

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in
Ingegneria Gestionale



A Study on Quality Control Problems in Additive Manufacturing

Relatore: Prof. Bianca Maria COLOSIMO

Correlatore: Dott. Ing. Marco GRASSO

Tesi di Laurea di:

Stefano MAURI Matr. 799577

Anno Accademico 2013 - 2014

Abstract

Le tecnologie di produzione additiva, additive manufacturing (AM), sono state inizialmente proposte per applicazioni di “Rapid Prototyping”, con l’obiettivo di ottenere una rapida produzione di prototipi con costi e tempi ridotti rispetto alle tecnologie tradizionali. Più recentemente, lo sviluppo tecnologico ha portato ad una elevata versatilità di tali processi in vari settori industriali, dall’automotive all’aerospazio, dal biomedicale all’energy, per parti funzionali e produzioni in serie.

Le tecnologie AM aprono nuove possibilità produttive, per esempio per parti dalla geometria complessa difficili (o impossibili) da ottenere con altri processi, o la riprogettazione di componenti integrali per evitare operazioni di assemblaggio. Tuttavia, introducono nuove sfide che devono essere affrontate per poter sfruttare appieno le potenzialità AM, tra cui le problematiche legate al controllo e al monitoraggio della qualità.

Questo lavoro di tesi presenta un’analisi dello stato dell’arte tecnologico e applicativo, con particolare riferimento ai problemi legati al controllo della qualità dei processi AM. Viene inoltre studiato il problema della caratterizzazione della porosità, di particolare rilievo in questo ambito. La presenza di pori può infatti essere legata a difettosità ed errori di processo, ma può anche essere una caratteristica desiderata, a seconda del tipo di applicazione.

Viene infine presentato un metodo per la caratterizzazione ed il monitoraggio di superfici porose basato sulla stima della densità di probabilità di indici sintetici. Il metodo viene dimostrato utilizzando dati reali da misure su componenti in schiuma metallica, ma è pensato per poter essere esteso a processi AM.

Sommario

Introduzione	6
Capitolo 1 Lo stato dell'arte su Additive Manufacturing	10
1.1 I processi additivi	10
1.2 Le tecnologie AM.....	11
1.2.1 Processo di Fotopolimerizzazione	11
1.2.2 Extrusion based systems	12
1.2.3 Three-Dimensional Printing	13
1.2.4 Processi di Sheet Lamination.....	14
1.2.5 Processi di "Beam deposition"	16
1.2.6 Processi di "Direct Writing".....	18
1.3 Il processo produttivo Powder Bed Fusion (PBF)	19
1.3.1 I fenomeni di fusione.....	20
1.3.2 Impiego delle tecnologie PBF	23
1.3.3 Varianti del processo PBF	24
1.4 Ricerche e applicazioni in ambito Selective Laser Melting	27
1.4.1. Aumento build rate e High power Selective Laser Melting	27
1.4.2 Proprietà meccaniche, morfologia e parametri di processo	30
1.5 Applicazioni Selective Laser Melting	32
Capitolo 2 Il controllo qualità in ambito AM.....	38
2.1 Compensazione delle distorsioni geometriche	39
2.2 Controllo qualità in-process – distribuzione delle polveri.....	45
2.3 Controllo qualità in-process – controllo del Melt Pool.....	46
2.4 Controllo qualità in-process – controllo della zona di lavorazione	49
2.5 Monitoraggio di un processo EBM	52
2.6 Monitoraggio di processi plastici.....	54
2.6.1 Controllo per SLS a polveri plastiche	54
2.6.2 Monitoraggio per processi 3DP	56
Capitolo 3 Caratterizzazione della porosità	58
3.1 Analisi della porosità	58
3.1.2 Local Porosity Theory	60
3.2 Metodi di misura.....	62
Capitolo 4 Metodologia di analisi della porosità.....	69
4.1 I provini e l'analisi d'immagine	69
4.2 Correlazione spaziale.....	71
4.3 Densità di probabilità mediante Kernel Density Estimation.....	71
4.4 Profile monitoring via Principal Component Analysis.....	76
4.4.1 Il controllo multivariato mediante Carte di Hotelling e Carte Q..	78
Capitolo 5 Analisi dei risultati	81
5.1 Gli indicatori	81

5.2 Stima della funzione di densità	85
5.3 Profile monitoring.....	90
Conclusioni	98
Bibliografia	100

Elenco delle figure

Fig I.1: le potenzialità dell'Additive Manufacturing.....	6
Fig I.2: curva Gartner per le tecnologie Additive aggiornata al 2014	7
Fig 1.1: esempio di processo SL.....	12
Fig 1.2: in alto schema di funzionamento FDM. Sotto dettaglio ugelli.....	13
Fig 1.3 schema di funzionamento di un processo 3DP	14
Fig 1.4: esempio di funzionamento di un processo Beam Deposition	17
Fig 1.5 esempio di processo Powder Bed Fusion.....	20
Fig 1.6 schema del processo di sintering.....	21
Fig 1.7: materiali impiegati per ricerche in ambito HP-SLM con il rimando bibliografico al lavoro che li impiega.....	28
Fig 1.8: conseguenza della craniotomia sul paziente	33
Fig 1.9: modello per la protesi.....	34
Fig 1.10: prototipi funzionali presentati in Mei02	34
Fig 1.11: prototipi metallici ottenuti da Texer Design.....	35
Fig 1.12: applicazioni additive in ambito aerospaziale	35
Fig 1.13: portamozzini di Kepler Motors sviluppato in partnership a CRP Meccanica	36
Fig 2.1: dettaglio di un cilindro, in blu la forma nominale in rosso quella reale	39
Fig 2.2: a sinistra sezione del cilindro nominale (in nero) e reale (rosso). A destra profilo di shrinkage per il cilindro	40
Fig 2.3: deformazione dovuta al fenomeno di shrinkage in funzione dell'angolo considerato. A sinistra i valori osservati, a destra quelli stimati e quelli reali.....	41
Fig 2.4: la linea tratteggiata mostra le diverse zone di compensazione. In nero è illustrato il profilo del cilindro nominale	42
Fig 2.5: i quattro cilindri lavorati, con le rispettive compensazioni	44
Fig 2.6: nella figura in alto è possibile vedere il letto di polveri in presenza di errori nella distribuzione. Nella figura sotto viene invece tracciata la linea del profilo ottenuta come media delle tonalità di grigio	46
Fig 2.7: a sinistra sezione del melt pool, a destra livello di colore in funzione della distanza	47
Fig 2.8: carte di controllo provenienti da un sistema di monitoraggio del melt pool durante la lavorazione di una zona sporgente	48

Fig 2.9: risultati ottenuti in [Kru07] con due diverse strategie di passate, con o senza sistema di feedback.....	48
Fig 2.10: sistema di monitoraggio impiegato in [Kra12].....	49
Fig 2.11: valore misurato per l'area del melt pool in funzione di diversi parametri.....	51
Fig 2.12: profilo di melt pool in presenza di una cavità artificiale	51
Fig 2.13: al centro l'immagine rilevata dalla camera IR, intorno le sezioni dei sei prodotti finiti lungo il novantesimo layer	53
Fig 2.14 schema del sistema di rilevazione impiegato in Weg11	54
Fig 2.15: distribuzione di temperatura nella zona osservata	55
Fig 2.16: risultati ottenuti in Weg11.....	56
Fig 3.1: pore size distribution.....	60
Fig 3.2: funzione di "local porosity distribution"(tratteggiata) e di "local percolation probability" (linea continua) ottenute con diversi valori di L	61
Fig 3.3: schema della struttura di un materiale poroso. E' possibile vedere la differenza fra "Pore Body" e "Pore throat"	62
Fig 3.4: molten pool a spessori di layer crescenti.....	64
Fig 3.5: densità in funzione della velocità di passata per un prodotto in AlSi 316L	65
Fig 3.6: risultati ottenuti a seguito di un processo LSR sulla superficie del prodotto	66
Fig 3.7: esempio di tomografia su un intero pezzo (con immagine 2D come output) o su una sola sezione (con immagine 1D come output)	68
Fig 4.1: provini della schiuma denominata "Sample1"	69
Fig 4.2: provini della schiuma denominata "Sample2"	70
Fig 4.3: provini della schiuma denominata "Sample3"	70
Fig 4.4: Schema logica del metodo di analisi seguito per l'analisi della porosità	72
Fig 4.5: esempi di Kernel impiegabili.....	73
Fig 4.6: le due componenti P1 e P2 meglio si adattano a spiegare la variabilità del processo.	77
Fig 5.1: output grafico ottenuto mediante ImageJ. I pori sono contrassegnati mediante un numero in rosso.....	82
Fig 5.2: boxplot per i valori di Area dei pori per ciascun sample.....	83
Fig 5.3: i valori di bandwidth ottimale per i tre diversi sample.	86
Fig 5.4: confronto fra i dati originari e quelli ottenuti mediante trasformazione logaritmica, per la sezione 27 di sample2	87
Fig 5.5: valori di bandwidth ottimale per i tre sample a seguito della trasformazione logaritmica	88

Fig 5.6: funzioni di densità per i valori di area trasformati mediante funzione logaritmica. L'intestazione di ogni grafico indica la schiuma di appartenenza delle funzioni di densità riportate.....	89
Fig 5.7: Cumulata della percentuale di varianza spiegata dalle componenti principali per sample1.....	91
Fig 5.8: Cumulata della percentuale di varianza spiegata dalle componenti principali per sample2.....	91
Fig 5.9: cumulata della percentuale di varianza spiegata dalle componenti principali per Sample3.....	92
Fig 5.10: Carte di controllo di Fase I (Sample 1)	92
Fig 5.11: Carte di controllo di Fase I (Sample 2)	93
Fig 5.12: Carte di controllo di Fase I (Sample 3)	93
Fig 5.13: profilo della sezione corrispondente al punto fuori controllo in FaseI per Sample2.....	94
Fig 5.14: profilo della sezione corrispondente al punto fuori controllo in FaseI per Sample2.....	94
Fig 5.15: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 1 e testing set basato su dati da Sample 2.....	95
Fig 5.16: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 1 e testing set basato su dati da Sample 3.....	95
Fig 5.17: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 2 e testing set basato su dati da Sample 1.....	96
Fig 5.18: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 2 e testing set basato su dati da Sample 3 - Il limite di controllo per la carta Q è prossimo al valore medio delle Q e quindi non visibile	96
Fig 5.19: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 2 e testing set basato su dati da Sample.....	96
Fig 5.20: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 3 e testing set basato su dati da Sample 2.....	97

Introduzione

Con il termine ‘Additive Manufacturing’ (AM) ci si riferisce ad un insieme di tecnologie produttive che permettono la stampa di oggetti tridimensionali mediante la sovrapposizione di più layer dello stesso materiale secondo una logica additiva. In antitesi con le lavorazioni classiche, quindi, le tecnologie di questo tipo, note anche con il nome di ‘3D printing’, sono caratterizzate da un processo additivo, che aggiunge il materiale strato su strato per ottenere il pezzo desiderato (Fig I.1).



