELLA 30. 5DTESTAM290_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	97
TABELLA 31. 5DTESTAM290_2: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	100
TABELLA 32. 5DTESTAM290_2: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	101
TABELLA 33. 5DTESTAM290_2: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	102
TABELLA 34. 6DGAMBAM290_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	106
TABELLA 35. 6DGAMBAM290_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	107
TABELLA 36. 6DGAMBAM290_1: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	108
TABELLA 37. 6DGAMBAM290_2: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SUL DIAMETRO	111
TABELLA 38. 6DGAMBAM290_2: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA SFERICITÀ	112
TABELLA 39. 6DGAMBAM290_2: ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA E DISTRIBUZIONE DI	
PROBABILITÀ SULLA COMPATTEZZA	113
TABELLA 40. ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA: CONFRONTO TRA EOS M 400-4 E EOS M 290	116
TABELLA 41. ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA: CONFRONTO TRA PRESENZA E ASSENZA D	۶I
OVERLAPPING	117
TABELLA 42. ANALISI STATISTICA DESCRITTIVA: CONFRONTO TRA DISPOSIZIONE "TESTA" E	Ξ
"GAMBA"	118





Introduzione

Attualmente l'additive manufacturing rappresenta una delle direttrici di sviluppo dell'industria 4.0, è un concetto tecnologico produttivo relativamente giovane ed affascinante che presenta un potenziale di crescita molto ampio che quindi lo rende oggetto di interesse di molte realtà industriali in svariati ambiti tra cui, spiccano particolarmente, quello biomedicale, aerospaziale ed il settore automotive.

Discostandosi dalle classiche tecniche di fabbricazione, l'additive manufacturing prevede la generazione del prodotto secondo una logica layer-by-layer, cioè una costruzione a stratificazioni successive su piani ortogonali alla direzione di sviluppo del componente. Anche se il progresso tecnologico sta portando questa tecnologia a competere, sempre di più, nell'ottica di volumi di produzione industriali, uno dei grandi punti di forza dell'additive manufacturing è quello di poter generare prodotti personalizzati, con ottime proprietà meccaniche senza limiti geometrici di alcun tipo ed in tempi relativamente brevi in funzione solo del volume del componente da produrre e non della sua complessità geometrica.

Lo scopo del lavoro è quello di analizzare e caratterizzare i difetti interni di un preciso componente prodotto dal dipartimento Prototype Builds di Torino della società Stellantis con tecnologie L-PBF (laser powder bed fusion), termine adottato dalla normativa ASTM, su due macchine differenti in modo da poter confrontare la qualità del prodotto in base alle condizioni del sistema ed infine generare un database.

Il componente è una forcella di una sospensione automobilistica realizzata in AlSi10Mg su una EOS M 290 e su una EOS M 400-4 che rende possibile anche una valutazione sulle prestazioni delle macchine in termini di qualità e produttività. Le caratteristiche di questa lega di alluminio la rendono particolarmente adatta per la DMLS e attualmente è possibile raggiungere porosità sui pezzi prodotti inferiori all'1%.

Lo studio dei difetti interni è stato effettuato attraverso le analisi dal CT-scan (tomografia industriale computerizzata) presso il centro interdipartimentale Integrated Additive Manufacturing del Politecnico di Torino (IAM@PoliTo) su alcuni provini realizzati.



Additive Manufacturing

Descrizione generale: cenni storici, classificazione delle tecniche e mercato L'uso commerciale del termine additive manufacturing (AM) risale al 1987 quando l'azienda statunitense 3D System presentò la *stereolithography* (SL), ideata dallo stesso fondatore Charles W. Hull [1]. Processo in cui una sorgente di energia laser interagendo con una resina polimerica fotosensibile ne provoca l'indurimento e strato dopo strato, con un opportuno sistema mobile che scende lungo la direzione di costruzione del pezzo immerso nella vasca del materiale, rende possibile la generazione dei componenti (green part) ed infine il pezzo estratto subisce un trattamento in forno U.V. per finalizzarne le proprietà (red part). Nel 1988 3D Systems (con la collaborazione di Ciba-Geigy) sviluppò e commercializzò la prima generazione di resine acriliche e nello stesso anno l'azienda giapponese NTT Data CMET presentò la propria versione della *stereolithography* rinominandola come *Solid Object Ultraviolet Plotter* (SOUP) estendendo tale processo alle resine epossidiche.



VAT

Figura 1. Schema stereolithography [2]



La SLA-1 fu il primo sistema di produzione disponibile di additive manufacturing sul mercato e precursore della macchina SLA 250 (l'acronimo SLA sta per *StereoLithography Apparatus*) che venne rimpiazzata successivamente dalla Viper SLA sempre prodotta dalla 3D Systems.



Figura 2. SLA-1 [3]

Nel 1991 furono commercializzate altre tecniche, tra cui una che prevedeva l'estrusione di materiali termoplastici (solidi) in filamenti. La Stratasys (azienda statunitense) sviluppo questa tecnologia chiamata *fused deposition modelling* (FDM) che prevedeva la formazione del prodotto con la deposizione del materiale estruso tramite una specifica testa di deposizione capace di operare sul piano della piattaforma di costruzione. La Stratasys è l'azienda leader di questa tecnica ancora oggi.



Figura 3. Schema fused deposition modelling [4]



Nel 1992 fu commercializzata la *selective laser sintering* (SLS) da DTM (acquisita da 3D Systems nel 2001), questa tecnica differentemente dalla SL e dalla FDM non opera con un mezzo continuo come la resina fotosensibile liquida o con un solido estruso ma con materiale sotto forma di polvere generando il prodotto tramite l'interazione di quest'ultima con una sorgente laser, offrendo una vasta quantità di materiali utilizzabili: plastiche, metalli, combinazioni di metalli, combinazioni di metalli e polimeri, combinazioni di metalli e ceramici. Precisamente con l'utilizzo di laser sempre più potenti, negli anni, è stato possibile fondere completamente le particelle di materiale in macchina in questo modo dalla SLS, che peccava di alte porosità nei prodotti dovute all'incompleta fusione delle polveri, si è passati a definire la *selective laser melting* (SLM) termine utilizzato dall'azienda SLM Solutions Group [5]. I diversi produttori coniarono il proprio nome per questa tecnica: *direct metal laser sintering* (DMLS) per EOS GmbH [6] oppure *LaserCUSING* per Concept Laser [7]. L'azienda tedesca EOS GmbH fu abile a preservare le personali metodologie di processo sviluppate su questa tecnica proteggendole con dei brevetti, attualmente è un'azienda leader della stampa 3D.



Figura 4. Schema selective laser sintering [8]

Attualmente ci sono diverse tecniche di additive manufacturing affermate sul mercato e molte altre ancora in via di sviluppo, di seguito è riportato uno schema delle principali.





Figura 5. Classificazione delle tecniche di AM in funzione dello stato del materiale di partenza

Recenti analisi di mercato sul panorama mondiale dell'additive manufacturing (hardware, software, materiali, servizi) mostrano una crescita bilanciata, raggiungendo nel 2018 circa 9,3 miliardi di dollari e registrando una crescita annuale del 18% si prevede il raggiungimento di circa 41 miliardi di dollari nel 2027 [9], di questi meno del 22% sono attribuibili al mercato del metallo per l'additive manufacturing [10].



Figura 6. Analisi di mercato e previsione di sviluppo dell'AM¹

¹ Questi dati non considerano l'impatto sull'economia del Covid-19, che ha generato un leggero calo di capitale investito (specialmente nel settore dedicato ai metalli) ma si prevede il completo recupero del gap economico rispetto alle analisi in oggetto in circa 10 anni [38].



La norma NF ISO/ASTM 52900 definisce l'additive manufacturing come "*il processo di collegamento di materiali che crea componenti a partire dai dati di un modello 3D, solitamente strato dopo strato, in contrasto con le metodologie di fabbricazione classiche e sottrattive*" [11].

Inizialmente l'additive manufacturing è stato concepito per ridurre i tempi per la realizzazione di prototipi e nel tempo ha assunto terminologie differenti in funzione della tipologia dei componenti prodotti: "*rapid prototyping*" se riferito alla produzione di prototipi in generale, "*rapid tooling*" in caso di produzione di inserti per stampi e "*rapid manufacturing*" in riferimento alla produzione di parti funzionali. Attualmente la realizzazione di prototipi è comunque l'applicazione principale dell'additive manufacturing.



Design for Additive Manufacturing e progettazione

La possibilità di fabbricare oggetti molto complessi geometricamente, ed allo stesso tempo funzionali nella loro applicazione, rende la progettazione del design l'elemento più impattante di tutto il processo a tal punto che l'insieme delle metodologie usate nell'ottimizzazione di un componente nella progettazione, per additive manufacturing, prende il nome di *Design for Additive Manufacturing* (DfAM).

In generale il DfAM non è sempre applicabile, ad esempio nelle applicazioni dove viene richiesto di replicare un componente, per la generazione di un prototipo o di un pezzo di ricambio, non ci sono margini per l'ottimizzazione del design poiché la geometria è fissata; mentre nelle applicazioni dove viene richiesta una progettazione di una nuova parte (oppure nella reingegnerizzazione di un componente esistente) la geometria non è vincolata (non completamente vincolata), allora in questi casi è possibile ottimizzare il componente sfruttando l'essenza di DfAM.

Concordemente al concetto di additive manufacturing, il DfAM è caratterizzato da diversi punti di forza:

massima leggerezza del componente

inserire il materiale minimo necessario per consentire al componente di sopportare gli sforzi a cui è sottoposto in condizioni di lavoro garantendone la funzionalità.



Figura 7. Ottimizzazione di una staffa automobilistica [12]



canali interni integrati nel profilo

possibilità di progettare canali di raffreddamento integrati nel componente (complessi, curvi, a sezione variabile) in modo da ottimizzare lo scambio termico.



Figura 8. otto canali di raffreddamento in uno stampo metallico [13]

integrazione di più funzioni

riduzione del numero delle parti in sistemi complessi: distinta base più semplice, riduzione del peso, riduzione dei tempi di montaggio, aumento dell'affidabilità e della sicurezza.



Figura 9. Scarico automobilistico prodotto da 3D Systems [14]



massima personalizzazione dell'oggetto

totale libertà di personalizzazione, proprietà fondamentale nel settore biomedicale nella produzione di protesi.



Figura 10. Protesi prodotta con tecnologie AM [15]

messa a punto delle proprietà meccaniche

con il controllo del processo e la scelta del materiale è possibile generare la microstruttura desiderata potendo così definire le caratteristiche meccaniche del prodotto.



Figura 11. Microstruttura di una pala di turbina riparata in punta per laser deposition [16]



porosità controllata

solitamente nella componentistica meccanica si tende a minimizzare la presenza di porosità all'interno dei pezzi ma in particolari applicazioni risulta utile controllarla, ad esempio per favorire l'osteointegrazione in ambito biomedicale.



Figura 12. Struttura lattice per impianti ortopedici [17]

Il DfAM sottolinea perfettamente quali sono i vantaggi di utilizzare le tecnologie di additive manufacturing e pone in evidenza come la complessità geometrica non ha ripercussioni sul costo di produzione di un componente, ma tale costo è imputabile solo al materiale ed alla quantità di pezzi da produrre (direttamente collegata anche al volume del pezzo da produrre), ne risulta un andamento praticamente opposto al costo di produzione di un componente prodotto con tecniche di fabbricazione tradizionali: più adatte a grandi volumi di produzione e meno economiche quando aumenta la complessità geometrica. Il concetto di *complexity for free* riassume queste considerazioni.



Figura 13. rapporto costo di produzione - complessità geometrica, cofronto tra AM e tecniche tradizionali [18]



Per le tecnologie di additive manufacturing, la tendenza è di incrementare la quantità e la velocità di produzione e di diminuire il costo del materiale e contemporaneamente migliorare l'integrazione dei controlli di qualità [19] coerentemente con gli obiettivi dell'industria 4.0.

La metodologia proposta dal DfAM, nella realizzazione del componente (nel caso più generale e comune di reingegnerizzazione di un prodotto già esistente), è suddivisa in tre parti principali: analisi del comportamento meccanico, ottimizzazione topologica e post processo.

analisi del comportamento meccanico

nella fase iniziale il componente viene modellato e preparato in software CAE, tenendo conto delle proprie condizioni di carico in funzionamento, per effettuare opportune analisi statiche, quasi-statiche e dinamiche (generalmente calcolate con il metodo degli elementi finiti implementato nella maggior parte dei software commerciali dedicati). Questa analisi fornisce informazioni anche riguardo alla correttezza del dimensionamento del componente originale rispetto alla condizione di esercizio.



Figura 14. Esempio di analisi di un componente automobilistico tramite il software Inspire [20]

ottimizzazione topologica

Costituisce la fase principale dove è necessario definire lo spazio totale di progettazione e quindi le superfici che possono essere modificate (zone di *design space*) ed è necessario individuare le zone che non possono essere riprogettate (zone di *non design space*) come, ad esempio, le zone di accoppiamento, le parti in cui agiscono le forze oppure zone che devono rispettare particolari condizioni geometriche. Inoltre, bisogna scegliere il materiale e definire un opportuno processo di AM in base alle specifiche di progetto da rispettare ed infine procedere all'ottimizzazione topologica del componente scegliendo i parametri da ottimizzare.





Figura 15. Esempio di definizione di design e non design space di un componente automobilistico tramite il software Inspire
[20]



Figura 16. Esempio di ottimizzazione topologica di un componente automobilistico tramite il software Inspire [20]

È interessante notare che l'ottimizzazione topologica genera una distribuzione di materiale ottimale rispetto ai flussi di tensione che il componente presenta sotto la specifica condizione di carico ma non garantisce il collegamento di tutte le zone di *non design space*, specialmente se quest'ultime presentano tensioni circa nulle. Infatti, nell'esempio mostrato in figura l'elemento cilindrico di *non design space* (in grigio cerchiato in verde) non è in contatto con il materiale generato dall'ottimizzazione topologica (in rosso scuro).



post processo

nella fase finale si passa alla modellazione CAD per completare il design del componente riferendosi opportunamente al risultato dell'ottimizzazione e si procede nuovamente all'analisi agli elementi finiti. Nel caso in cui il componente non soddisfi i requisiti di progetto oppure presenti delle criticità strutturali o funzionali è necessario ritornare allo step di modellazione CAD e correggere il componente secondo una procedura iterativa fino al raggiungimento delle specifiche desiderate ed alla verifica del comportamento meccanico; spesso il problema può risalire alla scelta del materiale e non alla modellazione CAD.

Definito quindi il design finale del componente riprogettato secondo le direttive del DfAM si può passare alle fasi della vera e propria fabbricazione del pezzo a partire dal modello CAD. Inizialmente si converte il modello CAD di tipo parasolid in formato STL il cui modello è di tipo *shell*, tale formato approssima la superficie del modello *shell* con dei triangoli di diverse dimensioni in funzione della risoluzione richiesta seguendone fedelmente il profilo. In seguito alla conversione si ricorre spesso ad errori sulla generazione dei triangoli ma, grazie alla diffusione di molti software correttivi, questo formato resta attualmente il più diffuso e affidabile nell'ambito della AM.



Figura 17. Esempio conversione in STL di un componente automobilistico [20]



Il file STL passa quindi in software dedicati allo scopo di essere elaborato e preparato per l'orientamento in macchina sulla piattaforma di costruzione in relazione al volume di lavoro e si generano i supporti.

I supporti sono elementi fondamentali in molte tecniche di AM che presentano molteplici scopi: collegare il componente in costruzione all'area di lavoro, supportare le parti sporgenti evitandone le possibili deformazioni, proteggere parti del componente da azioni durante la fase di costruzione che potrebbero comprometterne la corretta realizzazione. I supporti sono elementi che a valle del processo andranno rimossi quindi generalmente si cerca di orientare il pezzo in modo da dover mettere solo quelli essenziali.

Definito l'orientamento e generati i supporti il software procede con l'operazione di *slicing* con cui modello e supporti vengono intersecati con piani paralleli alla direzione di costruzione (asse z) distanti tra loro di una certa quantità che può essere fissa (costante) oppure può variare in funzione delle curvature delle superfici da costruire (adattativo) per ridurre l'eventuale eccessivo errore di forma, inevitabile e riferito alla risoluzione della macchina in termini di spessore di strato. I dati delle sezioni così ottenuti sono quelli direttamente utilizzati dalla macchina di AM per la generazione del pezzo.



Figura 18. Esempio messa in macchina e generazione dei supporti (in blu) di un componente automobilistico tramite il software Materialise Magics [20]







Figura 19. Differenza tra slicing costante e slicing adattativo

Terminato il processo di costruzione si provvede alla rimozione dei supporti, alla pulizia, ad eventuali trattamenti termici ed infine si effettuano operazioni di finitura superficiale.