Fig I.1: le potenzialità dell’Additive Manufacturing (da http://eusa-riddled.blogspot.it/2013_06_09_archive.html)

In questo modo si riducono notevolmente le problematiche delle produzioni ‘subtractive’, quali la fattibilità produttiva di un design particolarmente complesso, l’analisi dell’ordine di produzione dei diversi pezzi e le relative problematiche di assemblaggio, ottenendo così un maggior grado di libertà nella progettazione delle forme del prodotto finito [Gib10]. Dal punto di vista dell’impatto ambientale, inoltre, queste tecnologie permettono una notevole riduzione degli sprechi per la produzione di un pezzo, dal momento che il materiale di cui è costituito il prodotto finito viene impiegato unicamente dove è necessario per il processo produttivo.

Le tecnologie AM sono state inizialmente proposte per applicazioni di “Rapid Prototyping”, con l’obiettivo di ottenere una rapida produzione di prototipi con elevata precisione e costi e tempi ridotti rispetto alle tecnologie tradizionali. Tuttavia, lo sviluppo tecnologico ha portato ad una elevata versatilità anche in ambiti produttivi per prodotti funzionali e produzioni in serie. L’evoluzione

della terminologia “Additive Manufacturing” ha quindi seguito di pari passo i cambiamenti verificatisi nell’impiego di tale tecnologia [Gib10], passando da una iniziale diffusione nell’ambito della prototipazione per approdare successivamente, grazie all’aumento dei materiali lavorabili, della qualità del processo e alla proliferazione di tecnologie di diversa natura, nel mondo della manifattura.

Le tecnologie additive, ad oggi, sono ancora nella loro fase di sviluppo, come riportato dalla curva Hype Cycle di Gartner [Gar11]. Grazie alle loro caratteristiche e peculiarità, esse stanno attirando l’attenzione in diversi ambiti, da quello artigianale, di notevole importanza in Italia, a quello industriale e biomedico.

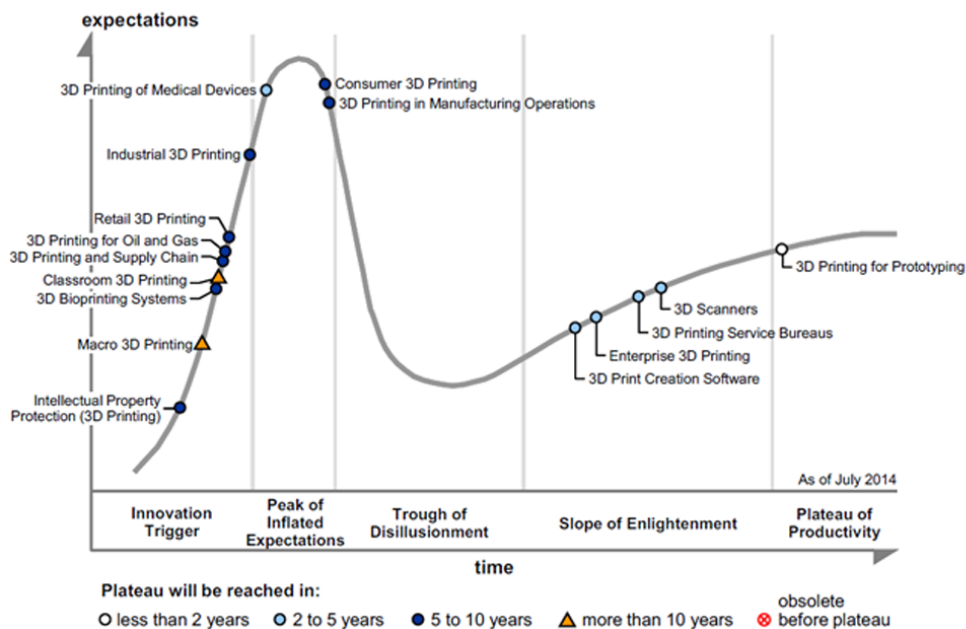


Fig I.2: curva Gartner per le tecnologie Additive aggiornata al 2014 (fonte www.gartner.com/newsroom/id/2819918)

La portata rivoluzionaria di tali tecnologie non si “limita” al solo aspetto produttivo, ma coinvolge numerosi altri settori, da quello dello sviluppo di software per la progettazione 3D a quello della produzione di materiali adatti ai processi additivi. Come si vedrà nei capitoli successivi, ancora molto deve essere fatto per permettere a tali tecnologie di affermarsi nei vari ambiti produttivi, ma il passaggio dal semplice ambito della prototipazione a quello produttivo è ormai incontrovertibile.

Seppure i primi tentativi di ottenere oggetti solidi a partire da fotopolimeri risalgano agli ultimi anni Sessanta, la nascita vera e propria della tecnologia

Additive avvenne nel 1986, anno in cui Charles Hull depositò il suo brevetto per la lavorazione di fotopolimeri. Negli anni successivi all'introduzione di tale tecnologia, che prese il nome di "Stereolitografia" (SL), si moltiplicarono le tecniche utilizzabili per la produzione secondo una logica additive e, come si è già detto, dall'ambito della prototipazione si passò al settore della produzione industriale di prodotti finiti [Woh11]. Oggigiorno, in tale settore, risulta particolarmente interessante e promettente lo sviluppo delle due tecnologie Selective Laser Melting ed Electron Beam Melting, che permettono di ottenere prodotti metallici.

E' chiaro che, nel passaggio dall'ambito di prototipazione a quello industriale, la necessità di indagare a fondo alcuni aspetti rilevanti per la produzione in serie si fa rilevante, soprattutto per le tecnologie a polveri metalliche sopra citate. Rientrano tra questi aspetti le ricerche svolte al fine di aumentare la produttività del processo produttivo [Buc11], di identificare nuovi materiali di lavorazione e strategie produttive per migliorare la qualità dei prodotti finiti [Cra11][Yad11][Kru09]. Infine, fondamentali per l'impiego di tecnologie additive in una produzione in serie, sono le ricerche nell'ambito del controllo della qualità. Queste sono state svolte lungo diverse direzioni, dagli studi sulla compensazione preventiva del prodotto [Hua13] alle indagini su metodi di controllo on line della qualità del prodotto, mediante il monitoraggio di alcuni parametri di processo ritenuti fortemente influenti sul prodotto finito [Cra11]. Altri lavori saranno presentati più avanti.

E' nell'ambito delle metodologie di controllo della qualità di processo che si inserisce e si sviluppa il seguente lavoro di tesi, che ha un duplice obiettivo:

- Effettuare uno stato dell'arte sulle tecnologie AM e sulle problematiche legate al loro impiego per la produzione industriale;
- studiare un possibile sistema per il controllo della porosità in un prodotto ottenuto mediante tecnologia AM.

Come verrà mostrato più avanti, infatti, uno dei principali problemi a cui si deve far fronte in questo tipo di produzione è la percentuale di pori presenti all'interno del prodotto finito. Intrinseco nella natura del processo produttivo, tale fenomeno può alterare e compromettere fortemente le caratteristiche meccaniche del prodotto finito e può portare alla formazione di cricche e rotture a fatica [Kru09][Kru04].

Nella seconda parte del presente lavoro di tesi viene presentata una nuova metodologia per il monitoraggio della porosità basato sulla misura di indicatori superficiali (e.g., l'area dei singoli pori) e sulla caratterizzazione della porosità attraverso lo studio delle curve di densità di probabilità dell'indicatore.

Una prima valutazione delle prestazioni offerte dal metodo proposto è stata effettuata considerando delle parti realizzate per schiumatura di una polvere di alluminio, cioè parti in cosiddetta “schiuma metallica”. I metodi studiati per la caratterizzazione della porosità di tali parti possono quindi essere estesi in progetti di ricerca futuri alle parti realizzate attraverso AM.

Il lavoro qui presentato si articola in diverse sezioni. Nella prima viene riportata una panoramica generale sui processi produttivi progettati e utilizzabili in ambito Additive, ciascuno dei quali viene brevemente descritto nelle sue caratteristiche principali. Un particolare riguardo è dato alla tecnologia Selective Laser Melting, candidata alla futura produzione di schiume metalliche. Sono qui riportate anche alcune applicazioni di quest’ultima tecnologia. Nella seconda sezione vengono invece prese in considerazione le diverse metodologie per il controllo della qualità di un generico processo Additive. Nella terza sezione si introduce invece la problematica legata alla misura ed alla descrizione della porosità in un generico prodotto poroso (definito Pore Medium). Nella quarta sezione viene presentata la struttura dell’analisi seguita al fine di identificare una metodologia di caratterizzazione della porosità per la successiva costruzione di carte di controllo. Il lavoro si conclude con un capitolo dedicato all’analisi dei risultati ottenuti.

Capitolo 1

Lo stato dell'arte su Additive Manufacturing

In questo capitolo viene fornito un quadro delle tecnologie additive, al fine di presentare i benefici che rendono queste tecnologie così promettenti in ambito industriale. Un occhio di riguardo è dedicato alla tecnologia Selective Laser Melting, della quale sono rapidamente riportati i principali ambiti di ricerca e le applicazioni. La classificazione qui seguita per la descrizione delle tecnologie additive è tratta da [Gib10].

1.1 I processi additivi

Pur differenziandosi, anche fortemente, per materiali lavorati, precisione di processo e tempi di produzione, le numerose tecnologie additive sono accomunate dalla logica che presiede il processo produttivo di ciascuna di esse [Gib10]. E' quindi di seguito illustrato, nel modo più generico possibile al fine di cogliere tutte le caratteristiche comuni, lo schema logico di un processo produttivo additive. I dettagli produttivi per le diverse tecnologie sono invece trattati singolarmente nei paragrafi successivi.

Il punto di partenza è la modellazione software del pezzo nello spazio, le cui dimensioni e caratteristiche geometriche vengono descritte mediante un file CAD. Tale file è successivamente convertito nel formato STL¹, che suddivide la superficie in una serie di 'slice' (fette) utilizzate poi dalla macchina per la costruzione dei layer. L'output così ottenuto viene inviato alla macchina, sulla quale è ancora possibile apportare alcune modifiche al modello software, quali ad esempio la correzione di alcune dimensioni, l'orientamento del pezzo durante la costruzione² e il suo posizionamento all'interno del letto di produzione. Viene poi effettuato il set-up della macchina mediante la definizione dei parametri di processo e, successivamente, inizia la produzione. Al termine del processo, il pezzo viene rimosso dalla macchina, ripulito e inviato, eventualmente, alle fasi di post-produzione, che possono prevedere trattamenti specifici in base al materiale utilizzato, alla tecnologia additive scelta e alle proprietà del prodotto finito desiderate.

Il passaggio da file CAD a STL è un passaggio delicato, dal momento che la conversione può portare a numerosi errori [Nav12] che, se non prontamente

¹ Il formato STL (STereoLitography), creato dalla società 3Dsystem, si è imposto quale standard per la produzione additive fin dalle sue origini, coincidenti con la creazione della prima macchina AM da parte dell'azienda stessa.

² L'orientamento può risultare fondamentale per la riduzione dei tempi di lavorazione e per l'accuratezza del prodotto finito [Gib10]

identificati e corretti, possono comportare la rottura o la formazione di difetti nel prodotto finito. In particolar modo, in presenza di forme complesse, i triangoli potrebbero risultare male allineati; per evitare ciò, sono stati sviluppati software che verificano l'effettiva correttezza del file STL, identificando e correggendo eventuali errori [Gib10].

1.2 Le tecnologie AM

Come già specificato, la produzione mediante logica additiva può essere declinata in un vasto insieme di tecnologie, che differiscono tra loro sotto molti aspetti, dalle peculiarità del processo produttivo ai differenti materiali lavorati e alle diverse caratteristiche del prodotto finito. Vengono illustrate, in questo paragrafo, le diverse tecnologie additive, con una breve descrizione dei rispettivi processi e delle caratteristiche.

1.2.1 Processo di Fotopolimerizzazione

Un fotopolimero è un particolare polimero che, a seguito di una reazione chimica innescata da una certa tipologia di radiazione, passa da uno stato liquido ad uno solido, indurendosi. La Stereolitografia (SL) sfrutta tale processo chimico per produrre, facendo indurire uno strato sopra l'altro, prodotti finiti tridimensionali [Hul90]. A fianco del tradizionale processo SL, che prevede l'impiego di una sola sorgente di radiazione (Vector scan SL), si trovano due altre varianti: "Mask Projection SL" (MPSL), che permette l'irraggiamento simultaneo di un intero layer [Pan12], e il "Two-photon SL" che, così come il "Vector scan", tratta un punto alla volta, impiegando però due sorgenti di radiazioni [Gib10]. La figura 1.1 mostra lo schema di funzionamento per un processo "Vector scan LS".

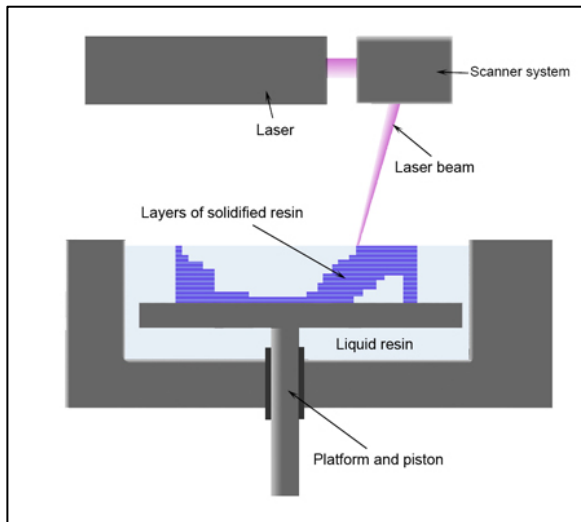


Fig 1.1: esempio di processo SL. Ad ogni layer trattato, la piattaforma viene abbassata di una quota pari allo spessore di un singolo layer e prosegue il processo di fotopolimerizzazione (da <http://es.wikipedia.org/wiki/Estereolitograf%C3%Ada>)

1.2.2 Extrusion based systems

Un materiale semi-solido, contenuto all'interno di un serbatoio, viene sottoposto ad una pressione costante, che gli permette di fuoriuscire da un ugello ad una velocità e con un diametro costanti. Il materiale così estruso si lega al substrato, termine con il quale si indica generalmente la piattaforma alla quale si lega il primo layer, o al layer precedentemente trattato, solidificandosi senza perdere la forma datagli dall'ugello. Per mantenere stabile la struttura durante la sua produzione e per permettere la costruzione di componenti auto-portanti, ossia strutture "a ponte" sotto le quali non è presente altro materiale, viene utilizzato un materiale di supporto, che sia facilmente rimovibile al termine del processo, sfruttando generalmente la sua minore temperatura di fusione rispetto al materiale primario [Gib10]. L'impiego di tale supporto rende quindi necessaria una fase di trattamento di post-produzione, proprio allo scopo di portare a fusione le strutture di supporto, in modo tale da poterle facilmente rimuovere.

L'applicazione di tale principio in ambito Additive, prende il nome di Fused Deposition Modelling, tecnologia brevettata dalla statunitense Stratasys, che si distingue per il vasto insieme di materiali lavorabili, il loro ridotto costo, l'affidabilità e sicurezza del processo produttivo [Mas04] e per la notevole durezza dei prodotti finiti [Mon01]. La figura 1.2 riporta un esempio di macchina FDM.

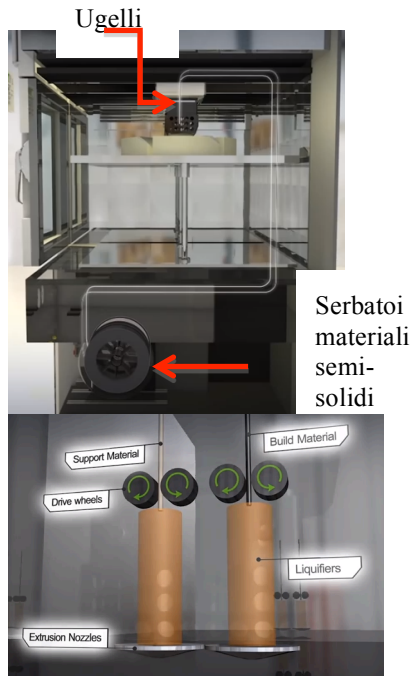


Fig 1.2: in alto schema di funzionamento FDM. Sotto dettaglio ugelli (fotogrammi tratti da video dedicato al processo FDM)

Gli aspetti negativi della FDM sono legati alla ridotta velocità del processo, alla bassa accuratezza e densità del prodotto finito e ad una natura intrinsecamente anisotropa del processo produttivo [Mon01]. I problemi di accuratezza sono dovuti in modo particolare all'eccessivo spessore del layer, che può portare a difetti nel prodotto finito, soprattutto in presenza di curve e pendenze. In altre parole, la risoluzione ottenibile, ossia l'accuratezza dei dettagli, è molto ridotta a causa dello spessore medio di un layer, ragione per cui pendenze e curve possono risultare poco lisce se non a gradoni anche ad occhio nudo. Per ovviare a tale problema, il Professor B. Khoshnevis dell'University of South California, ha progettato una macchina che permette di levigare i bordi del prodotto finito mediante uno strumento di taglio, intervenendo sul layer appena steso e raccordandolo al layer precedente [Kho04]. E' chiaro ovviamente che anche questo accorgimento, pur migliorando la qualità del prodotto finito, non può che portare ad un aumento dei tempi di produzione.

1.2.3 Three-Dimensional Printing

Il processo di 3D-printing (3DP) fu sviluppato e brevettato dal MIT nei primi anni '90. Il processo prevede che uno strato di polveri, dello spessore desiderato per il singolo layer di prodotto, venga disteso all'interno di una vasca; successivamente, sopra tale layer, viene stampato un materiale legante (definito

binding material). Il legame che si viene a formare tra tale materiale e le polveri precedentemente stese, crea il layer del prodotto finito. In questo processo, quindi, solo una piccola parte del prodotto finito sarà depositata dalla testina di stampa, dal momento che il materiale principale del pezzo sarà già presente all'interno del letto, sotto forma di polveri. Terminata la lavorazione di uno strato, il letto viene abbassato, ed un nuovo layer di polveri viene steso su quello appena concluso, reiterando così il processo [Sac92].

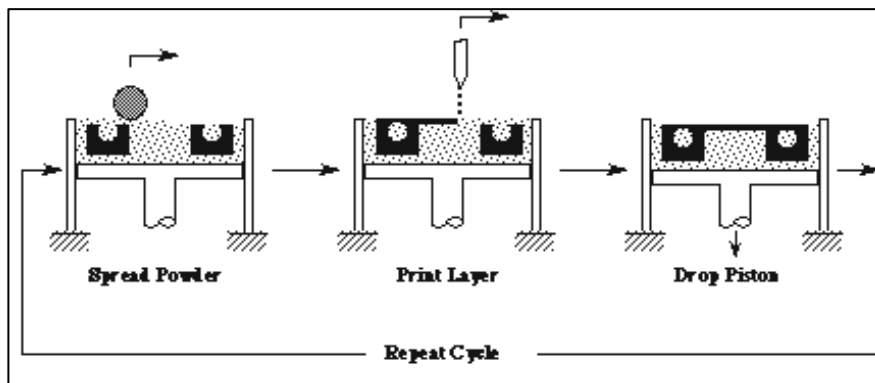


Fig 1.3 schema di funzionamento di un processo 3DP (da <http://www.mit.edu/~tdp/whatis3dp.html>)

La possibilità di usare un numero elevato di testine di stampa ed il fatto che solo una piccola parte del prodotto finito debba essere depositata dalla stampante, riduce notevolmente i tempi di lavorazione [Sac92]. A ciò si aggiunge la possibilità di combinare diverse tipologie di polveri e additivi nei materiali leganti, permettendo così la creazione di prodotti compositi, difficilmente ottenibili con altre metodologie Additive. Tuttavia, similmente a quanto visto nel paragrafo precedente per i processi FDM, il processo presenta una ridotta accuratezza del prodotto finito ed una bassa qualità superficiale, da intendersi come elevata presenza di porosità [Gib10]. Per tale motivo possono rendersi necessari più processi d'infiltrazione, consistenti del riempimento dei pori del prodotto finito mediante un materiale fuso, al fine di aumentare la densità del pezzo, migliorandone così le proprietà meccaniche.

1.2.4 Processi di Sheet Lamination

Il prodotto finito è ottenuto mediante la sovrapposizione di layer di materiale laminato (solitamente un foglio di carta) che, dopo aver aderito allo strato precedente, viene tagliato lungo il suo bordo, lasciando inalterata la parte centrale del foglio [Yi04]. Come vedremo nel paragrafo successivo, l'ordine sopra indicato può essere alternato, permettendo di tagliare la lamina prima di incollarla sul layer precedente. Esistono tre diversi processi che permettono di

legare lo strato in lavorazione con quello precedentemente terminato e sono qui di seguito riportati nelle loro caratteristiche fondamentali.

1.2.4.1 Processo di Gluing

La maggior parte dei processi Laminated Object Manufacturing, applicazione pratica del processo a Sheet Lamination, utilizza fogli di carta che sono coperti, sulla facciata che dovrà aderire allo strato precedente, da del materiale plastico. Si sfrutta in questo caso un processo di “Gluing”, con il quale un rullo riscaldato passa sopra il layer appena steso, causando la fusione del lato plastico che aderisce allo strato sottostante. Successivamente, un laser taglia il bordo della lamina e il materiale inutilizzato, ossia esterno ai bordi tagliati mediante il laser, non viene rimosso, ma ritagliato in quadratini e utilizzato quale materiale di supporto per i layer successivi. Al termine della lavorazione, il materiale di scarto, precedentemente suddiviso in cubetti, può essere facilmente rimosso manualmente [Gib10]. Il processo appena descritto viene definito “Bond then form”, dal momento che la fase di taglio segue quella dell’adesione. Mediante processo di “Gluing”, è tuttavia possibile procedere in modo inverso, mediante cioè un processo di “Form then bond”, nel quale l’unione fra due layer successivi avviene dopo il taglio della lamina mediante laser.