Direct Metal Laser Sintering

La DMLS è una tecnica produttiva "*a letto di polvere*" in cui la realizzazione del componente avviene tramite l'interazione di una sorgente di energia laser con le particelle di materiale contenute nel sistema. Come accennato in precedenza, questa tecnica è conosciuta con diversi nomi dalle aziende produttrici che hanno sviluppato il proprio software macchina e, a volte, hanno modificato lievemente la struttura: sistema di approvvigionamento della polvere (sistema ad elevazione che fornisce la polvere dal basso o sistema di rifornimento che lascia cadere la polvere dall'alto) e organo di distribuzione della polvere (rullo "*roller*" o lama "*recoater blade*"); per ovvie questioni legate a brevetti sulla tecnologia ma nel funzionamento si tratta della stessa tecnica.



Figura 20. Schema direct metal laser sintering [21]

Processo

Il processo avviene in ambiente controllato con l'inserimento di gas inerte (solitamente Argon) per evitare fenomeni indesiderati di ossidazione durante la fusione del materiale e di innesco di incendio a causa della polvere infiammabile.

La temperatura della piattaforma di costruzione è mantenuta ad un valore abbastanza alto in modo da ridurre al minimo il salto termico durante la fase di fusione e raffreddamento di ogni strato. La lama (nello schema è indicato come rullo, ma nella pratica si tratta di una lama) distribuisce in modo omogeneo uno strato di polvere sulla piattaforma di costruzione, quindi il fascio laser, passando attraverso un sistema scanner di lenti $(f-\theta)$, viene deviato e focalizzato sullo strato di polvere in modo da poter fondere selettivamente la polvere e generare così la



sezione del componente. Completata una sezione la piattaforma si abbassa di una quantità pari allo spessore dello strato di polvere, il sistema di approvvigionamento (vasca contenente la polvere con la base che può muoversi verticalmente) fornisce ulteriore polvere e la lama, quindi, distribuisce lo strato successivo, la sequenza delle fasi si ripete fino al completamento del prodotto. Oltre alla vasca di rifornimento della polvere è presente anche una vasca di recupero che raccoglie la polvere in eccesso spostata dalla lama [22].

Generalmente vengono utilizzate polveri con granulometria compresa tra 15 – 45 µm [16] e gli spessori di strato distribuiti dalla lama più frequenti si aggirano tra 20 - 60 µm in base all'applicazione. Il volume di lavoro medio delle macchine per la produzione industriale si aggira intorno a valori di 400 mm x 400 mm x 400 mm (riferito a EOS GmbH [6]). Le tipologie di laser comunemente impiegate sono quelle a fibra ed a cristallo solido Nd-YAG che possono raggiungere potenze fino all'ordine dei kW (in commercio esistono anche tipologie di laser che permettono di lavorare con lunghezze d'onda minori rinunciando alle elevate potenze trasmesse come Cu-Vapor e Ti-Sapphire [23]). L'energia generata dal laser, oltre a fondere lo strato di materiale della sezione in costruzione, riesce anche a rifondere parzialmente la struttura precedentemente solidificata in modo da assicurare una corretta aderenza degli strati. I componenti prodotti sono caratterizzati da ottime proprietà meccaniche dovute ad una microstruttura particolarmente fine prodotta dal rapido raffreddamento delle porzioni di materiale fuso ma gli importanti gradienti di temperatura sviluppati e il ritiro volumetrico durante il raffreddamento inducono nel componente dilatazioni e contrazioni termiche che provocano l'accumulo di deformazioni plastiche, questo confluisce nella comparsa di pericolose tensioni interne nel componente. Inevitabilmente, le tensioni residue compromettono la durata a fatica del componente e possono influire negativamente sulla corretta realizzazione del pezzo. I supporti in questo processo hanno una particolare importanza perché bloccano le deformazioni del componente da ritiro di solidificazione, evitando difetti di distacco di strato, e permettono il controllo sulle tensioni interne attuando trattamenti termici di distensione prima della rimozione stessa dei supporti dal pezzo. I supporti vanno rimossi manualmente o nel caso in cui il pezzo sia direttamente costruito sulla piattaforma di base per estrusione si ricorre al taglio per elettroerosione (EDM).

In fase di progettazione bisogna considerare che il volume di lavoro delle macchine dichiarato dai produttori è quello totale comprensivo della zona dedicata alle viti di fissaggio della piattaforma di costruzione con la base mobile (zone ovviamente da tenere libere per permettere lo svitamento a fine processo) e comprensivo anche dell'altezza della piattaforma. Le superfici del pezzo da produrre inclinate rispetto al piano orizzontale di un angolo maggiore di 30° sono



autoportanti e non necessitano di supporti e generalmente presentano una rugosità superficiale maggiore a 12 μ m, mentre superati i 45° di inclinazione la rugosità risulta inferiore a quel valore. Le pareti sottili possono essere realizzate con spessore inferiore a 1 mm, ma in funzione ai parametri di processo ed al materiale scelto potrebbero risultare molto fragili quindi è consigliabile, in generale, non scendere sotto questo valore. Nel caso di componenti cavi o strutture *"shell"* è necessario prevedere delle aperture per permettere alla polvere non solidificata di fuoriuscire [19]. Le rugosità ottenibili a fine processo variano tra 5 – 18 μ m quindi è necessario prevedere del sovrametallo (0,5 – 1 mm) nelle zone di accoppiamento.

Parametri di processo

La qualità e le caratteristiche finali del componente sono influenzate dai parametri che governano il processo di fabbricazione. Non tutti i parametri di processo possono essere modificati (specialmente quelli legati alle proprietà fisiche del materiale utilizzato) e di seguito saranno trattati i principali parametri governabili dal progettista direttamente impostabili sulla macchina.

Potenza del laser

paramento di fondamentale importanza direttamente connesso alla densità del componente da realizzare. Il valore dipende dal materiale da processare, in particolare bisogna considerare anche la lunghezza d'onda del laser poiché ogni materiale assorbe l'energia emessa dalla fonte di energia in modo diverso a lunghezze d'onda differenti. In generale, i laser moderni possono superare il kW di potenza e maggiore è la potenza maggiore sarà l'energia trasmessa al materiale nell'intervallo di tempo in cui il fascio è in interazione con questo.

Una potenza troppo elevata può causare problematiche di *balling*: fenomeno indesiderato in cui avviene lo sviluppo di bolle nel materiale fuso che comporta una scorretta distribuzione del materiale negli strati in costruzione e quindi la scorretta realizzazione del prodotto.

Diametro del fascio

correlato alla potenza, il diametro del fascio laser è inversamente proporzionale alla quantità di energia trasmessa al materiale. La focalizzazione del laser viene controllata dal sistema di lenti f- θ . Concentrando l'energia del laser in una porzione di area ristretta è possibile aumentare la precisione geometrica delle parti da fondere nelle varie sezioni.



Velocità di scansione

rappresenta la velocità con cui il laser si muove sul piano di costruzione. Combinato con la potenza del laser e con il diametro del fascio caratterizza l'energia trasmessa nel materiale ad ogni strato e permette di ottimizzare la profondità di penetrazione di tale energia allo scopo di garantire la corretta adesione degli strati e poter controllare lo spessore di strato del processo.

Hatch distance

determina la distanza che intercorre tra i centri delle tracce del fascio laser tra due passate adiacenti sulla stessa sezione. Come per la velocità di scansione, più è alto il valore di questo parametro più la produttività aumenterà ma è necessario calibrare questo valore affinché il materiale venga fuso in modo corretto lungo tutta la sezione. Combinando questo parametro con la velocità di scansione, la potenza del laser ed il diametro di fascio si ha un buon controllo dell'energia trasmessa al materiale.

Spessore di strato

rappresenta la distanza tra gli strati lungo la direzione di costruzione. Analogamente ai precedenti parametri, maggiore è il valore dello spessore di strato maggiore risulta la produttività del processo a discapito della risoluzione.



Figura 21. Schema di alcuni parametri di processo per la DMLS [24]

Strategia di scansione

parametro fondamentale nella gestione del gradiente termico durante la fusione e la solidificazione del materiale sullo strato in costruzione, definisce il percorso del laser sulla sezione.





Figura 22. Alcune tra le principali tipologie di strategie di scansione: (a) a linee parallele, (b) a scacchiera o ad isola [25]

Orientamento di costruzione

rappresenta la disposizione del componente sulla piattaforma di costruzione. Questo aspetto influisce sulle proprietà microstrutturali e superficiali della parte, inoltre stabilisce la disposizione e la quantità dei supporti da utilizzare.

Supporti

la tipologia, la forma e la dimensione dei supporti influiscono sulla dissipazione del calore e controllano le tensioni residue determinando la qualità del processo produttivo.

Alcuni parametri riferiti alle proprietà del letto di polvere e alla piattaforma di costruzione come la temperatura sono controllabili, mentre le proprietà di interazione tra sistema e materiale e le proprietà intrinseche del materiale sono inevitabilmente fissate alla scelta del materiale risultando non controllabili.

Finitura superficiale

In generale la finitura superficiale, oltre che per migliorare la funzionalità di un componente, viene effettuate anche per scopi estetici, per migliorare le proprietà tribologiche ed aumentare la vita a fatica del pezzo; infatti, spesso l'innesco delle cricche si localizza sulla superficie esterna dei componenti, quindi ridurre la rugosità superficiale significa diminuire le irregolarità che sono zone di concentrazione di tensioni. Minore è la rugosità che si vuole ottenere maggiori saranno i costi associati, dunque è fondamentale valutare le superfici che effettivamente necessitano di questo trattamento [19].

Di seguito sono riportati i principali metodi di finitura superficiale per i metalli:

- Lappatura
- Pallinatura (Shot peening)



- Burattatura
- Abrasive Flow Machining (AFM)
- Magnetic Abrasive Finishing (MAF)
- Thermal Energy Method (TEM)
- Electro Chemical Machining (ECM)
- CoolPulse
- CNC

Sono di notevole interesse il processo di pallinatura che inducendo una deformazione plastica a freddo, tramite l'impatto controllato e localizzato di sfere in base al materiale da trattare, genera nel componente uno stato di compressione interno che favorisce la vita a fatica del componente ed il processo di AFM che permette, agevolmente, la finitura di parti cave, di fori e tubazioni tramite una pasta abrasiva applicata ad alta pressione.

Materiali

I materiali utilizzati nel DMLS risultano uno degli aspetti critici del processo poiché la varietà di leghe processate e commercializzate è attualmente limitata (anche se lo sviluppo di nuovi materiali è in continua crescita), inoltre il costo per l'atomizzazione del materiale nella polvere della giusta dimensione e qualità va ad aggiungersi a quello del materiale stesso. Infine, le aziende produttrici assicurano la manutenzione delle macchine solo nel caso in cui si usi la polvere fornita dalla stessa azienda, politica che non permette una totale libertà di personalizzazione di questo aspetto.

Di seguito sono riportati i materiali processabili con questa tecnica [26]:

- Leghe di Alluminio
- Leghe di Titanio
- Leghe base Ferro
- Leghe base Rame
- Leghe base Nickel
- Leghe Magnesio
- Leghe Cobalto-Cromo
- Leghe Tungsteno
- Argento e Oro



Generazione dei difetti

Difetti associati a componenti in lega di alluminio prodotti per DMLS

Similmente ai processi di fusione e saldatura, i principali difetti identificati nei componenti in alluminio prodotti per DMLS sono classificabili in quattro categorie: porosità, qualità superficiale, anisotropia indotta nel materiale e i difetti riferiti ai fenomeni di innesco delle cricche a caldo [27].



Figura 23. Classificazione dei difetti principali nei componenti in alluminio prodotti per DMLS

Nella trattazione si approfondiranno gli aspetti legati ai difetti di porosità e le relative cause della formazione. I pori interni sono, infatti, difetti di rilevante importanza dei pezzi prodotti per DMLS inquanto incidono sulla densità, proprietà correlata alla "salute" del materiale e di conseguenza alle caratteristiche generali del componente.

La dimensione e la forma delle porosità dipendono dal fenomeno che le ha generate:

- pori metallurgici, generati sia dall'assorbimento di gas (N, O e H) nell'ambiente di lavoro oppure dall'evaporazione di alcuni elementi in lega (Mg)
- pori da parametri, generati dal processo stesso (in particolar modo dai parametri controllabili)

le porosità di grandi dimensioni, dette macroporosità, sono più pericolose rispetto a quelle di dimensioni ridotte, microporosità. Inoltre, se un macroporo non è perfettamente sferico risulta essere un'ottima sede di innesco di cricche che portano il componente a rottura; allora la fragilità di un componente è direttamente proporzionale alla quantità di macropori presenti al suo interno. Generalmente i micropori, durante i trattamenti termici, hanno la tendenza a crescere ed unirsi tra loro formando macroporosità di forma aciculare e quindi critiche per il componente.

Le cause della formazione di porosità studiate in letteratura sono schematizzate di seguito.





Figura 24. Classificazione delle cause della formazione di porosità nei componenti in alluminio prodotti per DMLS



Effetto dei parametri di processo

Durante la fabbricazione di un componente per DMLS vengono individuati svariati parametri di processo, tra questi solo alcuni sono considerati controllabili e quindi direttamente modificabili durante il processo. Un indice fondamentalmente importante di valutazione e che influisce fortemente sulle proprietà del componente è l'energia specifica del laser ψ [28] che viene definito come combinazione di quattro paramenti di processo secondo la seguente relazione

$$\psi = \frac{P}{v \ h \ d}$$

dove *P* è la potenza del laser (W), *v* coincide con la velocità di scansione del laser (mm/s), *h* corrisponde alla *hatch distance* (mm) mentre *d* è lo spessore dello strato di polvere depositato (mm). Il controllo della porosità rispetto ai parametri di processo si basa principalmente sull'ottimizzazione dell'energia specifica del laser, in particolare alcuni studi dimostrano che la potenza del laser e la velocità di scansione influenzano maggiormente il livello porosità [29]. Infatti, la densità relativa di una parte prodotta (senza post trattamenti) diminuisce sia all'aumentare che al decrescere dell'energia specifica del laser rispetto al valore ottimo. Quando la densità di energia è troppo bassa, nel componente le porosità sono associabili alla fusione incompleta dello strato di polvere causate, appunto, dall'insufficiente energia trasmessa. I pori, così generati, sono caratterizzati da una forma irregolare e presentano residui di particelle di polvere non fuse all'interno. Nel caso in cui la densità di energia sia troppo elevata, sono stati riscontrati pori di forma sferica con le caratteristiche morfologiche di difetti dovuti all'intrappolamento di gas. Queste porosità sono attribuibili sia all'Argon presente nella camera di lavoro in contatto con il flusso attivo del metallo fuso sia all'Idrogeno disciolto durante la fusione.

Per quanto riguarda l'aspetto legato al gradiente termico indotto nel componente in costruzione, la porosità viene prodotta nel caso in cui lo stesso gradiente termico non è omogeneo generando raffreddamenti localizzati e ritiri volumetrici discordanti nel materiale. Risulta un concetto delicato, in parte governabile dalla strategia di scansione, la cui scelta è ovviamente funzione anche della geometria del pezzo da produrre. Durante la fusione avvengono contemporaneamente scambi termici conduttivi, convettivi e per irraggiamento tra il materiale, l'ambiente e la pozza di fusione. Questo rende necessaria l'integrazione di un dispositivo di controllo continuo sulla pozza di fusione per garantire la qualità del pezzo da produrre e la sua corretta costruzione nel tempo.





Figura 25. Schema dei fenomeni di scambio termico durante la fusione [27]

La generazione dei difetti correlati all'orientamento del pezzo sulla piattaforma di costruzione è causata dall'anisotropia strutturale, in particolare dalle tensioni residue ad essa associate. Inoltre, è stato osservato che un componente fabbricato, tendenzialmente, lungo la direzione di costruzione (verticale) presenta un modulo elastico minore rispetto allo stesso componente orientato in una direzione parallela alla base del sistema (orizzontale) [30]. Una possibile spiegazione è da ricercare nei legami dei bordi generati dalla pozza di fusione [31]:

- orientamento verticale, l'ampio legame di bordo (maggiormente presente) tra la traccia dello strato e quella dello strato precedente è caratterizzata da una grande quantità di superfici di scorrimento, quindi buona duttilità.
- Orientamento orizzontale, il legame di bordo (maggiormente presente) tra la traccia e quella adiacente nello stesso strato è caratterizzato da una quantità minore di superfici di scorrimento, quindi minore duttilità.