Il metodo “Bond then form”, utilizzabile anche per materiali quali lamine metalliche e ceramiche, permette una rapida lavorazione di pezzi di grandi dimensioni, garantendo stress residui e fenomeno di contrazione (shrinkage) ridotti. Bisogna tuttavia ricordare che tale processo di lavorazione presenta delle deformazioni, lungo l’asse Z, difficilmente controllabili; inoltre, a causa della presenza della colla su una facciata di ogni singolo layer, le proprietà meccaniche e termiche possono presentarsi fortemente anisotrope, ossia soggette a forti variazioni all’interno del prodotto finito. Infine, la rimozione manuale del materiale in eccesso, rende sconsigliato se non impossibile l’uso di questa tecnologia per prodotti caratterizzati da numerosi dettagli; la rimozione manuale, infatti, può impedire il trattamento di prodotti finiti con componenti ad alta risoluzione.

Il metodo “Form then bond” viene utilizzato per pezzi che presentano canali e componenti interne, difficili da ottenere con il metodo sopra indicato dal momento che tali componenti interne, se non tagliate subito, dovrebbero essere estratte a pezzo completato, richiedendo così l’apertura del prodotto finito. Inoltre questa metodologia riduce il rischio di tagliare, mediante laser, il layer precedente a quello in lavorazione.

1.2.4.2 Thermal bonding

Per prodotti ottenuti mediante tecnologia LOM a lamine metalliche, è possibile

ricorrere ad un processo termico di bonding fra due layer successivi. Nonostante le caratteristiche e problematiche delle lavorazioni metalliche mediante “Thermal bonding” siano state ampiamente studiate, sono pochi i casi di impiego di tecnologia LOM per la lavorazione di prodotti metallici [Yi04][Him04]. Questa ridotta diffusione è probabilmente dovuta al fatto che un approccio Bond-then-form richiederebbe un notevole lavoro di post-processing per rimuovere le lamine metalliche non lavorate, mentre l’approccio form-then-bond è difficile da automatizzare per forme complesse e dettagliate, quali sono generalmente i prodotti finiti metallici.

1.2.4.3 Clamping

Per superfici semplici, ossia che presentano pochi dettagli e a bassa risoluzione, è possibile evitare i due processi sopra indicati e ricorrere ad un semplice meccanismo di “clamping” ossia di “pinzatura” dei layer che costituiscono il prodotto finito. Il metodo è molto semplice e permette inoltre di modificare la superficie del pezzo ottenuto anche dopo la conclusione del processo produttivo o, in alternativa, di riciclare facilmente il materiale utilizzato. L’unico aspetto negativo è che le forze di pinzatura risultano spesso perpendicolari alla superficie del prodotto e, per questo motivo, si possono verificare separazioni fra i diversi layer.

1.2.4.4 Consolidazione ultrasonica

In questo processo, ciascun layer è costituito da un elevato numero di lamine affiancate. Ciascuna di esse viene adagiata a fianco all’ultima lamina disposta, sul layer precedente e ad esso legata mediante l’applicazione di una forza normale alla superficie di lavorazione mediante un senotrode. Quest’ultimo è uno strumento che genera vibrazioni ultrasoniche oscillando, ad una data frequenza, trasversalmente alla sua direzione di rotazione sulla lamina. In questo modo si ottiene l’adesione di ciascuna lamina allo strato precedente [Gib10]. Le lamine così disposte vengono tagliate una per una per una oppure insieme al termine della deposizione di un intero layer. In questo caso, alla tecnologia additive viene affiancata anche una lavorazione “subtractive”, che prevede un processo di fresatura per aumentare la capacità del processo di creare prodotti dettagliati e dalle forme complesse. Siamo quindi in presenza di un processo ibrido. Il principale aspetto negativo della tecnologia è quello di non avere una metodologia automatizzata per l’applicazione di materiale di supporto; per questo motivo è impossibile creare struttura autoportanti mediante consolidazione ultrasonica.

1.2.5 Processi di “Beam deposition”

Utilizzato generalmente per la lavorazione di parti metalliche o ceramiche, questo processo prevede il riscaldamento, da parte di una generica fonte di

energia, di una polvere metallica nel momento stesso in cui viene depositata [Gib10]. Si distingue quindi dai metodi “powder bed fusion”, che verranno più avanti analizzati, perché il materiale trattato non viene precedentemente disposto nella camera di lavorazione, ma depositato solo nel momento in cui può essere lavorato dalla fonte di energia. Il trasporto del materiale da lavorare può avvenire secondo due diverse tecniche.

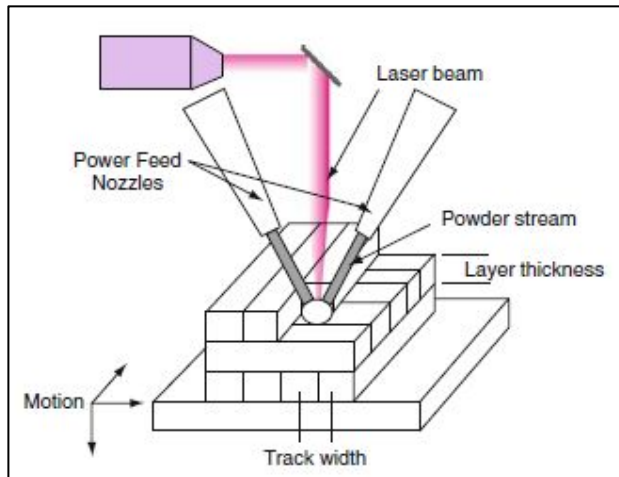


Fig 1.4: esempio di funzionamento di un processo Beam Deposition (Da Gib10)

La prima, che prevede l'utilizzo di polveri metalliche, è caratterizzata da un eccesso di materiale che, se da un lato genera problemi legati al riciclo, dall'altro consente una maggior qualità del prodotto finito, dal momento che rende l'area di fusione dinamica e in grado di adattarsi alle imperfezioni generate nei layer precedenti. Infatti, qualora si siano verificati errori nel processo produttivo o riduzioni nella qualità del prodotto, come ad esempio dossi e conche nel layer che precede quello in lavorazione, l'eccesso di polveri permette di compensare tali errori, consentendo così di migliorare la qualità del prodotto finito. La seconda tecnica di trasporto del materiale da lavorare, detta di “wire feeding”, non prevede invece materiale in eccesso, presentando così una efficienza maggiore ed evitando le problematiche legate al riciclo. Tuttavia un tale sistema non è adatto a prodotti dalla forma geometrica complessa che richiedono una ridotta porosità; è necessario quindi analizzare in anticipo la tipologia di prodotto desiderato e le caratteristiche della sua superficie, per decidere la tecnica più adatta.

E' infine importante notare che la corretta identificazione della sorgente di calore, solitamente un laser, e la definizione dei suoi parametri ottimali, sono di fondamentale importanza per la buona riuscita del processo, dal momento che

L'utilizzo di parametri non ottimali può comportare una costante riduzione dello spessore dei layer di lavorazione, con conseguente compromissione della qualità del prodotto finito. L'identificazione dei parametri ottimali di processo giocherà un ruolo fondamentale anche nei processi PBF più avanti illustrati.

1.2.6 Processi di “Direct Writing”

Secondo l'accezione più generale possibile, il termine “Direct Writing” (DW) dovrebbe riferirsi a tutte quelle tecnologie in grado di produrre strutture tridimensionali direttamente su una piattaforma, senza bisogno di strumenti aggiuntivi o maschere (come avviene, ad esempio, nel processo MPLS) [Mor09]. In quest'ottica, quindi, molte delle tecnologie sopra descritte dovrebbero rientrare in questa categoria produttiva. Risulta però più comodo definire tecnologie di DW tutti quei processi produttivi che permettono di progettare strutture di dimensioni minori di 5 mm con una risoluzione delle componenti inferiori ai 50 μm [Gib10]. Secondo questa classificazione, i processi di DW possono essere suddivisi in cinque famiglie:

- 1) Ink-based, è la tecnica più semplice ed economica, grazie alla quale degli inchiostri liquidi vengono depositati e, successivamente, solidificano. La deposizione dell'inchiostro può avvenire per estrusione secondo due logiche diverse; la prima prevede la creazione di filamenti continui di inchiostro, la seconda la deposizione del materiale sotto forma di gocce depositate a distanze ridotte.
- 2) Laser transfer: mediante l'impiego di un raggio laser, un materiale può essere riscaldato, fuso o ablato. Particolarmente interessante è il processo di ablazione, che consiste nella rimozione e deposizione di un materiale da una superficie ad un'altra, in questo caso il substrato o il layer precedentemente lavorato. Il processo di ablazione può essere utilizzato per ottenere depositi molto precisi e ripetibili di materiali di diversa natura, quali metalli, polimeri, ceramiche e tessuto vivo. Il principale difetto della tecnologia di ablazione è quello di richiedere un nastro appositamente trattato che, in buona parte, dovrà essere buttato a fine lavorazione.
- 3) Thermal spray: il materiale, sotto forma di polvere, è portato ad alte velocità e depositato sul substrato. E' un processo molto veloce e flessibile, che permette la lavorazione di diverse tipologie di materiali.
- 4) Beam deposition, tra i quali merita particolare attenzione il processo di “Laser Chemical Vapor Deposition”, che sfrutta il calore proveniente da un laser per trasformare un reagente gassoso in una deposizione di materiale solido. In alcuni casi, possono essere presenti reagenti gassosi di diversa natura che, trattati in istanti temporali diversi, permettono di ottenere prodotti finiti composti da più materiali. La tecnologia LCVD è

particolarmente promettente, dal momento che permette di lavorare numerosi materiali, ottenendo geometrie molto precise che non richiedono trattamenti post-processo.

1.3 Il processo produttivo Powder Bed Fusion (PBF)

Come già accennato, viene posta particolare attenzione alle caratteristiche dei processi PBF, dei quali fa parte la tecnica Selective laser Melting. In questo processo produttivo il file CAD, punto di partenza di ogni processo produttivo additive, viene inviato alla macchina, costituita principalmente da una camera di lavorazione, all'interno della quale le polveri vengono distese e lavorate. Per essere efficienti e affidabili, i processi produttivi PBF devono essere volti in un ambiente fortemente controllato e, per questo motivo, la camera di lavorazione è solitamente ad atmosfera controllata, spesso costituita da azoto per evitare l'ossidazione delle polveri [Gib10]. L'ambiente di lavorazione è generalmente portato ad una temperatura prossima a quella di fusione delle polveri, in modo da minimizzare la potenza richiesta alla sorgente di calore per lavorare il letto di polveri. La sorgente di calore, dopo una adeguata stesura di un mantello di polveri sul piano di lavorazione, inizia a scansionare il letto di polveri portando a fusione le zone desiderate e creando così un layer di materiale solidificato. Le polveri non interessate dal processo di fusione non sono rimosse, ma utilizzate quale materiale di supporto per i layer successivi. L'impiego di queste polveri, definite "loose powder", quali materiale di supporto, permette alla maggior parte dei processi PBF di non dover impiegare strutture di supporto appositamente progettate, come avviene invece in numerose altre lavorazioni precedentemente illustrate. E' questo uno dei primi aspetti positivi dei sistemi produttivi a letto di polveri. Terminata la lavorazione di un layer, la piattaforma di lavorazione viene abbassata di una quota pari allo spessore del layer (layer thickness), il pistone di rifornimento delle polveri viene alzato ed un nuovo strato di polveri viene disteso sopra a quello appena lavorato. Il processo si ripete fino alla conclusione del processo produttivo.

La figura 1.5 mostra uno schema di funzionamento di una macchina PBF; si può da subito notare la sensibilità del sistema di distribuzione delle polveri, costituito da un rullo (coat blade) che distribuisce le polveri sul letto di lavorazione, spostandole dalle zone di rifornimento a quella di lavorazione. Una corretta distribuzione delle polveri è di fondamentale importanza per la buona riuscita del processo produttivo e per questo motivo è necessario un costante controllo dello stato di usura del coat blade e del livello di disponibilità delle polveri nei pistoni di rifornimento.

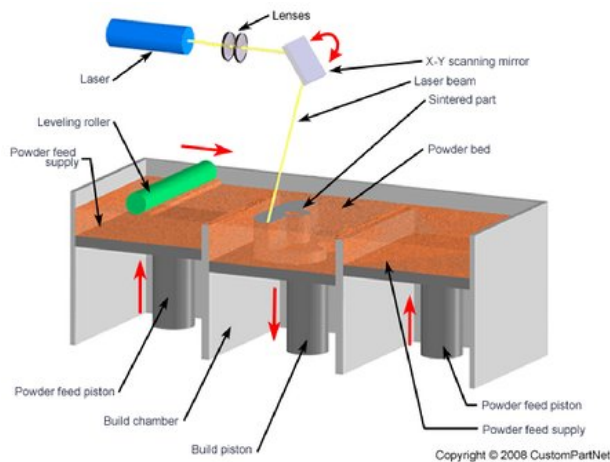


Fig 1.5 esempio di processo Powder Bed Fusion. Ai due lati si vedono le camere di rifornimento delle polveri, i cui pistoni si alzano ad ogni nuovo layer. In centro la camera di lavorazione con il rispettivo pistoni che, ad ogni strato, si abbassa di un layer. (da <http://www.trimaker.com/tecnologia-sls-sinterizado-selectivo-con-laser/#.VSTxzVstuJY>)

Al termine del processo, per rendere il pezzo maneggiabile, evitandone degradazioni a causa dell'ossigeno e deformazioni conseguenti ad un eccessivo gradiente termico, il prodotto finito viene solitamente lasciato raffreddare all'interno della camera di lavorazione prima di esporlo all'ambiente esterno. Le polveri non lavorate sono solitamente riutilizzate in un secondo processo, anche se il riciclaggio delle loose powder può risultare piuttosto complesso. La loro esposizione ad elevate temperature può, infatti, alterarne le proprietà meccaniche, rendendole così sconsigliabili per un nuovo ciclo produttivo.

1.3.1 I fenomeni di fusione

Abbiamo visto, nella descrizione di un generico processo PBF sopra fornita, che i sistemi produttivi a letto di polveri generano il prodotto finito mediante la fusione locale delle polveri distese all'interno della camera di lavorazione. E' però importante approfondire la questione di come sia possibile ottenere la fusione delle polveri. I diversi processi PBF, infatti, si distinguono principalmente in base al tipo di fenomeno fisico sfruttato per permettere la fusione delle polveri. I fenomeni sfruttabili e qui di seguito illustrati sono quelli di "Sintering", "Chemically-induced sintering", "Liquid phase sintering" e "Full melting". I seguenti paragrafi sono tratti dal lavoro presentato in [Kru05].

1.3.1.1 Sintering

La tecnologia "Selective Laser Sintering" (SLS), primo esempio di processo PBF sviluppato agli inizi degli anni Novanta, è così chiamata dal momento che sfrutta il fenomeno di solid-state sintering per lavorare le polveri. Tale fenomeno consente la creazione di legami fra le particelle delle polveri, senza

che venga raggiunta, tuttavia, la temperatura di fusione del materiale. Infatti, in un intervallo di temperatura che va dalla metà della temperatura di fusione alla temperatura di fusione stessa, le particelle di polveri tendono a ridurre l'energia libera associata alla propria superficie. Ciò significa che, partendo da particelle di polveri separate e caratterizzate ciascuna da una superficie S_A , si ottiene un agglomerato la cui superficie totale è minore della somma delle superfici di partenza, assistendo così ad una riduzione di energia libera. In questo modo, più particelle di polveri si uniscono in unico agglomerato senza che, tuttavia, sia necessario raggiungere la temperatura di fusione del materiale. Il processo di sintering, la cui velocità rallenta al ridursi della superficie totale del letto di fusione, è causa, nel prodotto finito, di porosità, che può essere ridotta unicamente con un processo prolungato, che tuttavia può rendere poco economica la tecnologia.

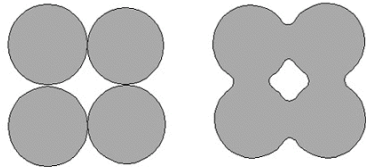


Fig 1.6 schema del processo di sintering: a sinistra si vedono quattro particelle di polveri separate, nel lato destro le particelle iniziano a legarsi fra loro causando una riduzione della superficie e mostrando anche la formazione di una porosità (da Kru05)

Come già accennato in precedenza, per i processi PBF può risultare difficile o sconveniente il riciclo di polveri non lavorate. Nel caso del fenomeno di sintering, le polveri riutilizzate dopo un processo di lavorazione possono presentarsi sotto forma di agglomerati di dimensioni maggiori rispetto alle polveri di partenza; tuttavia, tali polveri presentano un maggior carico di rottura e resistenza alla compressione, proprietà che permette di minimizzare i fenomeni di curling durante il processo. Per alcuni processi, quindi, può essere possibile, se non conveniente, il reimpiego di polveri sinterizzate. Bisogna ovviamente tener conto che la dimensione dell'agglomerato tenderà ad aumentare con il numero di ricicli e, per questo motivo, le polveri impiegate nei processi SLS hanno un ridotto numero di cicli di riutilizzo.

Un altro aspetto di cui si deve tener conto nell'utilizzare questa tecnologia, è quello del "part growth". Con questo termine ci si riferisce al fatto che, in prossimità della zona scansionata dal laser, le particelle di polveri potrebbero raggiungere una temperatura tale da consentire il fenomeno di sintering fra di esse e la zona lavorata; in questo modo, quindi, il prodotto tenderebbe ad assumere dimensioni maggiori rispetto a quelle previste, presentando un rivestimento di particelle parzialmente sinterizzate e caratterizzate da una più alta porosità rispetto alla restante parte del prodotto. Per ovviare a tale problema,

è possibile correggere il processo in partenza, modificando il file STL per tener conto di tale fenomeno, oppure agendo sui parametri del laser, facendo in modo che lavori una quantità minore di polveri in previsione dell'aumento delle dimensioni del pezzo. Un'altra possibilità è quella di ricorrere a metodologie post-processo per la rimozione della parte in eccesso. E' da notare che il corretto controllo del fenomeno di part growth, è di fondamentale importanza per garantire una buona ripetibilità del processo produttivo.

Un ultimo fenomeno da considerare nell'utilizzo della sinterizzazione quale fenomeno per la fusione delle polveri, deriva dal fatto che la percentuale di porosità di un pezzo lavorato mediante sintering si riduce all'aumentare del tempo di esposizione del pezzo alle alte temperature. Ciò implica che gli strati più bassi del prodotto finito, che permangono più a lungo nell'elevata temperatura della camera di lavorazione, presentano una porosità decisamente minore rispetto a quella degli ultimi strati, rendendo il prodotto finito fortemente anisotropo con conseguenti discrepanze delle proprietà meccaniche all'interno dello stesso prodotto.

1.3.1.2 Chemically-induced sintering

Sfruttando una reazione termicamente attivabile tra due diverse polveri o tra polvere e gas, è possibile ottenere un sub-prodotto che funzioni da legante fra le particelle di materiale da lavorare. In altre parole, il laser fornisce la quantità di calore necessaria per dare inizio ad una reazione, che può avvenire fra due polveri di natura diversa o fra la polvere e il gas contenuto nella camera di lavorazione. Tale reazione genera un sub-prodotto, ossia un elemento secondario della reazione, che consente di legare le particelle di polveri fra loro. La maggior parte dei prodotti ottenuti mediante tale processo risultano essere eccessivamente porosi per i loro utilizzi; per questo motivo è spesso necessario sottoporre il prodotto finito a lavorazioni di post-processo per aumentarne la densità, aumentandone così i tempi di lavorazione. I processi chemically-induced sono fra i meno diffusi all'interno della famiglia tecnologica PBF.

1.3.1.3 Liquid-phase sintering

Qualora si utilizzi una miscela di diverse polveri, è possibile portare a piena fusione una porzione di materiale per lavorare la restante parte senza che essa debba essere fusa. In questo modo, quindi, una polvere (definita "legante") viene fusa e utilizzata come legante per le particelle di una seconda polvere (definita "strutturale") che, avendo una temperatura di fusione superiore rispetto al materiale legante, permane nella sua fase solida. La polvere strutturale è quella che presenta le proprietà desiderate nel prodotto finito. Tale processo può essere ottenuto in modi diversi, a seconda di come è composta la miscela di polveri.

Una prima soluzione prevede l'impiego di polveri a particelle separate ed è il caso sopra illustrato: le polveri sono di due tipi diverse e le particelle sono tra loro distinte. Il prodotto finito ottenuto mediante questa tipologia di miscela presenta solitamente una certa porosità, che per essere ridotta richiede una lavorazione di post processo; i pezzi che richiedono lavorazioni di questo tipo vengono definiti "green part". Bisogna tuttavia notare che è possibile ridurre la porosità impiegando un materiale legante le cui particelle siano di dimensioni notevolmente ridotte rispetto alle particelle del materiale strutturale. In questo modo si può inoltre ottenere una riduzione del fenomeno di shrinkage (contrazione).

Un'altra soluzione è quella di utilizzare polveri a particelle composite, che presentano materiale legante e strutturale all'interno di una stessa particella e che consentono di ottenere prodotti con una minore porosità rispetto a quelli costruiti mediante polveri a particelle separate. Infine, è possibile utilizzare polveri a "coated particles", un caso particolare di polveri composite. In questa situazione, infatti, il legante ricopre la particella di materiale strutturale, diversamente dal caso precedente che vede i due materiali miscelati in modo casuale all'interno di una stessa particella. Le polveri di questo tipo presentano maggior capacità di assorbimento dell'energia laser e consentono legami migliori fra le particelle strutturali, consentendo così l'utilizzo di una minor percentuale di materiale legante rispetto alle lavorazioni precedentemente viste.