Figura 26. Tipologie di orientamento del pezzo sulla piattaforma di costruzione: (a) verticale con base parallela la piano yz, (b) orizzontale con base parallela al piano xy, (c) orizzontale con base parallela al piano yz [25]



Figura 27. Superfici di scorrimento dei legami della traccia del pozzo di fusione:(a) traccia del pozzo di fusione, (b) superficie di scorrimento strato precedente-successivo, (c) superficie di scorrimento sullo stesso strato [25]



Influenza del materiale

Alcuni studi hanno rilevato che certi parametri riguardanti le caratteristiche della polvere prima dell'inizio del processo sono impattanti sulla qualità del componente finito e quindi sulla generazione di difetti [32]:

- la fluidità della polvere, una bassa fluidità comporta una cattiva distribuzione della polvere negli strati da processare
- l'igrometria della polvere, anche il livello di umidità genera problemi sulla distribuzione della polvere
- l'elemento di distribuzione, compattando la polvere in maniera leggermente differente

In generale, la presenza di impurità ed il grado di ossidazione del materiale sono i maggiori responsabili della comparsa di difetti, per quanto riguarda l'aspetto del materiale, ma anche la possibile evaporazione degli elementi in lega nel caso in cui la temperatura di fusione superi la temperatura di vaporizzazione propria dell'elemento legante.

Infine, la formazione dei difetti interni può essere causata anche dal basso assorbimento di energia per la riflettività del materiale dovuta alla sua composizione, geometria ed eventuale ossidazione iniziale della polvere oppure dalla lunghezza d'onda del laser non coerente con il materiale stesso.

La lega AlSi10Mg

Appartenente alla serie 4000 delle leghe di alluminio (il cui elemento legante principale è il silicio) è nata per essere processata con questa tecnologia e fa, quindi parte, delle leghe di alluminio più sviluppate e adottate per DMLS.

Alle proprietà peculiari dell'alluminio tra cui l'elevata conducibilità termica, la bassa densità e la sua capacità di passivazione, con la quale limita i fenomeni di ossidazione ad un sottile strato superficiale esterno evitando l'ossidazione del materiale interno (caratteristiche dell'alluminio puro), vanno ad aggiungersi le proprietà conferite dal silicio che, principalmente, migliora la saldabilità e la fluidità della lega, riduce il coefficiente di dilatazione termica inoltre, grazie anche alla presenza di magnesio che permette il trattamento termico T6, ne aumenta la durezza e le caratteristiche meccaniche tramite il meccanismo di rafforzamento per dispersione di particelle di silicio comprese tra 1 μ m e 10 μ m ed il meccanismo di rafforzamento più efficace per precipitazione di ferro al di sotto di 0,2% poiché conferisce fragilità alla lega con la formazione del composto Al₅FeSi aghiforme, è possibile alleviare l'effetto negativo del ferro



con l'aggiunta di manganese che genera un cambiamento morfologico del composto in una forma meno pericolosa α -Al₅FeSi detta "a scrittura cinese".

La capacità di evitare la porosità da ritiro offerta dal silicio rende la lega adatta a costruire geometrie a parete sottile.

Le caratteristiche di elevata resistenza e duttilità combinate ad una densità bassa permettono a questa lega di soddisfare i requisiti per importanti applicazioni in aeronautica e nel settore automobilistico [33].

Densità a 20°C	$2,7 \text{ kg/dm}^3$
Temperatura di fusione	660 °C
Temperatura di evaporazione	2450 °C
Calore specifico	94 kj/kgK
Calore latente di fusione	394,5 kj/kg
Coefficiente di espansione lineare	2,4 10 ⁻⁵ 1/K
Resistività elettrica	2,8 10 ⁻⁸ Ωm
Modulo di Young	70 GPa
Coefficiente di Poisson	0,35
Tensione di rottura a trazione	70 MPa
Tensione di snervamento	30 MPa
Tensione di rottura a compressione	30 MPa
Durezza Vickers	30 HV
Allungamento	2%

Tabella 1. Proprietà principali dell'alluminio [16]

Tabella 2. Composizione della lega AlSi10Mg [16]

elemento	Si	Fe	Mg	Mn	Ti	Zn	Cu	Al
peso %	9-11	$\leq 0,55$	0,2-0,45	≤0,45	≤0,15	≤ 0,1	≤ 0,05	rimanente



Cu	-	aumenta la resistenza a trazione, la resistenza a fatica e la durezza della lega
		tramite il rafforzamento per soluzione solida
	-	permette il rafforzamento per precipitazione
	_	diminuisce la duttilità della lega
	-	riduce la resistenza alla corrosione
Mg	_	rafforza la lega per soluzione solida senza peggiorare significativamente la
		duttilità
	_	in presenza di Si o Zn permette il rafforzamento per precipitazione
Si	-	migliora la colabilità della lega grazie all'aumento di fluidità ed al minore
		ritiro da solidificazione
	-	aumenta le proprietà meccaniche della lega
	-	migliora la resistenza all'usura abrasiva
	_	in combinazione con il Mg permette il rafforzamento per precipitazione
Mn	_	rafforza la lega per soluzione solida e per dispersione
	-	migliora la resistenza a fatica a basso numero di cicli
	-	aumenta la resistenza alla corrosione
	_	migliora la duttilità modificando la forma del composto intermetallico
		Al ₅ FeSi prodotto dal Fe
Zn	_	in combinazione con Mg o Mg-Cu permette il rafforzamento per
		precipitazione
		aumenta la propensione della lega alla rottura per stress corrosivo
Fe	_	aumenta la resistenza con la formazione di composti intermetallici Al-Fe
		riduce la duttilità (in molte leghe di Al il Fe è un'impurità indesiderata)

Tabella 3. Effetto dei principali elementi in lega nelle leghe di alluminio [16]

Tipicamente la polvere viene prodotta per gas atomizzazione, caratterizzata da una forma sferica. La dimensione della polvere di AlSi10Mg prodotta per le tecnologie di additive manufacturing varia da 1 μ m a 35 μ m con una media intorno a 23 μ m, gli agglomerati di particelle più grandi possono superare i 40 μ m.





Figura 28. Immagine FESEM della polvere di Alsi10Mg prodotta per gas atomizzazione [25]

In accordo con il diagramma di fase Al-Si ed i valori in peso degli elementi leganti, la lega AlSi10Mg ha una composizione ipoeutettica (molto prossima alla composizione eutettica caratterizzata da una presenza di Si di circa 12,5% in peso) con una temperatura di fusione di circa 577 °C.



Figura 29. Diagramma di fase Al-Si [34]

Per definire la microstruttura è utile fare riferimento, ad esempio, al processo di raffreddamento e solidificazione della lega: partendo dalla totale presenza di liquido e raffreddando, giungendo alla formazione delle prime particelle di α (Al con Si disciolto) appena superata la curva di liquidus della zona L+ α , continuando a raffreddare le particelle α proeutettiche potranno



crescere di dimensione (con forma dendritica per raffreddamenti veloci e con forma abbastanza globulare per raffreddamenti più lenti) fino al raggiungimento della temperatura eutettica, oltre quella soglia la restante parte di liquido solidificherà con una struttura di α +Si che ne determinerà la matrice. Inoltre, a causa del diverso gradiente termico e tempo di raffreddamento la microstruttura della lega nel processo di DMLS risulta più fine rispetto al classico processo di colata ed in quest'ultimo caso le particelle α proeutettiche hanno una forma molto regolare.



Figura 30. Immagini micrografiche della struttura classica per colata della lega AlSi10Mg [16]



Figura 31. Confronto della microstruttura della lega AlSi10Mg per colata (a) e per DMLS (b) [16]

Alcuni studi condotti su prove sperimentali [34] mostrano il comportamento della microstruttura della lega in diverse condizioni di realizzazione. I provini sono stati prodotti per SLM con i seguenti parametri di processo:

- potenza del laser di 250 W
- diametro del laser di 0,2 mm
- spessore di strato di 50 μm
- velocità di scansione di 500 mm/s
- hatch distance di 0,15 mm



- Argon come gas di copertura

alcuni provini analizzati hanno subito un trattamento termico T6 alle seguenti condizioni:

- solubilizzazione per 6 h a 525 °C
- tempra in acqua a temperatura ambiente
- invecchiamento artificiale per 7 h a 165 °C

sono stati analizzati 91 provini realizzati in diverse condizioni:

- diversa temperatura della piattaforma di costruzione (30 °C e 300 °C)
- senza post trattamento (as-built) oppure con trattamento T6
- diversa direzione di costruzione $(0^\circ, 45^\circ e 90^\circ)$ come illustrato in figura



Figura 32. Direzione 0° (a), direzione 45° (b) e direzione 90° (c) [34]

Le combinazioni di condizioni rispetto ai gruppi di provini analizzati sono riportati di seguito

Batch number	Amount of samples	Platform temperature (°C)	Building direction (°)	Peak- hardened (T6)
#10	12	30	0	Yes
#11	10	30	90	Yes
#12	10	30	45	Yes
#13	9	300	0	No (as-built)
#14	10	300	0	Yes
#15	10	300	90	No (as-built)
#16	10	300	90	Yes
#17	10	300	45	No (as-built)
#18	10	300	45	Yes

Figura 33. Schema delle condizioni dei gruppi di provini [34]



È stato scelto di adottare il trattamento termico T6 perché produce un aumento delle caratteristiche meccaniche di resistenza tramite il rafforzamento per precipitazione mantenendo un adeguato allungamento a rottura.

Le micrografie sono perpendicolari all'asse longitudinale dei provini.



Figura 34. Gruppo #12: 30°C / 45° / T6 (lucidato, non intagliato)



Figura 35. Gruppo #17: 300°C / 45° / as-built (lucidato, non intagliato)





Figura 36. Gruppo #10: 30°C / 0° / T6



Figura 37. Gruppo #11 (prima del trattamento T6): 30°C / 90° / as-built



Figura 38. Gruppo #11: 30°C / 90° / T6





Figura 39. Gruppo #13: 300°C / 0° / as-built



Figura 40. Gruppo #14: 300°C / 0° / T6

Per analizzare la porosità sono stati presi in considerazione i gruppi dei provini lucidati e non intagliati (Figura 34 e Figura 35). La porosità è visibile in entrambi i gruppi con pori generalmente sotto i 300 µm con una densità dei provini comunque superiore al 99%.

Coerentemente con il diagramma di fase la microstruttura è caratterizzata dalla composizione della matrice prevalentemente di alluminio α (parte chiara) e di particelle di silicio eutettico (parte scura), inoltre posso essere presenti composti intermetallici in piccola quantità.

La microstruttura dei provini nella condizione as-built (senza post trattamento) è formata da dendriti di alluminio α e da particelle di silicio interdendritiche. La traccia del laser e la zona termicamente alterata risultano visibili determinando una microstruttura non omogenea (Figura 37 e Figura 39).

Dopo il trattamento T6, le particelle di silicio hanno assunto una forma più globulare. La traccia del laser e la zona termicamente alterata non sono più visibili e non si notano sostanziali differenze tra i provini nelle direzioni 0°, 45° e 90°, la microstruttura risulta omogenea.



Infine, delle prove effettuate sul comportamento a fatica dei provini hanno evidenziato che:

- la combinazione del trattamento T6 con la temperatura della piattaforma di 300 °C è un ottimo modo di aumentare la resistenza a fatica (anche la resistenza statica a trazione) senza presentare differenze nel comportamento rispetto agli angoli di direzione in esame (0°, 45° e 90°)
- nonostante la porosità e le imperfezioni osservate, la resistenza a fatica dei provini è molto elevata rispetto alla classica lega DIN EN 1706 [34]

come già evidenziato i trattamenti termici sono utili a distendere le tensioni residue accumulate durante il processo di DMLS a causa dei grandi gradienti termici in gioco. Dunque, per evitare la distorsione dimensionale del componente, prima della rimozione dalla piattaforma di costruzione, è importante prevedere un trattamento di ricottura che garantisce una buona stabilità del pezzo. Successivamente si procede con il raffreddamento in forno o in aria.

È interessante comprendere come i trattamenti termici influiscono sulle proprietà meccaniche generali della lega.

In generale oltre alla ricottura ed al trattamento termico T6 discusso in precedenza, un altro trattamento termico presente in letteratura molto comune per questa lega prodotta per tecnologie additive risulta il trattamento T4 che differisce dal T6 unicamente per la fase di invecchiamento, che avviene in modo naturale (e non artificialmente).

Di seguito sono riportati i risultati di alcuni studi per caratterizzare le proprietà meccaniche (classica prova a trazione) in base al post trattamento [16].

	51 520 0 G
ricottura	- per 5 h a 530 °C
	 raffreddamento in forno
T4	 solubilizzazione per 5 h a 530 °C
	 tempra in acqua a temperatura ambiente
	- invecchiamento per 2 settimane a temperatura ambiente
T6	 solubilizzazione per 5 h a 530 °C
	 tempra in acqua a temperatura ambiente
	 invecchiamento artificiale per 12 h a 160 °C

Tabella 4. Dettagli specifici dei trattamenti termici adottati



trattamento	Rp _{0.2} (MPa)	UTS (MPa)	Allungamento %	Durezza (HV)
as-built	240 ± 8	330 ± 4	5,2 ± 0,4	105 ± 5
ricottura	72 ± 7	113 ± 3	12,6 ± 0,9	46 ± 3
T4	131 ± 9	227 ± 4	$6,9 \pm 0,8$	89 ± 7
T6	245 ± 8	278 ± 2	$3,6 \pm 0,8$	119 ± 6

Tabella 5. Risultati ottenuti dai diversi trattamenti termici sulle caratteristiche meccaniche della lega

Tutti i trattamenti termici riducono la resistenza a rottura della lega rispetto alla condizione asbuilt, in particolare la ricottura la riduce del 66% ma aumenta l'allungamento a rottura del 103%. L'unico miglioramento meccanico osservato è sulla tensione di snervamento che nel trattamento T6 supera leggermente la configurazione as-built (effetto riscontrabile anche nella durezza).



Figura 41. Confronto dei risultati sul diagramma tensione-deformazione



Analisi dei difetti

Realizzazione dei provini

Il componente standard viene prodotto in lega di alluminio forgiata per Cobapress (un processo di forgiatura molto usato nell'industria automobilistica che aumenta le caratteristiche di resistenza statiche e la vita a fatica del componente rispetto alla semplice colata, inoltre ne migliora anche la finitura superficiale) mentre la riprogettazione prevede l'utilizzo della lega AlSi10Mg adottando la tecnica DMLS, trattate in precedenza.

I provini sono stati realizzati sia su una EOS M 290 e sia su una EOS M 400-4 allo scopo di valutare le divergenze nella generazione dei difetti tra le macchine in modo da poter pianificare, eventualmente, l'integrazione della EOS M 400-4 nella produzione. Infatti, la macchina EOS M 400-4 è nata con lo scopo di aumentare i volumi produttivi della EOS M 290 mantenendone le caratteristiche, la sostanziale differenza tra le due macchine riguarda il volume di lavoro e il numero di sorgenti laser che possono lavorare contemporaneamente durante la costruzione.





Figura 42. EOS M 290 (a sinistra) e EOS M 400-4 (a destra) [6]

Volume di costruzione	250x250x325 mm	Volume di costruzione	400x400x400 mm
Tipologia di laser	Yb fibra, 400 W	Tipologia di laser	Yb fiber, 400 W x4
Precisione ottica	Lente f-0	Precisione ottica	Lente f-0 x4
Velocità di scansione	7 m/s	Velocità di scansione	7 m/s
Diametro del laser	100 µm	Diametro del laser	100 µm
Software	EOSPRINT	Software	EOSPRINT

Figura 43. Caratteristiche principali delle macchine [6]

In particolare, nella EOS M 400-4 i 4 laser lavorano su 4 settori distinti del piano di costruzione ma nelle zone di confine è previsto spazio di sovrapposizione raggiungibile da più sorgenti laser



(overlapping) generalmente di 50 mm di spessore. Con lo stesso termine si indica anche l'evento in cui un componente o una parte di esso durante la costruzione abbia sentito l'effetto di più di un laser, non necessariamente l'apporto diretto del fascio laser ma anche solo l'effetto termico che induce. Di seguito è riportata una schematizzazione.



Figura 44. Zone di controllo dei laser della EOS M 400-4 e zone di overlapping

Si noti come la zona centrale del piano di costruzione è raggiungibile da tutti i laser.

Nell'analisi è stata indagata anche l'influenza dell'overlapping sui difetti dei provini in cui questo fenomeno si è verificato.

Come ultima variabile di confronto sui difetti tra i provini nel sistema, sono state scelte due disposizioni di quest'ultimi sulla piattaforma di costruzione che denomineremo come "testa" e "gamba", nomenclatura presente anche nel nome dei provini e che utilizzeremo nella trattazione.

I componenti sono stati fabbricati con un valore di energia specifica del laser (ψ) di circa 25 J/mm³ e dalle prove di caratterizzazione delle proprietà meccaniche su alcuni di essi, i valori ottenuti sono confrontabili e coerenti con quelli di riferimento trattati nel precedente capitolo.