1.3.1.4 Full melting

Un ultimo metodo impiegabile per la lavorazione delle polveri metalliche è quello che prevede la piena fusione delle particelle. L'energia impiegata per portare il materiale al suo punto di fusione è sufficiente per fondere lo strato di polveri in lavorazione e una parte del layer precedente, assicurando così un ottimo legame fra layer consecutivi ed una elevata densità del prodotto finito. Il processo è quello più impiegato all'interno delle metodologie powder bed fusion e permette solitamente la lavorazione di leghe metalliche e polimeri cristallini. Come già accennato precedentemente, i processi PBF, oltre a distinguersi per il fenomeno di fusione sfruttato, si differenziano per il tipo di sorgente di calore impiegato nel processo produttivo. La tecnologia che sfrutta il full melting utilizzando una sorgente laser prende il nome di Selective Laser Melting, e sarà approfondita nel capitolo successivo.

1.3.2 Impiego delle tecnologie PBF

Come già detto, le tecnologie PBF sono particolarmente indicate per la lavorazione di polveri metalliche e plastiche, anche se, in alcuni casi, sono state impiegate con successo per lavorazioni di ceramiche e, in alcuni esperimenti, di

polveri di vetro [Fat14]. Tuttavia, sebbene le quattro metodologie di lavorazione consentano di trattare le stesse tipologie di polveri, è importante notare che ciascuna di esse fornisce un output con caratteristiche distinte, che può richiedere accorgimenti particolari. Full-melting e utilizzo di polveri composite o a particelle separate, ad esempio, permettono di ottenere pezzi metallici direttamente utilizzabili, senza bisogno di ulteriori trattamenti. Al contrario, in presenza di polveri “coated” che usano leganti polimerici per la cosiddetta “lavorazione indiretta”, la porosità del pezzo può risultare eccessivamente elevata e, per questo motivo, è solitamente necessario un trattamento post-produttivo che permetta di aumentare la densità del prodotto. Infine, un’ultima possibilità produttiva, è quella di utilizzare le tecnologie PBF per ottenere degli stampi dai quali, successivamente, verranno ricavati prodotti finiti. Questi stampi, contrariamente a quelli ottenuti mediante lavorazioni tradizionali, possono presentare maggior precisione e una miglior risoluzione di dettagli, oltre a poter essere costruiti con forme difficilmente ottenibili mediante lavorazioni classiche.

1.3.3 Varianti del processo PBF

Sono state sviluppate diverse soluzioni di tipo PBF, che si distinguono per i materiali lavorati, la fonte di calore impiegata e l’atmosfera utilizzata nella camera di lavorazione. Le metodologie possibili vengono qui di seguito brevemente illustrate, con particolare attenzione alla tecnologia Laser per lavorazione di metalli, impiegata per i processi Selective Laser Melting, di particolare interesse per questo lavoro di tesi.

1.3.3.1 Sistemi laser per processi a bassa temperatura

Sono utilizzati per lavorazioni dirette di polimeri o indirette di metalli; come sopra indicato, le lavorazioni indirette dei metalli presuppongono la fusione di polimeri leganti e la loro successiva vaporizzazione per rimuoverli dal prodotto finito e ridurre la porosità del pezzo. Le macchine che permettono questo tipo di processi vengono solitamente identificate con il termine generico di macchine per il Selective Laser Sintering, o semplicemente, macchine Laser Sintering. La DTM Corp, USA, prima azienda ad introdurre sul mercato una macchina SLS, è oggi giorno parte della 3DSystem, che commercializza sistemi SLS molto versatili nella lavorazione di polimeri e polveri di vario genere. Diverso è invece l’approccio della tedesca EOS GmbH, che produce una macchina SLS dedicata ad una sola tipologia di polveri.

1.3.3.2 Sistemi laser per metalli

Le prime ricerche svolte agli inizi degli anni Novanta risultarono particolarmente infruttuose nell’ambito della lavorazione di polveri metalliche, dal momento che l’elevata conducibilità termica, la propensione all’ossidazione

delle polveri e le elevate tensioni superficiali, rendevano le particelle metalliche di più difficile lavorazione rispetto ai polimeri impiegati nei processi SLS. Un contributo fondamentale alle lavorazioni di questo tipo fu dato dal Fraunhofer Institute for Laser Technology che, sostituendo i tradizionali laser CO_2 utilizzati nel SLS con Laser Nd-YAG, e introducendo una serie di innovazioni che verranno esposte più avanti, permise la costruzione delle prime macchine SLM.

La tecnologia, sviluppata dal citato Fraunhofer insieme alla tedesca F&S GmbH, è stata venduta alla britannica MTT Technologies, che vende oggi macchine SLM senza fornire tuttavia le polveri metalliche, dal momento che le loro macchine sono molto flessibili e lasciano ampie possibilità di sperimentazione ai clienti. Mediante un accordo commerciale con la 3DSystem, le stesse macchine sono vendute anche nel mercato statunitense. Tuttavia, il leader mondiale in ambito SLM rimane la tedesca EOS GmbH, che ha investito notevoli risorse nella ricerca dei parametri ottimali per le lavorazioni di diverse polveri metalliche che l'azienda vende ai propri clienti insieme alle macchine. Le polveri commercializzate dalla EOS GmbH sono leghe di acciaio, Ti – 64 (una lega del titanio) e CoCrMo (lega di cobalto); queste ultime due sono leghe di particolare importanza per le applicazioni mediche, come verrà illustrato più avanti parlando delle applicazioni dei processi SLM.

Altro importante produttore di macchine SLM a livello mondiale, è la società Concept-Laser GmbH che produce tre tipologie di macchine adatte in particolar modo alla creazione di stampi in leghe di acciaio e acciaio inossidabile. Infine, è degna di nota anche la tedesca 3D-micromac, che produce macchine SLM per la creazione di piccoli oggetti costituiti da particolari ad alta definizione.

1.3.3.3 Sistemi “Electron Beam”

Sviluppato presso la Chalmers University of Technology (Svezia), questa tecnologia prevede l'impiego di un fascio di elettroni come fonte di calore per portare a piena fusione le polveri metalliche [Cor04]. Tale tecnologia e quella laser, seppure molto simili dal punto di vista del processo, differiscono per un elevato numero di voci [Gib10]. Prima di tutto, un fascio di elettroni, che si muove ad una velocità prossima a quella della luce, viene deflesso dalla presenza del gas all'interno della camera di lavorazione; ciò non avviene, invece, per i laser, dal momento che i fotoni, muovendosi esattamente alla velocità della luce, non risentono della presenza del gas. Per questo motivo, il processo produttivo mediante electron beam, deve aver luogo in presenza del vuoto all'interno della camera di lavorazione. Un aspetto positivo della tecnologia a fascio di elettroni è invece la possibilità del fascio di elettroni di spostarsi da una parte all'altra della camera di lavorazione quasi istantaneamente, senza dover percorrere tutto lo spazio che separa i due punti.

Ciò non avviene, invece, per il laser, che deve percorrere l'intera distanza che separa le due zone di lavorazione. Una simile proprietà permette di ridurre notevolmente i tempi di lavorazione, evitando percorsi inutili al processo produttivo.

I due processi, inoltre, si distinguono per il fenomeno che è alla base del riscaldamento delle polveri. Nel caso di laser, infatti, le particelle si riscaldano assorbendo i fotoni emessi, mentre per il fascio di elettroni, il riscaldamento avviene a seguito del trasferimento di energia cinetica dall'elettrone alla particella di polvere, che assume una carica negativa nel momento in cui assorbe l'elettrone.

Questa differenza è causa, nella tecnologia Electron Beam, di due spiacevoli fenomeni, dei quali si deve tener conto in sede produttiva [Gib10]. Il primo si verifica qualora la forza repulsiva fra particelle adiacenti cariche negativamente superi la forza gravitazionale e di attrito, causando l'allontanamento delle stesse dal letto di fusione, generando così una nuvola di polveri nella zona di lavorazione. Il secondo fenomeno avviene quando una particella, al crescere della propria carica negativa, inizia a respingere gli elettroni in arrivo, causando un loro allontanamento e, conseguentemente, un allargamento del fascio di elettroni con conseguente ingrandimento della zona di fusione nel letto di polveri. Per questi motivi, è necessario che la conduttività del letto di polveri sia tale da impedire un accumulo eccessivo di cariche negative da parte delle particelle di polveri, caratteristica che limita i processi EB all'utilizzo delle sole polveri metalliche, escludendo i polimeri o ceramiche, lavorabili invece mediante processi laser.

Due aspetti positivi che distinguono la tecnologia electron beam da quella laser, sono la maggior efficienza energetica e la possibilità di ottenere prodotti finiti con una microstruttura più omogenea, nella quale le singole passate di lavorazione non sono visibili. Questo fenomeno è dovuto alla maggior temperatura a cui è mantenuto il letto di polveri durante l'impiego di fasci di elettroni. Un simile accorgimento è necessario per mantenere uno stato di lavorazione costante, dal momento che l'impiego di elettroni porta le "loose powder" ad una temperatura più elevata rispetto a quanto accadrebbe impiegando una sorgente di calore laser. Infatti, se la camera di lavorazione non fosse mantenuta ad una temperatura costante, che tenga conto della maggior temperatura raggiunta dalle loose powder, si avrebbero gradienti termici eccessivi, che potrebbero portare a riduzioni della qualità del prodotto finito.

L'aspetto che maggiormente distingue e caratterizza il processo EB da quello laser, resta la sua notevole rapidità di lavorazione, mentre la sua maggiore

efficienza energetica risulta ormai relativa, a seguito dell'introduzione di "fiber laser", più efficienti di quelli tradizionali e dotati di una maggior affidabilità e semplicità di progettazione. Un importante aspetto del quale si deve tener conto nella scelta fra processo laser e processo EB è la massima risoluzione ottenibile dalla tecnologia, che risulta notevolmente minore nel processo EBM. I dettagli e la superficie finita di prodotti ottenuti mediante EBM presenteranno quindi una risoluzione minore rispetto a quanto ottenibile mediante processo laser. Infine, bisogna ricordare che mediante EBM è possibile lavorare unicamente materiali che siano conduttori, mentre i processi laser possono lavorare anche ceramiche e materiali polimerici.

1.4 Ricerche e applicazioni in ambito Selective Laser Melting

Il processo SLM, particolarmente promettente per la produzione industriale, risulta essere notevolmente delicato, dal momento che deve essere progettato e monitorato sotto numerosi aspetti, partendo dal processo di deposizione delle polveri all'analisi dei numerosi fattori che entrano in gioco durante il processo [Yad11b]. Sono quindi numerosi i rami di indagine dedicati a tale tecnologia, svolti allo scopo di migliorarne le performance e svilupparne le potenzialità. Nei seguenti paragrafi vengono riprese le più interessanti ricerche svolte negli ultimi anni.

1.4.1. Aumento build rate e High power Selective Laser Melting

Le grandi potenzialità di questa tecnologia additive, consistenti principalmente, come già illustrato, nella possibilità di produrre parti metalliche ad elevata densità e con proprietà meccaniche pari, se non superiori, a quelle presenti nei pezzi prodotti con metodi tradizionali, sono, ancora ad oggi, controbilanciate dalla difficoltà di impiegare la tecnologia SLM in una produzione industriale costituita da lotti produttivi di entità elevata [Buc 11]. Questo notevole svantaggio, che impedisce una reale e profonda penetrazione della tecnologia in ambito industriale, è dovuto principalmente alla bassa produttività del processo di selective laser melting. Per questo motivo, diverse ricerche si sono focalizzate sullo studio del processo e sull'identificazione di metodologie in grado di aumentare il "build rate", ossia la produttività del processo, generalmente espressa in $\frac{mm^3}{s}$.

[Bre12], [Buc11], [Min14], hanno svolto ricerche in tale ambito, con lo scopo di identificare quali parametri possono influire maggiormente sulla produttività del processo. Ne vengono identificati tre particolarmente influenti nel processo produttivo e che vengono impiegati per definire il "build rate" del processo.

$$\dot{V} = D_s * \Delta y_s * v_{scan} \quad (1)$$

dove D_s è il layer thickness (spessore del layer), Δy_s è la ‘hatch distance’ ossia la distanza fra due passate successive di uno stesso layer e v_{scan} è la velocità di passata.

Agendo quindi su questi tre parametri, è possibile rendere più veloce la lavorazione. Le tre voci sono una funzione delle caratteristiche del laser impiegato, dal momento che lo spessore del layer e la velocità di passata dipendono dalla potenza del laser, mentre la hatch distance (ossia la distanza fra due layer consecutivi) è limitata dalla messa a fuoco del laser [Bre12]. Con l’obiettivo di aumentare la produttività della tecnologia, quindi, i ricercatori si sono concentrati sulle caratteristiche della sorgente laser di calore, arrivando a testare la bontà di laser ad alta potenza nel processo di fusione laser selettiva. Riprogettando appositamente una macchina SLM e dotandola di un laser ad alta potenza, l’effettiva utilità della tecnologia HP-SLM viene così valutata analizzando le caratteristiche dei prodotti finiti ottenuti.

AlSi ₁₀ Mg	Bre12/Buc11
Steel 1.2343	Bre12
Steel 1.2709	Bre12
Steel 1.4404	Bre12
1Cr18Ni9Ti SS	Min14

Fig 1.7: materiali impiegati per ricerche in ambito HP-SLM con il rimando bibliografico al lavoro che li impiega

Le diverse ricerche hanno verificato l’effettiva riduzione dei tempi di lavorazione mediante la modifica della macchina SLM, mantenendo costante la qualità del prodotto finito, misurata mediante l’analisi della densità del pezzo. Inoltre, ricerche in altri ambiti impieganti laser ad elevata potenza associati ad una altrettanto elevata velocità di passata, hanno riportato una riduzione del fenomeno di balling, che comporta la suddivisione del vettore lavorato in un insieme di gocce separate. Una simile riduzione è probabilmente dovuta ad una più rapida solidificazione della zona di fusione [Kru04]. Possibile impiego della tecnologia HP-SLM è quello della “skin-core strategy” [Bre12][Sch10], che consiste nel suddividere la superficie del prodotto in due zone diverse, quella “core” e quella “skin”, che vengono lavorate con parametri produttivi diversi, per aumentare la velocità di lavorazione mantenendo elevata la risoluzione della superficie esterna del prodotto.

Senza dover ricorrere necessariamente all’impiego di laser ad alta potenza, esistono una serie di strategie che permettono di aumentare la produttività del

processo in studi. E' possibile, ad esempio, aumentare lo spessore del layer, ottenendo così una riduzione del numero di layer da lavorare e riducendo, di conseguenza, il tempo impiegato nel processo; tuttavia, è possibile che tale riduzione porti ad un legame più debole fra due layer successivi. [Yad11]. In alternativa si può diminuire la distanza fra passate successive, riducendo così i tempi di lavorazione grazie ad un ridotto numero di passate necessarie per completare un layer.

A conclusione di questa parte dedicata alla descrizione delle diverse tecnologie additive impiegabile, è utile riprendere in modo schematico le peculiarità di ciascuna di esse. Nella tabella seguente sono riportati i pro e i contro delle diverse soluzioni in ambito additivo.

Tecnologia	Punti di forza	Punti di debolezza	Ambiti applicazione
Fotopolimerizzazione	Ottima accuratezza del prodotto finito, buona finitura superficiale e buone proprietà meccaniche	Richiede strutture di supporto e trattamenti post processo	Resine fotopolimeriche
Extrusion Based System	Disponibili soluzioni a basso costo. Buone proprietà del materiale impiegato.	Ridotta rapidità di produzione, accuratezza e densità del prodotto finito. Difficoltà nell'ottenere bordi appuntiti.	ABS materials
3DP	Macchine a basso consumo energetico che non impiegano sorgenti laser di calore né materiali tossici. Processo relativamente rapido che consente di ottenere output con vasto range di colori	Bassa risoluzione, ridotta qualità superficiale e fragilità del prodotto finito. Il processo richiede trattamenti di post-processo e i materiali disponibili sono ridotti.	Polveri ceramiche e in alcuni casi metalliche
Sheet Lamination	Ridotto fenomeno di shrinkage e stress interni al prodotto. Rapida produzione di pezzi di grandi dimensioni. Costi di produzione ridotti.	Proprietà meccaniche anisotrope. Difficile controllare l'accuratezza del pezzo e mantenere le caratteristiche di	Laminati, solitamente carta/polimeri ma, in rari casi, anche laminati metallici

		ridotta dimensione durante il processo di rimozione delle parti non lavorate.	
Beam Deposition	Elevata densità del prodotto finito, possibilità di variare il materiale impiegato durante il processo. Tecnologia impiegabile per riparare/aggiungere dettagli di prodotti già ultimati	Ridotta risoluzione del prodotto finito e bassa qualità superficiale. Ridotta velocità di produzione	Polveri plastiche, ceramiche, metalliche.
Direct Writing	Consente la produzione di pezzi di ridotte dimensioni, direttamente su substrati metallici, plastici o di vetro.	Complicata creazione di inchiostri. Necessità di garantire una superficie piatta.	Inchiostro appositamente progettati per il processo produttivo (colloid inks, nano-particles filled inks, fugitive organic inks, polyelectrolyte inks, sol-gel inks)
Processi PBF	Non necessita di strutture di supporto, prodotti ad elevata densità e ottime proprietà meccaniche per prodotti metallici. E' un processo rapido e ad elevata risoluzione.	Forte dipendenza delle caratteristiche del prodotto finito dal sistema di distribuzione polveri. Difficoltà nella gestione delle "Loose powder".	Principalmente polveri plastiche, metalliche e ceramiche. Alcune applicazioni anche a polveri di vetro.

Tabella1: pro e contro delle tecnologie Additive

1.4.2 Proprietà meccaniche, morfologia e parametri di processo

Uno degli aspetti di maggiore importanza per l'adozione della tecnologia Laser Melting in ambito industriale, è la certezza di poter produrre pezzi le cui caratteristiche e prestazioni siano pari, se non superiori, a quelle di prodotti ottenuti mediante lavorazioni tradizionali. Per questo motivo, numerose indagini si sono focalizzate sull'analisi delle caratteristiche morfologiche e meccaniche dei pezzi ottenuti mediante fusione selettiva, dedicando ampio spazio all'identificazione empirica di legami fra i parametri di processo e le proprietà del prodotto finito. Per una simile analisi, è quindi necessario identificare, per

prima cosa, i parametri di processo che entrano in gioco durante la lavorazione nel sistema “laser-letto di polveri-substrato”. Questi, stimati attorno ad una cinquantina di voci [Van07], possono essere raggruppati nelle due macrocategorie di “parametri di input”, modificabili dall’operatore, e “parametri al contorno”, determinati dalle condizioni esterne [Cra11]. Osservando l’elevato numero di parametri che influenzano il processo produttivo, sorge spontanea la domanda di quale approccio adottare per analizzare, nel loro insieme, le numerose interazioni tra queste voci e il risultato finale ottenuto dal processo. Fortunatamente, si è notato empiricamente che mediante l’analisi e il controllo di un ridotto numero di questi parametri, è possibile ottenere notevoli miglioramenti nel prodotto finito. I parametri maggiormente significativi, sono identificati nella potenza laser, nella velocità di passata, hatch distance e il layer thickness [Yad12].

Sono numerosi gli studi che analizzano caratteristiche del prodotto finito in funzione di tali parametri. Numerosi lavori si concentrano sull’analisi della densità ma, per comodità di trattazione, saranno ripresi nel capitolo 3 dedicato alla porosità nei processi additive. L’omogeneità della superficie, intesa come assenza di rugosità, viene indagata in [Yad13] che, insieme ai già citati [Kru09] e [Yas11], analizzano il legame fra hatch distance e rugosità, giungendo alla conclusione che una ridotta distanza fra layer associata ad una media velocità di passata e media potenza laser, consente di ottenere i migliori prodotti dal punto di vista della rugosità. Viene tuttavia sottolineato che, qualora la “hatch distance” risultasse minore dell’ampiezza della zona di consolidamento, si otterrebbe un risultato opposto, con un aumento della rugosità della superficie del pezzo. Infine, esistono numerosi lavori sulle proprietà meccaniche dei prodotti ottenuti mediante SLM. Materiali analizzati nelle diverse ricerche sono, ad esempio, SS316[Tol10][Kru09], AlSi10Mg[Kem12], SS304[Kah01][Abd12], polvere di titanio[San04], Ti6Al4V, Maraging steel 300 [Kru09]. Quest’ultimo lavoro è forse quello più esemplificativo della metodologia impiegata per le analisi delle proprietà meccaniche e verifica la sostanziale omogeneità della tenacità al variare dell’asse di produzione del pezzo, a patto che sia presente una ridotta porosità nel pezzo.

Un risultato analogo viene riportato in [San04], che identifica inoltre un ulteriore legame fra strategia di passata e porosità, proponendo una particolare strategia di lavorazione che prevede l’alternanza di layer lavorati unicamente sul

bordo e strati lavorati anche all'interno, con direzioni di passata perpendicolari fra un layer e quello successivo. Inoltre, nello stesso lavoro, viene analizzato il legame fra durezza del prodotto finito e i due parametri di "hatch distance" e "potenza laser". La proprietà meccanica in studio si mostra qui inversamente proporzionale alla distanza fra passate successive, mentre non sembra risentire della potenza laser impiegata, almeno nel range di potenze utilizzate nella ricerca (da 0.25 a 1 KW). Infine, degno di nota è anche il lavoro di [Buc11] che presenta una breve analisi sulle proprietà meccaniche di pezzi ottenuti mediante HP-SLM, analizzando in particolar modo il legame fra durezza e i due parametri di velocità di passata e "hatch distance". Similmente ai risultati ottenuti nel lavoro precedentemente citato, anche qui la durezza non risente né della potenza laser impiegata né della velocità di passata. Tuttavia, paragonando tali risultati con altri precedentemente ottenuti, gli autori concludono che il massimo della durezza per un pezzo prodotto ad elevata potenza laser, viene raggiunto ad una velocità intorno ai 500mm/s, motivo per cui, nell'analisi qui riportata, non si sono viste variazioni di durezza.