Sono stati analizzati al tomografo dodici provini ottenuti da porzioni di sei componenti, isolando la zona in cui i componenti subiscono la rottura più frequentemente. A causa di un errore di lettura di alcuni strati nella conversione dal tomografo non è stato possibile generare il modello per uno dei dodici provini quindi l'analisi statistica dei dati è stata effettuata su undici provini.



La nomenclatura dei provini è formata da cinque parti sequenziali:

- 1) "numero (da 1 a 6) D" che indica il campione di riferimento da cui sono stati estratti i relativi provini
- 2) "testa/gamba" che indica la disposizione durante la costruzione del campione di riferimento
- "M290/M404" che indica la macchina utilizzata per la generazione del campione di riferimento
- 4) "_1/_2" per la distinzione dei provini provenienti dallo stesso campione
- 5) "ov" per i provini in cui si è verificato il fenomeno dell'overlapping

Di seguito viene proposta una tabella riassuntiva dei provini analizzati al tomografo in riferimento alle condizioni di realizzazione (per tutti i provini lo spessore di strato è pari a 60 µm).

campione	orientamento	macchinario	overlapping
1D	Testa	M400-4	Si
1D	Testa	M400-4	Si
2D	Gamba	M400-4	Si
$2D^2$	Gamba	M400-4	Si
3D	Testa	M400-4	No
3D	Testa	M400-4	No
4D	Gamba	M400-4	No
4D	Gamba	M400-4	Si
5D	Testa	M290	No
5D	Testa	M290	No
6D	Gamba	M290	No
6D	gamba	M290	No

Tabella 6. Sintesi dei provini analizzati

² Questo provino non è stato analizzato per il motivo precedentemente discusso.



Tomografia computerizzata industriale e raccolta dei dati grezzi

La tomografia computerizzata industriale è un sistema di analisi di strutture interne ed esterne della tipologia non distruttiva (cioè che non danneggia il componente durante l'analisi) che utilizza una sorgente di raggi X. La sua principale applicazione in ambito meccanico è quella di individuare, analizzare e mappare la difettologia di un componente.

La sorgente di raggi X (fissa) investe l'oggetto in esame che è normalmente bloccato su di una piattaforma mobile e diametralmente opposto alla sorgente è presente un detector che ha la funzione di acquisire le informazioni delle radiazioni ricevute in ingresso al fine di generare le immagini. La piattaforma su cui è fissato l'oggetto da scansionare è libera di ruotare e di traslare sia per permettere la scansione completa dell'oggetto da tutte le angolazioni in funzione del numero di immagini da acquisire (rotazione e traslazione verticale) sia per calibrare la giusta distanza rispetto alla sorgente di raggi X per ottimizzare la qualità delle immagini.

Dopo l'acquisizione delle immagini il tomografo rielabora le informazioni e ricostruisce il modello 3D dell'oggetto con annessi i difetti.



Figura 45. Schema del processo di funzionamento del tomografo [35]

La potenza della sorgente a raggi X dipende dai valori impostabili di corrente e voltaggio (che vanno definiti in funzione della dimensione e del materiale dell'oggetto) ed è inversamente proporzionale alla nitidezza sulle immagini acquisite. Per ovviare a questo problema nei casi in cui è necessaria una determinata potenza per una corretta penetrazione dei raggi X nell'oggetto si utilizzano dei filtri che accentuano il contrasto e migliorano l'acquisizione delle immagini.

In generale, la tomografia computerizzata è una tecnica relativamente costosa e necessita di tempi lunghi per analizzare completamente un oggetto ma produce risultati ad alta risoluzione senza dover compromettere il componente.



Il tomografo utilizzato nello studio è il Phoenix v|tome|x della serie S prodotto da General Electric, presente al centro interdipartimentale Integrated Additive Manufacturing del Politecnico di Torino.



Figura 46. Tomografo Phoenix v|tome|x S [36]

È un macchinario ad alta risoluzione particolarmente versatile grazie alla possibilità di equipaggiare sia un tubo nanofocus (180 kV / 15 W) sia un tubo microfocus (240 kV / 320 W) per ispezionare oggetti a diverse risoluzioni. Inoltre, assicura un'alta qualità nella ricostruzione dei volumi grazie all'implementazione di software di correzione e calibrazione automatica. Raggiunge risoluzioni in voxel dell'ordine del micron, la dimensione massima dei pezzi scansionabili è di 420 mm in altezza e 260 mm di diametro per un peso massimo di 10 kg.

Dopo l'acquisizione e la ricostruzione è stato utilizzato il software VG Studio Max (Volume Graphics) per effettuare le analisi di misura desiderate ad elevata precisione per la caratterizzazione dei difetti, secondo potenti algoritmi metrologici. In particolare, è stata utilizzata la funzione "Porosity/inclusion analysis (VGDefX/Only threshold)" capace di analizzare le porosità e le inclusioni, generando dei parametri che descrivono la geometria, la dimensione e la posizione dei difetti nel modello [37].

I dati generati dal software sono stati esportati in formato CSV su Excel per permettere un'analisi statistica più approfondita.

Ad ogni difetto individuato in ogni provino sono associati diversi dati il cui significato è spiegato di seguito.



Probability

Indica la probabilità che l'anomalia analizzata sia un difetto.

Raggio (mm)

Indica il raggio della sfera circoscritta al difetto.

Diametro (mm)

Indica il diametro della sfera circoscritta al difetto.

Centro x/y/z (mm)

Indica la posizione del centro della sfera circoscritta al difetto rispetto al sistema di riferimento scelto.

Volume (mm³) Indica il volume del difetto.

Voxel Indica il numero di voxel di cui il difetto è composto.

Superficie (mm²) Indica l'area superficiale del difetto.

Classificazione

Indica la posizione relativa del difetto rispetto ad una entità selezionata (è possibile selezionare l'entità nella sezione "edge distance calculation" alla voce "reference field").

Gap (mm)

Indica la distanza tra la superficie della sfera circoscritta la difetto in esame e quella del difetto ad esso più vicino.

Compattezza (%)

Indica il rapporto tra il volume del difetto e il volume della corrispondente sfera circoscritta.

$$compattezza = \frac{V_{difetto}}{V_{sfera}}$$



Sfericità (%)

Indica il rapporto tra la superficie di una sfera avente lo stesso volume del difetto e la superficie del difetto.

$$sfericita = \frac{A_{sfera}}{A_{difetto}}$$

Posizione x/y/z (mm)

Indica la posizione del voxel più luminoso del difetto.

Dimensione proiettata x/y/z (mm)

Indica la proiezione lineare del difetto rispetto ai piani individuati dal sistema di riferimento.



Figura 47. Illustrazione della dimensione proiettata

PCA deviation 1/2/3 (mm)

Indica la deviazione standard sui tre assi ortogonali calcolati con la *Principal Component Analysis* (PCA), la direzione 1 indica la direzione per cui i difetti risultano più concentrati mentre la direzione 2 e 3 vanno a completare la terna destrorsa di questo riferimento (la componente 3 risulta quella con la minore concentrazione di difetti). Le deviazioni standard risultano quindi la radice quadrata dei rispettivi autovalori.

PCA max deviation ratio (%)

Indica il rapporto tra la deviazione standard sulla direzione principale maggiore (PCA deviation 1) ed il raggio della sfera circoscritta la difetto.

$$PCA \max deviation ratio = \frac{PCA \ deviation \ 1}{R_{sfera}}$$



PCA min deviation ratio (%)

Indica il rapporto tra la deviazione standard sulla direzione principale minore (PCA deviation 3) ed il raggio della sfera circoscritta al difetto.

$$PCA \min deviation ratio = \frac{PCA \ deviation \ 3}{R_{sfera}}$$

Min gray value

Indica il valore minimo di grigio presente all'interno del difetto.

Max gray value

Indica il valore maggiore di grigio presente all'interno del difetto.

Mean gray value

Indica il valore intermedio di grigio presente all'interno del difetto.

Deviation of gray values

Indica la deviazione standard dei valori di grigio presenti all'interno del difetto.

Label

Assegna valori interi consecutivi ad ogni difetto del provino allo scopo di etichettarli.

Min thickness (mm)

Indica il minimo spessore di parete coperto dal difetto.

Max thickness

Indica il massimo spessore di parete coperto dal difetto.

Mean thickness

Indica lo spessore di parete intermedio coperto dal difetto.



Diametro relativo

Indica il rapporto tra il diametro della sfera circoscritta al difetto e il minimo spessore di strato coperto dal difetto.

 $diametro\ relativo = rac{diametro}{\min\ thickness}$

Cut surface (mm²)

Indica la parte di superficie di intersezione tra il difetto e l'entità di riferimento selezionabile.

Min edge distance inside (mm)

Indica la distanza la minima distanza tra la superficie del difetto e l'entità di riferimento selezionabile (quando il difetto è classificato come interno).

Min edge distance outside (mm)

Indica la distanza la minima distanza tra la superficie del difetto e l'entità di riferimento selezionabile (quando il difetto è classificato come esterno).

Max edge distance cut (mm)

Indica la distanza la massima distanza tra la superficie del difetto e l'entità di riferimento selezionabile (quando il difetto interseca tale entità, quindi classificato come intersecante).

Area proiettata yz/xz/xy (mm²)

Indica la proiezione dell'area del difetto rispetto ai piani individuati dal sistema di riferimento.



Figura 48. Illustrazione dell'area proiettata



Descrizione

Spazio che permette di inserire una descrizione per il componente.

Immagine

Spazio che permette di allegare un'immagine e una descrizione dell'oggetto.

Immagine zoomata

Funzione identica alla precedente ma permette di effettuare un ingrandimento su un particolare.

Catture

Indica il numero di immagini catturate per questo oggetto.

Nel nostro caso non essendo stata identificata l'entità di riferimento alcuni dati di output risultano evidentemente vuoti.



Analisi dei dai e creazione del database

L'analisi dei difetti è stata effettuata su Excel ed è incentrata principalmente sui dati raccolti che definiscono le informazioni geometriche generali del difetto, potendo così valutare la distribuzione sulla dimensione e sulla forma al variare delle condizioni di produzione.

L'approccio utilizzato è l'analisi statistica descrittiva e tra i dati forniti dal tomografo sono stati scelti quelli maggiormente rilevanti e coerenti con gli aspetti dimensionali (diametro) e geometrici (sfericità e compattezza).

Nella generazione dei grafici di distribuzione è stato scelto un passo costante di 0,05 mm tra i vari gruppi in modo da avere una visualizzazione grafica utile allo scopo ed un intervallo totale uguale per tutti i provini in modo da migliorare il confronto visivo ed allo stesso tempo senza escludere nessun dato dall'analisi.

Tale analisi verrà trattata individualmente per ogni provino e, successivamente, verrà condotta nuovamente considerando aspetti comuni per discriminare, la distribuzione statistica dimensionale e geometrica, tra:

- Produzione su EOS M 290 e EOS M 400-4
- Presenza e assenza di overlapping
- Disposizione "testa" e disposizione "gamba"

Sulla base di queste analisi, per ogni provino saranno descritti alcuni tra i difetti di dimensione maggiore con un'analisi qualitativa mirata sui dati delle proiezioni delle aree rispetto alle direzioni di riferimento, sul volume e sul dato di gap che andranno ad integrare le informazioni geometriche generali con aspetti legati alla pericolosità del difetto.

Inoltre, per delle considerazioni critiche, alcuni difetti verranno visualizzati in un modello 3D rielaborato su SolidWorks sulla base delle geometrie e dei riferimenti generati dal tomografo durante la ricostruzione delle scansioni a cui sono evidentemente correlati i dati di posizione dei vari difetti.

Tutti i valori riportati nelle successive tabelle e grafici che riguardano media, moda, mediana, intervalli riferiti al diametro, massimi e minimi sono espressi in mm; mentre valori percentuali come sfericità e compattezza sono scalati da 0 a 1, ovviamente, adimensionali.



Provino 1DtestaM404_1ov

Diametro

Tabella 7. 1DtestaM404_1ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	1DtestaM404_1ov
media	0,59
errore standard	0,0186
mediana	0,59
moda	0,77
deviazione standard	0,1221
varianza	0,0149
massimo	0,93
minimo	0,40
quantità	43

		frequenza	
Intervallo	frequenza	%	gaussiana
0,2 - 0,25	0	0%	0,2%
0,25 - 0,3	0	0%	0,6%
0,3 - 0,35	0	0%	1,6%
0,35 - 0,4	0	0%	3,5%
0,4 - 0,45	5	12%	6,6%
0,45 - 0,5	7	16%	10,6%
0,5 - 0,55	6	14%	14,2%
0,55 - 0,6	5	12%	16,2%
0,6 - 0,65	8	19%	15,6%
0,65 - 0,7	3	7%	12,8%
0,7 - 0,75	4	9%	8,8%
0,75 - 0,8	3	7%	5,1%
0,8 - 0,85	1	2%	2,5%
0,85 - 0,9	0	0%	1,1%
0,9 - 0,95	1	2%	0,4%
0,95 - 1	0	0%	0,1%
1 - 1,05	0	0%	0,0%
1,05 - 1,1	0	0%	0,0%
1,1 - 1,15	0	0%	0,0%
1,15 - 1,2	0	0%	0,0%
1,2 - 1,25	0	0%	0,0%
1,25 - 1,3	0	0%	0,0%
1,3 - 1,35	0	0%	0,0%
1,35 - 1,4	0	0%	0,0%



Figura 49. 1DtestaM404_1ov: distribuzione di probabilità sul diametro

Tabella 8. 1DtestaM404_1ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità



Sfericità

	1DtestaM404_1ov
media	0,60
errore standard	0,0072
mediana	0,60
moda	0,59
deviazione standard	0,0473
varianza	0,0022
massimo	0,70
minimo	0,50
quantità	43

		frequenza	
Intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	0	0%	0,0%
0,45 - 0,5	0	0%	1,0%
0,5 - 0,55	6	14%	10,4%
0,55 - 0,6	14	33%	34,9%
0,6 - 0,65	15	35%	38,3%
0,65 - 0,7	7	16%	13,7%
0,7 - 0,75	1	2%	1,6%
0,75 - 0,8	0	0%	0,1%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 50. 1DtestaM404_1ov: distribuzione di probabilità sulla sfericità



Compattezza

	1DtestaM404_1ov
media	0,35
errore standard	0,0159
mediana	0,35
moda	0,26
deviazione standard	0,1040
varianza	0,0108
massimo	0,61
minimo	0,13
quantità	43

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,1%
0,05 - 0,1	0	0%	0,6%
0,1 - 0,15	1	2%	1,8%
0,15 - 0,2	3	7%	4,7%
0,2 - 0,25	3	7%	9,3%
0,25 - 0,3	4	9%	14,8%
0,3 - 0,35	10	23%	18,6%
0,35 - 0,4	9	21%	18,6%
0,4 - 0,45	5	12%	14,8%
0,45 - 0,5	5	12%	9,3%
0,5 - 0,55	2	5%	4,7%
0,55 - 0,6	0	0%	1,8%
0,6 - 0,65	1	2%	0,6%
0,65 - 0,7	0	0%	0,1%
0,7 - 0,75	0	0%	0,0%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 51. 1DtestaM404_1ov: distribuzione di probabilità sulla compattezza

$Tabella \ 9. \ 1Dtesta M404_1 ov: \ analisi \ statistica \ descrittiva \ e \ distribuzione \ di \ probabilità \ sulla \ compattezza$





Analisi qualitativa sui difetti di maggiore dimensione







Figura 52. 1DtestaM404_1ov: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 43.

La distribuzione dimensionale presenta una leggera asimmetria verso valori minori della media (0,59 mm), quasi il 20% dei difetti presenta una dimensione nell'intervallo tra 0,6 mm e 0,65 mm. L'intervallo di variazione del diametro risulta pari a 0,53 mm.

La sfericità risulta distribuita simmetricamente con valori che vanno da 0,5 a 0,7.

Anche la compattezza mostra una distribuzione prossima alla gaussiana con qualche valore di picco intorno alla media con un'alta concentrazione, infatti il 44% dei difetti presenta una compattezza compresa tra 0,3 e 0,4.

Il difetto di diametro pari a 0,93 mm, oltre ad essere il più grande nel provino, presenta anche i peggiori valori di compattezza e sfericità rispetto a quelli nel confronto e proiezioni delle aree nelle direzioni principali sensibilmente maggiori; anche il valore di gap è critico intorno a 1mm.

Volume di materiale scansionato = $18875,47 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti rilevati = $1,54 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti % = 0,01%



Figura 53. 1DtestaM404_1ov: immagine tomografica



Provino 1DtestaM404_2ov

Diametro

Tabella 10. 1DtestaM404_2ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	1DtestaM404_2ov
media	0,62
errore standard	0,0233
mediana	0,60
moda	0,66
deviazione standard	0,1341
varianza	0,0180
massimo	0,91
minimo	0,36
quantità	33

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0,2 - 0,25	0	0,0%	0%
0,25 - 0,3	0	0,0%	1%
0,3 - 0,35	0	0,0%	1%
0,35 - 0,4	1	3,0%	3%
0,4 - 0,45	2	6,1%	5%
0,45 - 0,5	3	9,1%	8%
0,5 - 0,55	5	15,2%	12%
0,55 - 0,6	5	15,2%	14%
0,6 - 0,65	1	3,0%	15%
0,65 - 0,7	6	18,2%	14%
0,7 - 0,75	4	12,1%	11%
0,75 - 0,8	2	6,1%	8%
0,8 - 0,85	3	9,1%	5%
0,85 - 0,9	0	0,0%	2%
0,9 - 0,95	1	3,0%	1%
0,95 - 1	0	0,0%	0%
1 - 1,05	0	0,0%	0%
1,05 - 1,1	0	0,0%	0%
1,1 - 1,15	0	0,0%	0%
1,15 - 1,2	0	0,0%	0%
1,2 - 1,25	0	0,0%	0%
1,25 - 1,3	0	0,0%	0%
1,3 - 1,35	0	0,0%	0%
1,35 - 1,4	0	0,0%	0%



Figura 54. 1DtestaM404_2ov: distribuzione di probabilità sul diametro



Sfericità

	1DtestaM404_2ov
media	0,60
errore standard	0,0077
mediana	0,60
moda	0,63
deviazione standard	0,0440
varianza	0,0019
massimo	0,68
minimo	0,5
quantità	33

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	0	0%	0,0%
0,45 - 0,5	0	0%	1,1%
0,5 - 0,55	4	12%	12,7%
0,55 - 0,6	12	36%	40,8%
0,6 - 0,65	13	39%	36,0%
0,65 - 0,7	4	12%	8,7%
0,7 - 0,75	0	0%	0,6%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 55. 1DtestaM404_2ov: distribuzione di probabilità sulla sfericità

Tabella 11. 1DtestaM404_2ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità

Tabella 12. 1DtestaM404_2ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla compattezza



Compattezza

	1DtestaM404_2ov
media	0,32
errore standard	0,0161
mediana	0,32
moda	0,32
deviazione standard	0,0923
varianza	0,0085
massimo	0,51
minimo	0,18
quantità	33

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,1%
0,05 - 0,1	0	0%	0,6%
0,1 - 0,15	0	0%	2,2%
0,15 - 0,2	4	12%	6,1%
0,2 - 0,25	4	12%	12,5%
0,25 - 0,3	4	12%	19,0%
0,3 - 0,35	9	27%	21,6%
0,35 - 0,4	5	15%	18,3%
0,4 - 0,45	2	6%	11,5%
0,45 - 0,5	4	12%	5,4%
0,5 - 0,55	1	3%	1,9%
0,55 - 0,6	0	0%	0,5%
0,6 - 0,65	0	0%	0,1%
0,65 - 0,7	0	0%	0,0%
0,7 - 0,75	0	0%	0,0%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 56. 1DtestaM404_2ov: distribuzione di probabilità sulla compattezza





Analisi qualitativa sui difetti di maggiore dimensione







Figura 57. 1DtestaM404_2ov: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 33.

La distribuzione dimensionale presenta un doppio picco di valori intorno alla media tipico dei sistemi caratterizzati da due sottopopolazioni diverse; questi picchi sono localizzati nell'intervallo 0,5 - 0,6 mm e nell'intervallo 0,65 - 0,7 mm.

La sfericità e la compattezza risultano omogeneamente distribuite, lintervallo di variazione della compattezza si è lievemente ridotto rispetto al primo provino (da 0,18 a 0,51).

L'analisi qualitativa evidenzia dei difetti molto simili con intervalli di sfericità e compattezza confrontabili, il difetto più grande presenta anche valori sulle proiezioni delle aree leggermente superiori; si noti che uno tra i difetti di 0,81 mm presenta un valore di gap inferiore ad 1 mm.

Volume di materiale scansionato = $19139,27 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti rilevati = $1,28 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti % = 0,01%



Figura 58. 1DtestaM404_2ov: immagine tomografica



Provino 2DgambaM404_1ov

Diametro

Tabella 13. 2DgambaM404_1ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	2DgambaM404_1ov
media	0,52
errore standard	0,0114
mediana	0,53
moda	0,56
deviazione standard	0,1234
varianza	0,0152
massimo	0,88
minimo	0,25
quantità	117

		freguenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0,2 - 0,25	0	0,0%	1%
0,25 - 0,3	2	1,7%	2%
0,3 - 0,35	6	5,1%	4%
0,35 - 0,4	14	12,0%	8%
0,4 - 0,45	8	6,8%	12%
0,45 - 0,5	16	13,7%	15%
0,5 - 0,55	18	15,4%	16%
0,55 - 0,6	24	20,5%	15%
0,6 - 0,65	13	11,1%	12%
0,65 - 0,7	6	5,1%	8%
0,7 - 0,75	6	5,1%	4%
0,75 - 0,8	2	1,7%	2%
0,8 - 0,85	0	0,0%	1%
0,85 - 0,9	2	1,7%	0%
0,9 - 0,95	0	0,0%	0%
0,95 - 1	0	0,0%	0%
1 - 1,05	0	0,0%	0%
1,05 - 1,1	0	0,0%	0%
1,1 - 1,15	0	0,0%	0%
1,15 - 1,2	0	0,0%	0%
1,2 - 1,25	0	0,0%	0%
1,25 - 1,3	0	0,0%	0%
1,3 - 1,35	0	0,0%	0%
1,35 - 1,4	0	0,0%	0%



Figura 59. 2DgambaM404_1ov: distribuzione di probabilità sul diametro



Sfericità

	2DgambaM404_1ov
media	0,59
errore standard	0,0048
mediana	0,59
moda	0,59
deviazione standard	0,0520
varianza	0,0027
massimo	0,72
minimo	0,45
quantità	117

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	0	0%	0,2%
0,45 - 0,5	4	3%	3,2%
0,5 - 0,55	19	16%	17,1%
0,55 - 0,6	39	33%	36,6%
0,6 - 0,65	36	31%	31,0%
0,65 - 0,7	18	15%	10,4%
0,7 - 0,75	1	1%	1,4%
0,75 - 0,8	0	0%	0,1%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 60. 2DgambaM404_1ov: distribuzione di probabilità sulla sfericità

Tabella 14. 2DgambaM404_1ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità



Compattezza

	2DgambaM404_1ov	
media	0,33	
errore standard	0,0094	
mediana	0,33	
moda	0,35	
deviazione standard	0,1016	
varianza	0,0103	
massimo	0,58	
minimo	0,14	
quantità	117	

Tabella 15. 2DgambaM404_1ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla compattezza

		freguenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,2%
0,05 - 0,1	0	0%	0,9%
0,1 - 0,15	1	1%	2,6%
0,15 - 0,2	9	8%	6,3%
0,2 - 0,25	17	15%	11,7%
0,25 - 0,3	22	19%	17,1%
0,3 - 0,35	14	12%	19,6%
0,35 - 0,4	26	22%	17,7%
0,4 - 0,45	11	9%	12,5%
0,45 - 0,5	8	7%	7,0%
0,5 - 0,55	7	6%	3,0%
0,55 - 0,6	2	2%	1,0%
0,6 - 0,65	0	0%	0,3%
0,65 - 0,7	0	0%	0,1%
0,7 - 0,75	0	0%	0,0%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 61. 2DgambaM404_1ov: distribuzione di probabilità sulla compattezza










Figura 62. 2DgambaM404_1ov: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 117.

La distribuzione dimensionale risulta molto regolare globalmente traslata a valori minori rispetto ai precedenti provini, con una media di 0,52 mm ed oltre il 20% dei difetti individuati nell'intervallo tra 0,55 - 0,6 mm.

La sfericità e la compattezza risultano nuovamente prossime alle rispettive gaussiane con valori coerenti rispetto alle precedenti osservazioni.

L'analisi qualitativa mostra una distribuzione delle proiezioni delle aree simile ai precedenti provini; il valore di gap critico è individuato nel difetto di diametro pari a 0,77 mm con un valore di corca 1,5 mm.

Volume di materiale scansionato = $16111,81 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti rilevati = $2,81 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti % = 0,02%



Figura 63. 2DgambaM404_1ov: immagine tomografica



Provino 3DtestaM404_1

Diametro

Tabella 16. 3DtestaM404_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	3DtestaM404_1
media	0,61
errore standard	0,0177
mediana	0,60
moda	0,56
deviazione standard	0,1357
varianza	0,0184
massimo	0,87
minimo	0,31
quantità	59

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0,2 - 0,25	0	0,0%	0%
0,25 - 0,3	0	0,0%	1%
0,3 - 0,35	3	5,1%	1%
0,35 - 0,4	4	6,8%	3%
0,4 - 0,45	0	0,0%	5%
0,45 - 0,5	2	3,4%	8%
0,5 - 0,55	4	6,8%	12%
0,55 - 0,6	15	25,4%	14%
0,6 - 0,65	8	13,6%	15%
0,65 - 0,7	8	13,6%	14%
0,7 - 0,75	5	8,5%	11%
0,75 - 0,8	5	8,5%	8%
0,8 - 0,85	3	5,1%	5%
0,85 - 0,9	2	3,4%	2%
0,9 - 0,95	0	0,0%	1%
0,95 - 1	0	0,0%	0%
1 - 1,05	0	0,0%	0%
1,05 - 1,1	0	0,0%	0%
1,1 - 1,15	0	0,0%	0%
1,15 - 1,2	0	0,0%	0%
1,2 - 1,25	0	0,0%	0%
1,25 - 1,3	0	0,0%	0%
1,3 - 1,35	0	0,0%	0%
1,35 - 1,4	0	0,0%	0%



Figura 64. 3DtestaM404_1: distribuzione di probabilità sul diametro



Sfericità

Tabella 17. 3DtestaM404_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità

	3DtestaM404_1
media	0,59
errore standard	0,0058
mediana	0,59
moda	0,6
deviazione standard	0,0448
varianza	0,0020
massimo	0,71
minimo	0,51
quantità	59

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	0	0%	0,0%
0,45 - 0,5	0	0%	1,3%
0,5 - 0,55	7	12%	13,7%
0,55 - 0,6	23	39%	40,8%
0,6 - 0,65	18	31%	34,9%
0,65 - 0,7	10	17%	8,6%
0,7 - 0,75	1	2%	0,6%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 65. 3DtestaM404_1: distribuzione di probabilità sulla sfericità



Compattezza

	3DtestaM404_1
media	0,35
errore standard	0,0128
mediana	0,34
moda	0,32
deviazione standard	0,0983
varianza	0,0097
massimo	0,57
minimo	0,14
quantità	59

 Tabella 18. 3DtestaM404_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla compattezza

 3DtestaM404_1

 0.35

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,1%
0,05 - 0,1	0	0%	0,5%
0,1 - 0,15	1	2%	1,6%
0,15 - 0,2	2	3%	4,5%
0,2 - 0,25	5	8%	9,6%
0,25 - 0,3	9	15%	15,7%
0,3 - 0,35	16	27%	19,9%
0,35 - 0,4	11	19%	19,4%
0,4 - 0,45	6	10%	14,6%
0,45 - 0,5	3	5%	8,5%
0,5 - 0,55	4	7%	3,8%
0,55 - 0,6	2	3%	1,3%
0,6 - 0,65	0	0%	0,4%
0,65 - 0,7	0	0%	0,1%
0,7 - 0,75	0	0%	0,0%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 66. 3DtestaM404_1: distribuzione di probabilità sulla compattezza











Figura 67. 3DtestaM404_1: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 59.

La distribuzione dimensionale risulta quasi simile alla gaussiana tranne che per un picco di circa il 25% dei dati alla dimensione tra 0,55 e 0,6 mm con una media di 0,61 mm mentre non si registrano difetti con dimensione compresa tra 0,4 e 0,45 mm.

La sfericità e la compattezza come osservato fino ad ora sono omogeneamente distribuiti e la sfericità ha un intervallo di variazione molto ristretto rispetto a quello della compattezza.

Il difetto di 0,87 mm è caratterizzato da valori di proiezioni più alti rispetto agli altri difetti ma allo stesso tempo presenta buoni valori di compattezza e sfericità sempre rispetto agli altri quattro difetti più grandi in questo provino; il suo gap è inferiore a 2 mm ed il difetto da 0,82 mm è relativamente "isolato" poiché il suo corrispondente valore di gap è prossimo ai 6 mm.

Volume di materiale scansionato = $19143,39 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti rilevati = $2,42 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti % = 0,01%



Figura 68. 3DtestaM404_1: immagine tomografica



Provino 3DtestaM404_2

Diametro

Tabella 19. 3DtestaM404_2: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	3DtestaM404_2
media	0,59
errore standard	0,0277
mediana	0,62
moda	0,75
deviazione standard	0,1240
varianza	0,0154
massimo	0,75
minimo	0,36
quantità	20

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0,2 - 0,25	0	0,0%	0%
0,25 - 0,3	0	0,0%	1%
0,3 - 0,35	0	0,0%	2%
0,35 - 0,4	2	10,0%	3%
0,4 - 0,45	1	5,0%	6%
0,45 - 0,5	1	5,0%	10%
0,5 - 0,55	3	15,0%	14%
0,55 - 0,6	2	10,0%	16%
0,6 - 0,65	3	15,0%	16%
0,65 - 0,7	4	20,0%	13%
0,7 - 0,75	1	5,0%	9%
0,75 - 0,8	3	15,0%	6%
0,8 - 0,85	0	0,0%	3%
0,85 - 0,9	0	0,0%	1%
0,9 - 0,95	0	0,0%	0%
0,95 - 1	0	0,0%	0%
1 - 1,05	0	0,0%	0%
1,05 - 1,1	0	0,0%	0%
1,1 - 1,15	0	0,0%	0%
1,15 - 1,2	0	0,0%	0%
1,2 - 1,25	0	0,0%	0%
1,25 - 1,3	0	0,0%	0%
1,3 - 1,35	0	0,0%	0%
1,35 - 1,4	0	0,0%	0%



Figura 69. 3DtestaM404_2: distribuzione di probabilità sul diametro

Tabella 20. 3DtestaM404_2: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità



Sfericità

	3DtestaM404_2
media	0,60
errore standard	0,0096
mediana	0,6
moda	0,62
deviazione standard	0,0431
varianza	0,0019
massimo	0,68
minimo	0,53
quantità	20

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	0	0%	0,0%
0,45 - 0,5	0	0%	0,6%
0,5 - 0,55	2	10%	9,2%
0,55 - 0,6	7	35%	37,7%
0,6 - 0,65	7	35%	40,4%
0,65 - 0,7	4	20%	11,3%
0,7 - 0,75	0	0%	0,8%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 70. 3DtestaM404_2: distribuzione di probabilità sulla sfericità



Compattezza

	3DtestaM404_2
media	0,34
errore standard	0,0260
mediana	0,335
moda	0,23
deviazione standard	0,1162
varianza	0,0135
massimo	0,64
minimo	0,18
quantità	20

Tabella 21. 3DtestaM404_2: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla compattezza

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,4%
0,05 - 0,1	0	0%	1,2%
0,1 - 0,15	0	0%	3,0%
0,15 - 0,2	1	5%	6,2%
0,2 - 0,25	4	20%	10,4%
0,25 - 0,3	4	20%	14,6%
0,3 - 0,35	2	10%	17,0%
0,35 - 0,4	4	20%	16,5%
0,4 - 0,45	1	5%	13,3%
0,45 - 0,5	3	15%	8,9%
0,5 - 0,55	0	0%	4,9%
0,55 - 0,6	0	0%	2,3%
0,6 - 0,65	1	5%	0,9%
0,65 - 0,7	0	0%	0,3%
0,7 - 0,75	0	0%	0,1%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 71. 3DtestaM404_2: distribuzione di probabilità sulla compattezza











Figura 72. 3DtestaM404_2: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 20.

Dalla distribuzione dimensionale si nota che la moda supera il valore di 0,7 mm, evento in comune solo con il primo provino analizzato fino a questo momento. La media è di 0,59 mm.

La sfericità risulta stabile sempre nell'intervallo di valori a circa 0,5 e 0,7.

Anche la compattezza resta confinata nel solito intervallo di valori ma in questo caso al percentuale di osservazioni nell'intervallo comprendente la media è del 10%, quindi la metà rispetto ai valori nell'intorno di questo intervallo (comportamento bimodale).

Il valore dimensionale massimo registrato è lievemente diminuito a 0,75 mm, mentre per tutti i difetti più grandi analizzati il livello di gap è largamente superiore a 2,5 mm.

Volume di materiale scansionato = $18734,96 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti rilevati = $0,71 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti % < 0,01%



Figura 73. 3DtestaM404_2: immagine tomografica



Provino 4DgambaM404_1

Diametro

Tabella 22. 4DgambaM404_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	4DgambaM404_1
media	0,61
errore standard	0,0188
mediana	0,62
moda	0,62
deviazione standard	0,1161
varianza	0,0135
massimo	0,93
minimo	0,41
quantità	38

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0,2 - 0,25	0	0,0%	0%
0,25 - 0,3	0	0,0%	0%
0,3 - 0,35	0	0,0%	1%
0,35 - 0,4	0	0,0%	2%
0,4 - 0,45	2	5,3%	5%
0,45 - 0,5	3	7,9%	8%
0,5 - 0,55	6	15,8%	13%
0,55 - 0,6	7	18,4%	16%
0,6 - 0,65	8	21,1%	17%
0,65 - 0,7	5	13,2%	15%
0,7 - 0,75	2	5,3%	11%
0,75 - 0,8	3	7,9%	7%
0,8 - 0,85	0	0,0%	3%
0,85 - 0,9	0	0,0%	1%
0,9 - 0,95	2	5,3%	0%
0,95 - 1	0	0,0%	0%
1 - 1,05	0	0,0%	0%
1,05 - 1,1	0	0,0%	0%
1,1 - 1,15	0	0,0%	0%
1,15 - 1,2	0	0,0%	0%
1,2 - 1,25	0	0,0%	0%
1,25 - 1,3	0	0,0%	0%
1,3 - 1,35	0	0,0%	0%
1,35 - 1,4	0	0,0%	0%



Figura 74. 4DgambaM404_1: distribuzione di probabilità sul diametro



Sfericità

	4DgambaM404_1
media	0,60
errore standard	0,0070
mediana	0,61
moda	0,63
deviazione standard	0,0434
varianza	0,0019
massimo	0,71
minimo	0,52
quantità	38

Tabella 23. 4DgambaM404_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	0	0%	0,0%
0,45 - 0,5	0	0%	0,6%
0,5 - 0,55	3	8%	9,3%
0,55 - 0,6	15	39%	37,5%
0,6 - 0,65	14	37%	40,2%
0,65 - 0,7	5	13%	11,5%
0,7 - 0,75	1	3%	0,9%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 75. 4DgambaM404_1: distribuzione di probabilità sulla sfericità



Compattezza

	4DgambaM404_1
media	0,34
errore standard	0,0149
mediana	0,33
moda	0,32
deviazione standard	0,0916
varianza	0,0084
massimo	0,55
minimo	0,13
quantità	38

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,1%
0,05 - 0,1	0	0%	0,3%
0,1 - 0,15	1	3%	1,3%
0,15 - 0,2	2	5%	4,0%
0,2 - 0,25	0	0%	9,4%
0,25 - 0,3	6	16%	16,5%
0,3 - 0,35	15	39%	21,3%
0,35 - 0,4	5	13%	20,5%
0,4 - 0,45	2	5%	14,6%
0,45 - 0,5	6	16%	7,8%
0,5 - 0,55	0	0%	3,1%
0,55 - 0,6	1	3%	0,9%
0,6 - 0,65	0	0%	0,2%
0,65 - 0,7	0	0%	0,0%
0,7 - 0,75	0	0%	0,0%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 76. 4DgambaM404_1: distribuzione di probabilità sulla compattezza

Tabella 24. 4DgambaM404_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla compattezza











Figura 77. 4DgambaM404_1: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 38.

La distribuzione dimensionale segue bene la distribuzione gaussiana, ma si osservano due difetti isolati con diametro superiore a 0,9 mm. La media è di 0,61 mm.

Non ci sono osservazioni rilevanti sulla sfericità mentre per la compattezza si registra una forte stabilità con valore compreso nell'intervallo tra 0,3 e 0,35 (40%) più del doppio rispetto agli altri intervalli.

Il difetto caratterizzato dal diametro di 0,93 mm presenta alti valori sulle proiezioni delle aree sui piani xz (0,33 mm²) e xy (0,35 mm²) con un valore di gap pari a 1,55 mm mentre il difetto da 0,91 mm presenta un gap di quasi 5 mm e per entrambi questi difetti il valore di compattezza è inferiore a 0,2. Per questi difetti è stata condotta un'ulteriore analisi di localizzazione sul modello 3D di riferimento.



Figura 78. 4DgambaM404_1: visualizzazione dei difetti 0,93 mm(rosso) e 0,91 mm (blu)

Volume di materiale scansionato = $19095,92 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti rilevati = $1,67 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti % = 0,01%





Figura 79. 4DgambaM404_1: immagine tomografica



Provino 4DgambaM404_2ov

Diametro

Tabella 25. 4DgambaM404_2ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	4DgambaM404_2ov
media	0,59
errore standard	0,0175
mediana	0,58
moda	0,62
deviazione standard	0,1175
varianza	0,0138
massimo	0,84
minimo	0,37
quantità	45

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0,2 - 0,25	0	0,0%	0%
0,25 - 0,3	0	0,0%	0%
0,3 - 0,35	0	0,0%	1%
0,35 - 0,4	1	2,2%	3%
0,4 - 0,45	4	8,9%	6%
0,45 - 0,5	5	11,1%	10%
0,5 - 0,55	4	8,9%	14%
0,55 - 0,6	10	22,2%	17%
0,6 - 0,65	8	17,8%	16%
0,65 - 0,7	6	13,3%	13%
0,7 - 0,75	1	2,2%	9%
0,75 - 0,8	2	4,4%	5%
0,8 - 0,85	4	8,9%	2%
0,85 - 0,9	0	0,0%	1%
0,9 - 0,95	0	0,0%	0%
0,95 - 1	0	0,0%	0%
1 - 1,05	0	0,0%	0%
1,05 - 1,1	0	0,0%	0%
1,1 - 1,15	0	0,0%	0%
1,15 - 1,2	0	0,0%	0%
1,2 - 1,25	0	0,0%	0%
1,25 - 1,3	0	0,0%	0%
1,3 - 1,35	0	0,0%	0%
1,35 - 1,4	0	0,0%	0%



Figura 80. 4DgambaM404_2ov: distribuzione di probabilità sul diametro



Sfericità

	4DgambaM404_2ov
media	0,60
errore standard	0,0064
mediana	0,60
moda	0,61
deviazione standard	0,0428
varianza	0,0018
massimo	0,69
minimo	0,53
quantità	45

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	0	0%	0,0%
0,45 - 0,5	0	0%	0,7%
0,5 - 0,55	6	13%	10,4%
0,55 - 0,6	14	31%	39,8%
0,6 - 0,65	18	40%	38,8%
0,65 - 0,7	7	16%	9,7%
0,7 - 0,75	0	0%	0,6%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 81. 4DgambaM404_2ov: distribuzione di probabilità sulla sfericità

Tabella 26. 4DgambaM404_2ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità



Compattezza

	4DgambaM404_2ov
media	0,35
errore standard	0,0143
mediana	0,34
moda	0,32
deviazione standard	0,0956
varianza	0,0091
massimo	0,59
minimo	0,14
quantità	45

Tabella 27. 4DgambaM404_2ov: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla compattezza

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,1%
0,05 - 0,1	0	0%	0,3%
0,1 - 0,15	1	2%	1,3%
0,15 - 0,2	1	2%	3,8%
0,2 - 0,25	2	4%	8,7%
0,25 - 0,3	7	16%	15,2%
0,3 - 0,35	14	31%	20,1%
0,35 - 0,4	7	16%	20,2%
0,4 - 0,45	6	13%	15,5%
0,45 - 0,5	2	4%	9,0%
0,5 - 0,55	3	7%	4,0%
0,55 - 0,6	2	4%	1,4%
0,6 - 0,65	0	0%	0,3%
0,65 - 0,7	0	0%	0,1%
0,7 - 0,75	0	0%	0,0%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 82. 4DgambaM404_2ov: distribuzione di probabilità sulla compattezza











Figura 83. 4DgambaM404_2ov: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 45.

La distribuzione dimensionale, ancora una volta, segue adeguatamente la distribuzione gaussiana, come il precedente provino ma questa volta la dimensione dei difetti non supera il diametro di 0,84 mm.

La sfericità e la compattezza si comportano esattamente come nel caso del precedente provino 4DgambaM404_2ov.

Le proiezioni delle aree nei difetti maggiori sono tutte inferiori a 0,3 mm², presentano sfericità simile e un difetto a 0,82 mm presenta una compattezza di 0,14 ma un valore di gap superiore a 3,5 mm mentre il difetto di diametro pari a 0,80 mm anche se presenta una compattezza superiore a 0,2 (quindi leggermente migliore) è caratterizzato da un valore di gap critico pari a 0,59 mm.

Volume di materiale scansionato = $18630,36 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti rilevati = $1,52 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti % = 0,01%



Figura 84. 4DgambaM404_2ov: immagine tomografica



Provino 5DtestaM290_1

Diametro

Tabella 28. 5DtestaM290_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	5DtestaM290_1
media	0,46
errore standard	0,0035
mediana	0,44
moda	0,40
deviazione standard	0,1296
varianza	0,0168
massimo	0,92
minimo	0,23
quantità	1350

		6		
		trequenza		
intervallo	trequenza % ga		gaussiana	
0,2 - 0,25	10	0,7%	2%	
0,25 - 0,3	78	5,8%	5%	
0,3 - 0,35	184	13,6%	8%	
0,35 - 0,4	211	15,6%	11%	
0,4 - 0,45	218	16,1%	14%	
0,45 - 0,5	190	14,1%	16%	
0,5 - 0,55	143	10,6%	15%	
0,55 - 0,6	103	7,6%	12%	
0,6 - 0,65	88	6,5%	8%	
0,65 - 0,7	54	4,0%	5%	
0,7 - 0,75	38	2,8%	3%	
0,75 - 0,8	12	0,9%	1%	
0,8 - 0,85	8	0,6%	0%	
0,85 - 0,9	10	0,7%	0%	
0,9 - 0,95	3	0,2%	0%	
0,95 - 1	0	0,0%	0%	
1 - 1,05	0	0,0%	0%	
1,05 - 1,1	0	0,0%	0%	
1,1 - 1,15	0	0,0%	0%	
1,15 - 1,2	0	0,0%	0%	
1,2 - 1,25	0	0,0%	0%	
1,25 - 1,3	0	0,0%	0%	
1,3 - 1,35	0	0,0%	0%	
1,35 - 1,4	0	0,0%	0%	



Figura 85. 5DtestaM290_1: distribuzione di probabilità sul diametro



Sfericità

	5DtestaM290_1
media	0,58
errore standard	0,0015
mediana	0,59
moda	0,57
deviazione standard	0,0540
varianza	0,0029
massimo	0,74
minimo	0,41
quantità	1350

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	4	0%	0,5%
0,45 - 0,5	74	5%	4,9%
0,5 - 0,55	254	19%	20,4%
0,55 - 0,6	416	31%	36,4%
0,6 - 0,65	424	31%	27,6%
0,65 - 0,7	164	12%	8,9%
0,7 - 0,75	14	1%	1,2%
0,75 - 0,8	0	0%	0,1%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 86. 5DtestaM290_1: distribuzione di probabilità sulla sfericità

Tabella 29. 5DtestaM290_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità



Compattezza

	5DtestaM290_1
media	0,30
errore standard	0,0029
mediana	0,29
moda	0,25
deviazione standard	0,1074
varianza	0,0115
massimo	0,7
minimo	0,08
quantità	1350

Tabella 30. 5DtestaM290_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla compattezza

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,7%
0,05 - 0,1	4	0%	1,9%
0,1 - 0,15	58	4%	4,7%
0,15 - 0,2	183	14%	9,1%
0,2 - 0,25	209	15%	14,3%
0,25 - 0,3	239	18%	18,0%
0,3 - 0,35	191	14%	18,2%
0,35 - 0,4	162	12%	14,9%
0,4 - 0,45	152	11%	9,8%
0,45 - 0,5	87	6%	5,2%
0,5 - 0,55	50	4%	2,2%
0,55 - 0,6	12	1%	0,8%
0,6 - 0,65	2	0%	0,2%
0,65 - 0,7	0	0%	0,0%
0,7 - 0,75	1	0%	0,0%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 87. 5DtestaM290_1: distribuzione di probabilità sulla compattezza









Figura 88. 5DtestaM290_1: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 1350, una quantità di difetti considerevolmente maggiore rispetto agli altri provini.

Data la grande quantità di dati l'analisi statistica risulta particolarmente robusta, si può notare come la distribuzione dimensione è lievemente asimmetrica verso valori inferiori alle media e in questo provino si registra il difetto avente il diametro minore in assoluto nelle nostre analisi pari a 0,23 mm. la media di 0,46 mm risulta molto inferiore rispetto ai provini già analizzati.

La sfericità mantiene il solito andamento ed il suo intervallo risulta leggermente allargato, da 0,41 a 0,74.

Per la compattezza il discorso è analogo a quello della sfericità e si raggiungono anche valori inferiori a 0,1.

Nell'analisi qualitativa risulta particolare osservare che i difetti da 0,92 mm presentano valori di gap prossimi allo zero, tra i dati generati dal software su questi difetti è persino presente un valore negativo che non ha significato fisico nell'ottica della definizione di compattezza discussa in precedenza.

Bisognerebbe condurre ulteriori analisi su questo provino per capire le cause che hanno generato dei dati così divergenti rispetto agli altri provini.

Volume di materiale scansionato = 13116,51 mm³ Volume dei difetti rilevati = 20,08 mm³

Volume dei difetti % = 0,15%



Figura 89. 5DtestaM290 1: immagine tomografica



Provino 5DtestaM290_2

Diametro

Tabella 31. 5DtestaM290_2: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	5DtestaM290_2
media	0,57
errore standard	0,0046
mediana	0,54
moda	0,40
deviazione standard	0,1627
varianza	0,0265
massimo	1,31
minimo	0,25
quantità	1231

			1	
		frequenza		
intervallo	rvallo frequenza %		gaussiana	
0,2 - 0,25	0	0,0%	1%	
0,25 - 0,3	3	0,2%	2%	
0,3 - 0,35	36	2,9%	4%	
0,35 - 0,4	89	7,2%	5%	
0,4 - 0,45	193	15,7%	8%	
0,45 - 0,5	149	12,1%	10%	
0,5 - 0,55	161	13,1%	12%	
0,55 - 0,6	140	11,4%	12%	
0,6 - 0,65	135	11,0%	12%	
0,65 - 0,7	89	7,2%	11%	
0,7 - 0,75	81	6,6%	8%	
0,75 - 0,8	39	3,2%	6%	
0,8 - 0,85	37	3,0%	4%	
0,85 - 0,9	24	1,9%	2%	
0,9 - 0,95	18	1,5%	1%	
0,95 - 1	11	0,9%	1%	
1 - 1,05	8	0,6%	0%	
1,05 - 1,1	8	0,6%	0%	
1,1 - 1,15	5	0,4%	0%	
1,15 - 1,2	3	0,2%	0%	
1,2 - 1,25	1	0,1%	0%	
1,25 - 1,3	0	0,0%	0%	
1,3 - 1,35	1	0,1%	0%	
1,35 - 1,4	0	0,0%	0%	



Figura 90. 5DtestaM290_2: distribuzione di probabilità sul diametro

Tabella 32. 5DtestaM290_2: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità



Sfericità

	5DtestaM290_2
media	0,61
errore standard	0,0015
mediana	0,61
moda	0,64
deviazione standard	0,0519
varianza	0,0027
massimo	0,75
minimo	0,43
quantità	1231

	frequenza		
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	2	0%	0,1%
0,45 - 0,5	33	3%	1,6%
0,5 - 0,55	131	11%	11,4%
0,55 - 0,6	295	24%	32,2%
0,6 - 0,65	500	41%	35,9%
0,65 - 0,7	235	19%	15,9%
0,7 - 0,75	34	3%	2,8%
0,75 - 0,8	1	0%	0,2%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 91. 5DtestaM290_2: distribuzione di probabilità sulla sfericità



Compattezza

	5DtestaM290_2
media	0,34
errore standard	0,0032
mediana	0,34
moda	0,33
deviazione standard	0,1115
varianza	0,0124
massimo	0,68
minimo	0,07
quantità	1231

Tabella 33. 5DtestaM290	2: analisi statistica	descrittiva e	distribuzione	di probabilità sull	a compattezza
				1	1

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,4%
0,05 - 0,1	3	0%	1,2%
0,1 - 0,15	41	3%	3,0%
0,15 - 0,2	93	8%	6,4%
0,2 - 0,25	162	13%	11,0%
0,25 - 0,3	169	14%	15,5%
0,3 - 0,35	189	15%	17,8%
0,35 - 0,4	185	15%	16,8%
0,4 - 0,45	173	14%	13,0%
0,45 - 0,5	112	9%	8,2%
0,5 - 0,55	71	6%	4,2%
0,55 - 0,6	28	2%	1,8%
0,6 - 0,65	4	0%	0,6%
0,65 - 0,7	1	0%	0,2%
0,7 - 0,75	0	0%	0,0%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 92. 5DtestaM290_2: distribuzione di probabilità sulla compattezza









Figura 93. 5DtestaM290_2: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 1231, confrontabile con il provino proveniente dallo steso campione e nuovamente molto maggiore rispetto ai difetti rilevati sugli altri provini.

Di nuovo, grazie alla grande quantità di sati l'analisi di statistica descrittiva risulta robusta, similmente al precedente provino, la distribuzione sul diametro è lievemente asimmetrica verso valori inferiori alle media e in questo provino si registra il difetto avente il diametro maggiore in assoluto nelle nostre analisi pari a 1,31 mm. la media di 0,57 mm evidenzia nuovamente la tendenza sui provini di questo campione nella generazione di difetti, in generale, più piccoli rispetto agli altri provini anche se notevolmente superiore in quantità.

Il discorso sulla sfericità e sulla compattezza è analogo al caso precedente, anche qui si registrano valori di compattezza inferiori a 0,1.

Si nota una grande quantità di difetti con diametro superiore a 1 mm e al maggior parte di questi è concentrata nella stessa zona (per valori rispetto al sistema di riferimento lungo l'asse z tra -28,16mm e -34,22 mm). valori così alti di dimensione associati a corrispondenti bassi valori di compattezza potrebbero far pensare a difetti superficiali piuttosto che interni. Il difetto con diametro di 1,15 mm presenta nuovamente un gap negativo che non ha significato fisico.



Figura 94. 5DtestaM290_2: visualizzazione dei difetti 1,31 mm(rosso) e 1,23 mm (blu)



Il difetto di 1,23 mm sembrerebbe essere molto prossimo alla superficie esterno del provino, non si può dire lo stesso per quello da 1,31 mm. Risulta necessario un'investigazione ulteriore per comprendere la natura di questi difetti.

Volume di materiale scansionato = 18369,85 mm³ Volume dei difetti rilevati = 38,37 mm³

Volume dei difetti % = 0,21%



Figura 95. 5DtestaM290_2: immagine tomografica



Provino 6DgambaM290_1

Diametro

Tabella 34. 6DgambaM290_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	6DgambaM290_1	
media	0,57	
errore standard	0,0171	
mediana	0,57	
moda	0,54	
deviazione standard	0,0703	
varianza	0,0049	
massimo	0,7	
minimo	0,44	
quantità	17	

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0,2 - 0,25	0	0,0%	0%
0,25 - 0,3	0	0,0%	0%
0,3 - 0,35	0	0,0%	0%
0,35 - 0,4	0	0,0%	1%
0,4 - 0,45	1	5,9%	3%
0,45 - 0,5	0	0,0%	11%
0,5 - 0,55	7	41,2%	23%
0,55 - 0,6	2	11,8%	28%
0,6 - 0,65	4	23,5%	21%
0,65 - 0,7	2	11,8%	9%
0,7 - 0,75	1	5,9%	2%
0,75 - 0,8	0	0,0%	0%
0,8 - 0,85	0	0,0%	0%
0,85 - 0,9	0	0,0%	0%
0,9 - 0,95	0	0,0%	0%
0,95 - 1	0	0,0%	0%
1 - 1,05	0	0,0%	0%
1,05 - 1,1	0	0,0%	0%
1,1 - 1,15	0	0,0%	0%
1,15 - 1,2	0	0,0%	0%
1,2 - 1,25	0	0,0%	0%
1,25 - 1,3	0	0,0%	0%
1,3 - 1,35	0	0,0%	0%
1,35 - 1,4	0	0,0%	0%



Figura 96. 6DgambaM290_1: distribuzione di probabilità sul diametro



Sfericità

	6DgambaM290_1	
media	0,60	
errore standard	0,0082	
mediana	0,6	
moda	0,57	
deviazione standard	0,0339	
varianza	0,0012	
massimo	0,65	
minimo	0,55	
quantità	17	

Tabella 35. 6DgambaM290_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	0	0%	0,0%
0,45 - 0,5	0	0%	0,1%
0,5 - 0,55	0	0%	6,6%
0,55 - 0,6	8	47%	48,7%
0,6 - 0,65	7	41%	40,7%
0,65 - 0,7	2	12%	3,9%
0,7 - 0,75	0	0%	0,0%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0.0%



Figura 97. 6DgambaM290_1: distribuzione di probabilità sulla sfericità


Compattezza

	6DgambaM290_1
media	0,35
errore standard	0,0198
mediana	0,35
moda	0,34
deviazione standard	0,0817
varianza	0,0067
massimo	0,52
minimo	0,19
quantità	17

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,1%
0,1 - 0,15	0	0%	0,5%
0,15 - 0,2	1	6%	2,3%
0,2 - 0,25	0	0%	7,3%
0,25 - 0,3	3	18%	15,6%
0,3 - 0,35	4	24%	23,1%
0,35 - 0,4	4	24%	23,5%
0,4 - 0,45	3	18%	16,4%
0,45 - 0,5	1	6%	7,9%
0,5 - 0,55	1	6%	2,6%
0,55 - 0,6	0	0%	0,6%
0,6 - 0,65	0	0%	0,1%
0,65 - 0,7	0	0%	0,0%
0,7 - 0,75	0	0%	0,0%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 98. 6DgambaM290_1: distribuzione di probabilità sulla compattezza

Tabella 36. 6DgambaM290_1: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla compattezza





Analisi qualitativa sui difetti di maggiore dimensione





Figura 99. 6DgambaM290_1: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 17.

Nell'intervallo compreso tra 0,5 e 0,55 mm è presente più del 40% dei difetti, la media è pari a 0,57 mm.

La sfericità e la compattezza tornano ad avere un comportamento e una distribuzione simili a quelli dei primi provini analizzati.

La dimensione dei difetti risulta, generalmente, ridotta ed i difetti con ila valore più basso di gap (intorno a 1 mm) risultano quelli di diametro di 0,67 mm e 0,61 mm mentre negli altri il valore supera i 2 mm.

Volume di materiale scansionato = $18428,08 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti rilevati = $0,57 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti % < 0,01%



Figura 100. 6DgambaM290_1: immagine tomografica



Provino 6DgambaM290_2

Diametro

Tabella 37. 6DgambaM290_2: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sul diametro

	6DgambaM290_2
media	0,50
errore standard	0,0122
mediana	0,50
moda	0,54
deviazione standard	0,1282
varianza	0,0164
massimo	0,92
minimo	0,28
quantità	111

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0,2 - 0,25	0	0,0%	1%
0,25 - 0,3	3	2,7%	3%
0,3 - 0,35	6	5,4%	6%
0,35 - 0,4	21	18,9%	9%
0,4 - 0,45	11	9,9%	13%
0,45 - 0,5	12	10,8%	15%
0,5 - 0,55	15	13,5%	16%
0,55 - 0,6	18	16,2%	14%
0,6 - 0,65	12	10,8%	10%
0,65 - 0,7	5	4,5%	7%
0,7 - 0,75	3	2,7%	4%
0,75 - 0,8	3	2,7%	2%
0,8 - 0,85	0	0,0%	1%
0,85 - 0,9	1	0,9%	0%
0,9 - 0,95	1	0,9%	0%
0,95 - 1	0	0,0%	0%
1 - 1,05	0	0,0%	0%
1,05 - 1,1	0	0,0%	0%
1,1 - 1,15	0	0,0%	0%
1,15 - 1,2	0	0,0%	0%
1,2 - 1,25	0	0,0%	0%
1,25 - 1,3	0	0,0%	0%
1,3 - 1,35	0	0,0%	0%
1,35 - 1,4	0	0,0%	0%



Figura 101. 6DgambaM290_2: distribuzione di probabilità sul diametro



Sfericità

	6DgambaM290_2
media	0,60
errore standard	0,0047
mediana	0,61
moda	0,62
deviazione standard	0,0494
varianza	0,0024
massimo	0,71
minimo	0,49
quantità	111

Tabella 38. 6DgambaM290_2: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla sfericità

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,0%
0,05 - 0,1	0	0%	0,0%
0,1 - 0,15	0	0%	0,0%
0,15 - 0,2	0	0%	0,0%
0,2 - 0,25	0	0%	0,0%
0,25 - 0,3	0	0%	0,0%
0,3 - 0,35	0	0%	0,0%
0,35 - 0,4	0	0%	0,0%
0,4 - 0,45	0	0%	0,1%
0,45 - 0,5	2	2%	1,3%
0,5 - 0,55	12	11%	11,0%
0,55 - 0,6	32	29%	33,7%
0,6 - 0,65	39	35%	37,1%
0,65 - 0,7	24	22%	14,7%
0,7 - 0,75	2	2%	2,1%
0,75 - 0,8	0	0%	0,1%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 102. 6DgambaM290_2: distribuzione di probabilità sulla sfericità



Compattezza

	6DgambaM290_2
media	0,35
errore standard	0,0113
mediana	0,33
moda	0,32
deviazione standard	0,1194
varianza	0,0143
massimo	0,62
minimo	0,14
quantità	111

		frequenza	
intervallo	frequenza	%	gaussiana
0 - 0,05	0	0%	0,4%
0,05 - 0,1	0	0%	1,2%
0,1 - 0,15	2	2%	2,8%
0,15 - 0,2	5	5%	5,6%
0,2 - 0,25	19	17%	9,6%
0,25 - 0,3	14	13%	13,7%
0,3 - 0,35	20	18%	16,3%
0,35 - 0,4	11	10%	16,4%
0,4 - 0,45	11	10%	13,8%
0,45 - 0,5	14	13%	9,8%
0,5 - 0,55	9	8%	5,8%
0,55 - 0,6	4	4%	2,9%
0,6 - 0,65	2	2%	1,2%
0,65 - 0,7	0	0%	0,4%
0,7 - 0,75	0	0%	0,1%
0,75 - 0,8	0	0%	0,0%
0,8 - 0,85	0	0%	0,0%
0,85 - 0,9	0	0%	0,0%
0,9 - 0,95	0	0%	0,0%
0,95 - 1	0	0%	0,0%



Figura 103. 6DgambaM290_2: distribuzione di probabilità sulla compattezza

Tabella 39. 6DgambaM290_2: analisi statistica descrittiva e distribuzione di probabilità sulla compattezza

Г





Analisi qualitativa sui difetti di maggiore dimensione







Figura 104. 6DgambaM290_2: analisi qualitativa rispetto alle proiezioni delle aree, al gap e alla geometria sui difetti principali



Il numero di difetti individuati è 111.

La distribuzione sul diametro segue fedelmente la gaussiana di riferimento ma presenta una piccola concentrazione maggiore di risultati nell'intervallo 0,35 - 0,4 mm; la media è relativamente bassa rispetto alla maggior parte dei provini analizzati peri a 0,50 mm.

La distribuzione di probabilità riferita alla sfericità e la distribuzione di probabilità riferita alla compattezza continuano ad essere stabili negli stessi intervalli di valori.

Il difetto di dimensione pari a 0,92 mm presenta la proiezione dell'area rispetto al piano xy decisamente maggiore rispetto alle altre proiezioni con un valore pari a 0,37 mm². I valori di gap critici in questo caso sono caratteristici dei difetti di 0,92 mm e 0,75 mm con valori rispettivamente di 0,38 mm e 0,15 mm.

Volume di materiale scansionato = $16558,15 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti rilevati = $2,55 \text{ mm}^3$ Volume dei difetti % = 0,02%



Figura 105. 6DgambaM290_2: immagine tomografica



Confronto tra la EOS M 400-4 e la EOS M 290 nella generazione dei difetti

Tabella 40. Analisi statistica descrittiva: confronto tra EOS M 400-4 e EOS M 290

Diametro

	M404	M290
media	0,58	0,51
errore standard	0,0069	0,0030
mediana	0,57	0,49
moda	0,56	0,4
deviazione standard	0,1299	0,1547
varianza	0,0169	0,0239
massimo	0,93	1,31
minimo	0,25	0,23
quantità	355	2709

Sfericità

	M404	M290
media	0,60	0,59
errore standard	0,0025	0,0010
mediana	0,60	0,60
moda	0,59	0,63
deviazione standard	0,0469	0,0539
varianza	0,0022	0,0029
massimo	0,72	0,75
minimo	0,45	0,41
quantità	355	2709

Compattezza

	M404	M290
media	0,34	0,32
errore standard	0,0053	0,0021
mediana	0,33	0,32
moda	0,32	0,25
deviazione standard	0,0993	0,1109
varianza	0,0099	0,0123
massimo	0,64	0,7
minimo	0,13	0,07
quantità	355	2709



Confronto tra la presenza e l'assenza di overlapping nella generazione dei difetti

Tabella 41. Analisi statistica descrittiva: confronto tra presenza e assenza di overlapping

Diametro

	M404_ov	M404
media	0,56	0,61
errore standard	0,0083	0,0117
mediana	0,55	0,61
moda	0,55	0,62
deviazione standard	0,1288	0,1268
varianza	0,0166	0,0161
massimo	0,93	0,93
minimo	0,25	0,31
quantità	238	117

Sfericità

	M404_ov	M404	
media	0,60	0,60	
errore standard	0,0031	0,0041	
mediana	0,60	0,60	
moda	0,59	0,60	
deviazione standard	0,0484	0,0439	
varianza	0,0023	0,0019	
massimo	0,72	0,71	
minimo	0,45	0,51	
quantità	238	117	

Compattezza

	M404_ov	M404	
media	0,34	0,34	
errore standard	0,0065	0,0091	
mediana	0,33	0,34	
moda	0,35	0,32	
deviazione standard	0,0998	0,0986	
varianza	0,0100	0,0097	
massimo	0,61	0,64	
minimo	0,13	0,13	
quantità	238	117	



Confronto tra la disposizione "testa" e "gamba" nella generazione dei difetti

Tabella 42. Analisi statistica descrittiva: confronto tra disposizione "testa" e "gamba"

Diametro

	testa	gamba	
media	0,51	0,54	
errore standard	0,0030	0,0070	
mediana	0,49	0,54	
moda	0,40	0,55	
deviazione standard	0,1563	0,1268	
varianza	0,0244	0,0161	
massimo	1,31	0,93	
minimo	0,23	0,25	
quantità	2736	328	

Sfericità

	testa	gamba	
media	0,59	0,60	
errore standard	0,0010	0,0027	
mediana	0,60	0,60	
moda	0,63	0,61	
deviazione standard	0,0537	0,0483	
varianza	0,0029	0,0023	
massimo	0,75	0,72	
minimo	0,41	0,45	
quantità	2736	328	

Compattezza

	testa	gamba	
media	0,32	0,34	
errore standard	0,0021	0,0058	
mediana	0,32	0,33	
moda	0,34	0,32	
deviazione standard	0,1101	0,1052	
varianza	0,0121	0,0111	
massimo	0,7	0,62	
minimo	0,07	0,13	
quantità	2736	328	



I provini realizzati sulla M290 presentano una concentrazione generalmente maggiore di difetti con diametro relativamente piccolo (minore della media) rispetto ai provini costruiti con la M400-4, è evidente il contributo importante dei due provini provenienti dal campione 5D in questa considerazione.

Dal punto di vista statistico la sfericità risulta omogeneamente distribuita e non si evidenziano sostanziali differenze su questo parametro tra le macchine.

Lo stesso discorso varrebbe per la distribuzione della compattezza se non si tenesse in considerazione l'effetto dei provini 5D che espandono l'intervallo di esistenza a valori minimi di 0,07 e massimi di 0,7.

Il fenomeno dell'overlapping, come spiegato in precedenza, è osservabile solamente sulla EOS M 400-4. Dall'analisi emergere una leggera tendenza in media a generare difetti più grandi nel caso in cui il fenomeno non si presenti, anche i valori di moda e mediana sono coerentemente superiori. L'intervallo di variazione, invece, è pressoché lo stesso.

L'overlapping sembrerebbe non generare particolarità influenti sulla sfericità e sulla compattezza nella generazione dei difetti.

La disposizione "testa" presenta una maggiore quantità di difetti e un intervallo di variabilità maggiore rispetto alla disposizione "gamba", anche la dimensione dei difetti nella disposizione "testa" risulta lievemente inferiore; ma escludendo i provini 5D, invece, non si evidenzierebbero tali differenze. Un discorso analogo può essere condotto per quanto riguarda la compattezza, infatti il diverso campo di variabilità dipende sempre da quei due provini ma in questo caso i valori medi risultano simili. Infine, la sfericità conserva la sua integrità risultando il parametro che risente meno delle variazioni esterne del sistema restando in un intervallo intorno a 0,45 e 0,75.



Creazione del database

La scelta per la realizzazione del database è ricaduta sull'utilizzo di un foglio di calcolo di Excel sfruttando la funzione FILTRO, poiché si presta perfettamente alla gestione di relativamente limitate righe di informazioni che corrispondono alla totalità dei difetti rilevati nei provini analizzati (3064 nel nostro caso).

Questa funzione permette la selezione dei parametri secondo criteri di logica AND e OR oppure secondo operatori matematici che permettono la selezione di gruppi continui di dati (maggiore, minore, compreso tra, uguale, diverso, superiore alla media) particolarmente adatti allo studio di dati numerici ma anche alfabetici. Inoltre, è possibile combinare criteri di logica e personalizzare la ricerca evidenziando gli aspetti cercati.

Sono stati raccolti tutti i dati utili alla definizione del database ed eliminati quelli superflui come, ad esempio, la voce LABEL che assegnava un'etichetta numerica ad ogni difetto al singolo provino (il numero di riga assume la stessa funzione) ed è stato associato il nome del provino ai corrispondenti difetti.

Fil	e <u>Home</u> Inseris	sci Layout di pagin	a Formule	Dati Revisio	one Visualizza	Guida	
Ľ	Taglia	9 ~ A^ A =	- A^ A = = = ≫ - 20 Testo a cap		Genera	ale ~	
Inc	olla 🗸 Copia 🗸	G C <u>S</u> ~ ⊞ ~	<u>~</u> ~ <u>A</u> ~ =	==	•= 🔁 Unisci e alli	nea al centro 👻 🖙 🗸	% 000 500 .00 Form
	Appunti 🛛	Carattere	12		Allineamento	5	Numeri 🕠
		d f. Sama					
AI	• • • •	Jx Samp	le				
- 24	A	В	c		D	E	F
-	Sample	Probability	Hadius [mm]		liameter (mm)	Center x [mm]	Centery [mm]
2	1DtestaM404-1-over	1,43	2↓ Ordina c	lal più piccolo al	più grande	-5.64	-4,13
4	1DtestaM404-1-over	1,37	Z Ordina d	al allo ana al a	niù nienele	-5,04	0.72
5	1DtestaM404-1-over	1,25		ial plu grande al j		3 77	4.24
6	1DtestaM404-1-over	1.24	Ordina pe	r colore	>	-7.49	2.62
7	1DtestaM404-1-over	1.22				-9.5	-1.98
8	1DtestaM404-1-over	1.22	Visualizza:	zione <u>f</u> oglio	>	7 32	-0.12
9	1DtestaM404-1-over	1.21		Charles In 1975 and 1		17	1.68
10	1DtestaM404-1-over	1.2	→ J≩ <u>C</u> ancella	filtro da "Diame	ter [mm]"	-3.14	4 97
11	1DtestaM404-1-over	1 19	Filtra per o	olore	>	6.45	0.63
12	1DtestaM404-1-over	1,19	- Inter per e			0,45	0,03
12	1DtestaM404-1-over	1,10	<u>Eiltri per n</u>	umeri	>	Uguale a	0,34
14	1DtestaM404-1-over	1,17			~		-1.26
16	1DtestaM404-1-over	1,15	Cerca		2	<u>D</u> iverso da	4.10
16	1DtestaM404-1-over	1,14		leziona tutto)	^		4,19
10	1DtestaM404-1-over	1,14	202	3		Maggiore di	0,89
17	1DtestaM404-1-over	1,14		4			1,54
18	1DtestaM404-1-over	1,12		~		Maggiore o <u>u</u> guale a	-3,26
19	1DtestaM404-1-over	1,11	🗹 0,2	5		Minore di	-1,81
20	1DtestaM404-1-over	1,11		6		<u>IM</u> ITOLE CI	-2,28
21	1DtestaM404-1-over	1,09		7		Minore o uquale a	1,99
22	1DtestaM404-1-over	1,09		8			-2,15
23	1DtestaM404-1-over	1,09		9		<u>T</u> ra	-3,58
24	1DtestaM404-1-over	1,09					-0,16
25	1DtestaM404-1-over	1,05			~	<u>P</u> rimi 10	2,74
26	1DtestaM404-1-over	1,05					3,59
27	1DtestaM404-1-over	1,05		OK	Annulla	Superiore alla media	1,07
28	1DtestaM404-1-over	1,04			.:	Inferiore alla media	2,32
29	1DtestaM404-1-over	1,04	0,5		0,59	Interiore and media	0,47
30	1DtestaM404-1-over	1,03	0,32		0,64	Filtro personalizzato	0,79
31	1DtestaM404-1-over	1,03	0,24		0,49	Litto personalizzato	-2,95
32	1DtestaM404-1-over	1,03	0,28		0,55	-0,81	4,54
33	1DtestaM404-1-over	1,02	0,31		0,61	-4,02	0,99
34	1DtestaM404-1-over	1,02	0,46		0,93	0,55	2,06
35	1DtestaM404-1-over	1,02	0,3		0,6	4,02	0,02
36	1DtestaM404-1-over	1,02	0,25		0,5	-7,86	-1,51
37	1DtestaM404-1-over	1,01	0,31	0,31 0,62		4,25	2,54
38	1DtestaM404-1-over	1,01	0,22		0,44	-8,93	-0,59
39	1DtestaM404-1-over	1,01	0,24	0,24 0,48		7,11	3,71
40	1DtestaM404-1-over	1,01	0,39	0,39 0,77		4,11	-1,05
41	1DtestaM404-1-over	1,01	0,24	0,24 0,48		9,43	0,78
42	1DtestaM404-1-over	1,01	0,36	0,36 0,72		-0,04	0,12
43	1DtestaM404-1-over	1,01	0,32	0,32 0,64		10,72	-5,95
44	1DtestaM404-1-over	1,01	0,31	0,31 0,62		3,14	0,88
45	1DtestaM404-2-over	1,48	0,33		0,66	-8,19	-2,74
46	1DtestaM404-2-over	1,37	0,33		0,66	11,49	-3,95
47	1DtestaM404-2-over	1,3	0,28		0,57	2,22	6,25
48	1DtestaM404-2-over	1,27	0,36		0,71	-2,79	5,52
	() → 2D(3D)ga	ambaM404ove 3D	(2D)testaM404	3DtestaM404	4DgambaM404	4DgambaM404-ovm	ix 5DTestaM290

Figura 106. esempio di parte del database in cui viene mostrata la funzione FILTRO



Conclusioni

Le tecnologie di additive manufacturing introducono una forte componente di innovazione nel campo della produzione industriale, permettendo un miglioramento di prodotto sia nel design, che si traduce in risparmio di peso e di materiale, e sia nelle caratteristiche meccaniche, grazie alla microstruttura particolarmente fine generabile dal processo. Queste caratteristiche peculiari hanno portato un notevole investimento di ricerca e sviluppo in particolar modo nei settori aerospaziali, automotive e biomedicali, che trovano nel mondo dell'additive manufacturing una soluzione affidabile nell'aumento dell'efficienza e della qualità dei prodotti e dei processi. La lega AlSi10Mg (come noto dalla letteratura) si presta perfettamente al processo DMLS garantendo pezzi di alta qualità e l'utilizzo della tomografia industriale computerizzata si è rivelato essere un preciso ed efficiente metodo di investigazione dei difetti senza dover ricorrere al sezionamento del campione.

Lo studio svolto ha come scopo la caratterizzazione dei difetti prodotti su una forcella automobilistica tramite il processo di DMLS. I campioni analizzati presentano diversi dettagli di processo (costruiti su due macchine, alcuni presentano overlapping, prodotti con due differenti disposizioni) per arricchire il contenuto dell'analisi, il numero dei campioni è limitato e i parametri di processo delle macchine, nella realizzazione, sono rimasti invariati; per queste ragioni l'analisi si prefissa di osservare i difetti generati e fornire un'analisi dimensionale e geometrica, non si studiano quindi le cause che hanno portato alla generazione dei difetti che richiederebbe di valutare un maggior numero di provini variando anche i parametri di processo delle macchine. Lo studio evidenzia che la quantità di difetti generati è una piccola percentuale del volume del componente (quantità valutate solo nella parte di componente scansionato) con dimensioni che in media si aggirano intorno alla metà del millimetro. I dati sulla forma si mantengono generalmente stabili al variare delle condizioni di produzione mentre la dimensione tende a diminuire per i componenti prodotti sulla EOS M 290 e contemporaneamente su questa macchina si osserva una maggiore generazione del numero di difetti (queste conclusioni sono fortemente influenzate dai due provini del campione 5D il cui comportamento si discosta dal resto dei provini scansionati, bisognerebbe approfondire l'analisi su questi provini per comprendere i motivi della divergenza). La qualità generale dei componenti prodotti dalla EOS M 400-4 è confrontabile con la qualità dei pezzi prodotti dalla EOS M 290 quindi l'integrazione della prima nel processo produttivo permetterebbe un aumento della produttività mantenendo la qualità del prodotto.

Riferimenti

- [1] T. Wholers e T. Gornet, «History of additive manufacturing,» *Wholers Report*, 2016.
- [2] D. Pham, S. Dimov e R. Gault, «Part Orientation in Stereolithography,» *The International Journal* of Advanced Manufacturing Technology, pp. 674-682, 1999.
- [3] 3D Systems, [Online]. Available: https://www.3dsystems.com. [Consultato il giorno 15 Marzo 2021].
- [4] A. Sidambe, «Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium Implants A Review,» Dicembre 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net. [Consultato il giorno 17 Marzo 2021].
- [5] SLM Solutions Group, [Online]. Available: https://www.slm-solutions.com. [Consultato il giorno 31 Marzo 2021].
- [6] EOS GmbH, [Online]. Available: https://www.eos.info. [Consultato il giorno 30 Marzo 2021].
- [7] GE Additive, [Online]. Available: https://www.ge.com. [Consultato il giorno 31 Marzo 2021].
- [8] 3Faktur, [Online]. Available: https://3faktur.com/en. [Consultato il giorno 2 Aprile 2021].
- [9] D. Sher, «3D Printing Media Network,» 14 Dicembre 2018. [Online]. Available: https://www.3dprintingmedia.network/the-global-additive-manufacturing-market-2018-is-worth-9-3-billion/. [Consultato il giorno 2 Aprile 2021].
- [10] T. Boissonneault, «3D Printing Media Network,» 23 Ottobre 2018. [Online]. Available: https://www.3dprintingmedia.network/smartech-report-metal-service-bureaus/. [Consultato il giorno 2 Aprile 2021].
- [11] I. Bahnini, M. Rivette, A. Rechia, A. Siadat e A. Elmsebahi, «Additive manufacturing technology: the status, applications,,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 147-161, 27 Marzo 2018.
- T. Austin-Morgan, «Design optimisation for additive manufacturing, Eureka!,» 5 Luglio 2016.
 [Online]. Available: https://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-news/design-optimisation-for-additive-manufacturing/143016/. [Consultato il giorno 6 Aprile 2021].
- [13] S. Saxena, «Embedding Conformal Cooling Channels in Injection Moulding using Metal Additive Manufacturing, Linkedin,» 1 Dicembre 2018. [Online]. Available: https://www.linkedin.com/pulse/embedding-conformal-cooling-channels-injection-mouldingsaxena. [Consultato il giorno 6 Aprile 2021].
- C. Blain, «Additive Manufacturing Can Reduce Part Counts Significantly, DesignNews,» 18
 Settembre 2018. [Online]. Available: https://www.designnews.com/automation-motion-



control/additive-manufacturing-can-reduce-part-counts-significantly. [Consultato il giorno 6 Aprile 2021].

- [15] «3-D printed prosthetics are fashion statements for amputees, KALW,» 16 Dicembre 2015. [Online]. Available: https://www.kalw.org/show/crosscurrents/2015-12-16/3-d-printed-prostheticsare-fashion-statements-for-amputees. [Consultato il giorno 6 Aprile 2021].
- [16] P. Fino, materiale del corso "materiali per la fabbricazione additiva", Torino, 2020.
- [17] E. E. Modic, «Additive manufacturing orthopedic implants, Today's Medical Developments,» 12 Marzo 2018. [Online]. Available: https://www.todaysmedicaldevelopments.com/article/renishawadditive-manufacturing-orthopedic-implants/. [Consultato il giorno 6 Aprile 2021].
- [18] A. Kirchheim, H.-J. Dennig e L. Zumofen, «Why Education and Training in the Field of Additive Manufacturing is a Necessity,» Gennaio 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/319509716_Why_Education_and_Training_in_the_Fiel d_of_Additive_Manufacturing_is_a_Necessity. [Consultato il giorno 6 Aprile 2021].
- [19] F. Calignano, materiale del corso "tecniche di fabbricazione additiva Design for Additive Manufacturing", Torino, 2020.
- [20] L. Monaco, E. Masoero, D. M. Sardella e L. Trovato, «Progetto Tecniche per la Fabbricazione Additiva:"Applicazione del Design for Additive Manufacturing ad un componente per Lotus Elise S1 (1996)",» Torino, 2020.
- [21] S. M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei e A. Yadollahi, «An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing;,» *Elsevier*, pp. 36-62, 20 Luglio 2015.
- [22] L. Iuliano, materiale del corso "tecniche di fabbricazione additiva", Torino, 2020.
- [23] D. Janner, materiale del corso "materiali per la fabbricazione additiva", Torino, 2020.
- [24] D. Schwarze, «Selective Laser Melting Eine produktive Fertigungstechnologie Automatisierung Qualitätssicherung, SLM Solutions,» 6 Novembre 2015. [Online]. [Consultato il giorno 21 Aprile 2021].
- [25] F. Trevisan, F. Calignano, M. Lorusso, J. Pakkanen, A. Aversa, E. P. Ambrosio, M. Lombardi, P. Fino e D. Manfredi, «On the Selective Laser Melting (SLM) of the AlSi10Mg Alloy: Process, Microstructure, and Mechanical Properties,» *Materials*, 2017.
- [26] «Material Used In Selective Laser Meltin (SLM), Matmatch,» [Online]. Available: https://matmatch.com/learn/material/materials-used-in-selective-laser-melting-slm. [Consultato il giorno 14 Aprile 2021].
- [27] C. Galy, E. Le Guen, E. Lacoste e C. Arvieu, «Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM,» *Elsevier*, pp. 165-175, 2018.



- [28] N. Read, W. Wang, K. Essa e M. Attalah, «Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development,» *Materials & Design, Esevier*, vol. 65, pp. 417-424, 2015.
- [29] T. Kimura e T. Nakamoto, «Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting,» *Materials & Design, Elsevier*, vol. 89, pp. 1294-1301, 2016.
- [30] I. Yadroitsev, L. Thivillon, P. Bertrand e I. Smurov, «Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder,» *Applied Surface Science*, *Elsevier*, vol. 254, n. 4, pp. 980-983, 2007.
- [31] W. Shifeng, L. Shuai, W. Qingsong, C. Yan, Z. Sheng e S. Yusheng, «Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts,» *Journal of Materials Processing Technology, Elsevier*, vol. 214, n. 11, pp. 2660-2667, 2014.
- [32] T. G. Spears e S. A. Gold, «In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing,» *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, n. 5:2, 2016.
- [33] R. Doglione, materiale del corso "materiali per l'industria meccanica", Torino, 2019.
- [34] E. Brandl, U. Heckenberger, V. Holzinger e D. Buchbinder, «Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior,» *Materials and Design, Elsevier*, n. 34, pp. 159-169, 2012.
- [35] X. Cai, A. A. Malcom, b. S. Wong e Z. Fan, «Measurement and characterization of porosity in aluminium selective laser melting parts using X-ray CT,» *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, n. 4, pp. 195-206, 2015.
- [36] «Armgate,» [Online]. Available: https://www.armgate.lv/en/products/equipment-for-science-and-research/3D%20Computed%20tomography%20and%202D%20X-ray%20inspection/product-temporary-link-00876.html#prettyPhoto. [Consultato il giorno 15 Giugno 2021].
- [37] «DirectIndustry,» [Online]. Available: https://pdf.directindustry.it/pdf-en/volume-graphicsgmbh/vgstudio-max/147738-896035.html#open. [Consultato il giorno 15 Giugno 2021].
- [38] K. Taylor-Smith, «Azom materials,» 12 Agosto 2020. [Online]. Available: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=19524. [Consultato il giorno 2 Aprile 2021].