1.5 Applicazioni Selective Laser Melting

La tecnologia SLM ha mostrato le sue potenzialità in numerosi ambiti, quali l'automotive, aereo-spaziale, il mercato del lusso, dentale e medico. Tuttavia, le maggiori ricerche a livello accademico si sono concentrate in quest'ultimo ambito. In particolar modo, il processo produttivo di Selective Laser Melting si è dimostrato particolarmente utile ai processi medici di rigenerazione di tessuti ossei. Lo studio dei tessuti artificiali, generalmente indicato con il termine "tissue engineering", ha infatti verificato come la tecnologia si presti alla produzione di pezzi in titanio sufficientemente porosi da poter garantire la riproduzione di cellule adatte a ricreare il tessuto spugnoso tipico delle ossa.

Come riportato in [Pat11], i pori ottenibili mediante tale tecnologia si sono rivelati più affidabili di quelli precedentemente ottenuti impiegando un processo di Selective Laser Sintering. La possibilità di ottenere "celle" di una forma e dimensione particolare, di qualità superiore a quelle create con la tecnologia SLS, consente infatti, di ricreare un ambiente più adatto alla riproduzione di questo tessuto. La definizione di una dimensione ottimale per la porosità del prodotto può essere ricondotta ad un problema di ottimizzazione. Infatti, le due caratteristiche di durezza e porosità richieste ad una buona protesi, sono in contrasto fra di loro. E' quindi necessario identificare una procedura di ottimizzazione per giungere alla produzione di un pezzo con caratteristiche ottimali. [Xia12] propone una metodologia di ottimizzazione topologica per

risolvere tale problema, ottenendo notevoli risultati nella produzione di una struttura porosa in titanio.

Sperimentazioni in vitro e in vivo (su conigli), presentate in [Pat11], hanno verificato la bontà del processo SLM, osservando che, nei soggetti studiati, nuove cellule ossee iniziano a riprodursi, dopo poche settimane, sulla protesi in titanio impiantata nel femore. I benefici di una simile applicazione sono due: la protesi può essere progettata su misura del paziente, eliminando numerose problematiche di incompatibilità presenti, invece, per protesi standardizzate; inoltre, la creazione di un nuovo tessuto osseo che congiunga la protesi con l'osso reale, rende la protesi maggiormente resistente alle tensioni dovute ai movimenti del paziente, diventando così meno soggetta a rotture.

Un'ulteriore applicazione di tale tecnologia in ambito medico viene mostrata in [Yar14]. Il paziente, a seguito di un incidente in bicicletta, è stato sottoposto ad una craniotomia decompressiva³, che ha portato all'asportazione di una superficie cranica di $12,5 \times 8,4 \text{ cm}^2$ (Fig 1.8). Utilizzando tecniche di "computer tomography", è possibile ottenere un'immagine tridimensionale della parte di cranio mancante (Fig 1.9a). Da questa, è poi possibile estrapolare, mediante appositi software, un modello 3D del cranio in analisi (Fig 1.9b).



Fig 1.8: conseguenza della craniotomia sul paziente (da Yar14)

³ Intervento chirurgico che prevede l'asportazione di parte del cranio per poter controllare la pressione intracranica.

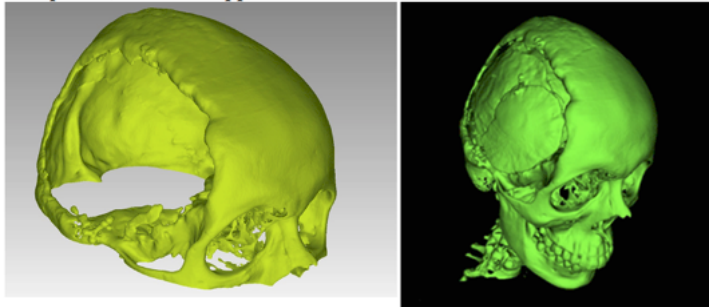


Fig 1.9: modello per la protesi (da Yar14)

Il buon esito dell'intervento, consistente nella fissazione della protesi al cranio mediante due viti, ha mostrato la grande potenzialità delle tecniche di modellazione 3D e dei processi produttivi Additive in ambito medico-chirurgico.

Come già accennato, il processo produttivo SLM ha trovato particolari applicazioni in ambito automotive. Un esempio viene riportato in [Vil08], dove le proprietà meccaniche di una lega di alluminio (AlSi10MG) sono indagate, al fine di valutarne l'impiego per la costruzione di una pompa ad acqua per un motore automobilistico. Una volta verificata la sostanziale equivalenza delle proprietà meccaniche ottenute mediante SLM con quelle di un tradizionale processo produttivo, gli autori si concentrano sull'analisi della pompa ad acqua. Lo scopo è quello di ottenere una rilevante riduzione dei tempi di produzione, mantenendo allo stesso tempo invariate le proprietà meccaniche e l'affidabilità del prodotto costituito mediante tecnologia Additive. Un simile risultato è stato pienamente raggiunto, rendendo possibile la costruzione di una pompa ad acqua in poche ore rispetto ai diversi giorni necessari per un processo tradizionale.

Le tecnologie Selective laser Melting ed Electron Beam Melting sono inoltre state impiegate con successo nella formazione di stampi con complicate strutture interne per applicazioni di Injection Moulding [San06] e Die casting, nonché per la produzione di prototipi funzionali [Mei02][Gib10]. Alcuni esempi dei risultati ottenuti in tali indagini sono qui riportati:

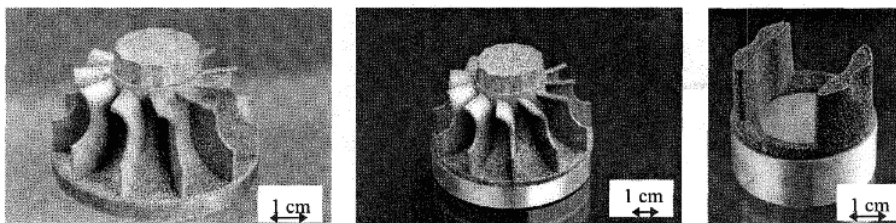


Fig 1.10: prototipi funzionali presentati in Mei02. (da Mei02)

Oltre il mondo della ricerca, diverse realtà impiegano tali tecnologie al fine di produrre prototipi metallici e stampi, generalmente su commessa. Ne sono un esempio le manifatture nostrane Ci-Esse e Texer Design, impegnate nella produzione di prototipi metallici ed inserti per stampi con raffreddamenti conformati. Esempi di prototipi ottenuti presso Texer design sono riportati nella figura 3.29.



Fig 1.11: prototipi metallici ottenuti da Texer Design (dal sito di Texer Design)

Oltre al già citato ambito automotive, altre notevoli applicazioni delle tecnologie a polveri metalliche sono state ottenute nel settore aerospaziale e della difesa. Come riportato in [Coy12], tale ambito ha da sempre avuto interesse nelle applicazioni Additive, che consentono di ottenere prodotti più leggeri con tempi e costi di produzioni ridotti, mediante una riprogettazione di componenti già impiegati, che permetta di sfruttare appieno le nuove frontiere aperte dalle tecnologie additive. Una buona tabella riassuntiva delle applicazioni additive nell'ambito aerospaziale è riproposto, dal lavoro appena citato, nella figura seguente.



	Current applications	Potential applications
Commercial aerospace and defense 	<ul style="list-style-type: none"> • Concept modeling and prototyping • Printing low-volume complex aerospace parts • Printing replacements parts 	<ul style="list-style-type: none"> • Embedding additively manufactured electronics directly on parts • Printing aircraft wings • Printing complex engine parts • Printing repair parts on the battlefield
Space 	<ul style="list-style-type: none"> • Printing specialized parts for space exploration • Printing structures using lightweight, high-strength materials • Printing parts with minimal waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Printing on-demand parts/spares in space • Printing large structures directly in space, thus circumventing launch vehicles' size limitations

Fig 1.12: applicazioni additive in ambito aerospaziale. (da Coy12)

Avio Aero, realtà italiana di General Electric, impiega tecnologie Selective Laser Melting ed Electron Beam Melting per produrre pale per turbine, ottenendo numerosi vantaggi quali, ad esempio, un minor peso dei

componenti, l'integrazione di più componenti in un'unica parte, la riduzione dei costi di lavorazione ed, infine, l'ottenimento di migliori proprietà meccaniche rispetto a quelle ottenibili mediante fusione. Anche Airbus Group, altra importante realtà dell'ambito aerospaziale, impiega con successo tecnologie additive per polveri metalliche per la produzione di prototipi, tool, parti per test di volo e per aerei commerciali come, ad esempio, prese d'aria. Le tecnologie additive sono inoltre utilizzate per sopperire ad eventuali mancanze di prodotti intermedi in fase di assemblaggio, evitando così di dover ricorrere alla fase produttiva a monte per ottenere le parti mancanti⁴. Un'altra interessante realtà presente anche in Italia, è quella di CRP Meccanica, che produce in partnership con altre aziende prodotti destinati ad applicazioni automotive e aerospaziali. Ne è un esempio la sua collaborazione con Kepler Motors, per la costruzione di portamozzi in titanio (Fig 1.13).



Fig 1.13: portamozzi di Kepler Motors sviluppato in partnership a CRP Meccanica (dal sito di CRP Meccanica)

Riassumendo quanto presentato in questo ultimo paragrafo, le tecnologie di stampa 3d e, in particolare, quelle a polveri metalliche, possono essere impiegate con successo in ambito medico, aerospaziale e per la produzione di componenti meccanici e stampi. Altre applicazioni qui non riportate sono

⁴ Ulteriori informazioni sono presenti alla pagina

<http://www.airbusgroup.com/int/en/story-overview/factory-of-the-future.html>

rintracciabili nell'ambito del mercato di lusso quale, ad esempio, quello della produzione di gioielli.

Capitolo 2

Il controllo qualità in ambito AM

In generale, il controllo della qualità per processi machining può essere ottenuto sfruttando le misurazioni provenienti da due diverse fonti di informazioni. La prima è il prodotto stesso, generato dal processo produttivo in studio. Altre informazioni possono essere ottenute acquisendo segnali dal processo stesso, durante la sua fase di attuazione. Le tecniche tradizionali di SPC si basano sull'analisi delle informazioni provenienti dalla prima fonte citata, ossia dalle misurazioni svolte sul prodotto, anche se l'introduzione di sensori sempre più sofisticati consente di sviluppare metodi di monitoraggio basati su segnali di processo.

Nei processi produttivi Additive, ancora immaturi e nella loro fase di sviluppo, le tematiche riguardanti il controllo della qualità e la scelta di procedure di controllo adeguate, risultano essere ancora un problema interessante per il mondo della ricerca. In particolare, in tale ambito, ci si trova a dover affrontare due particolari problematiche:

- 1) I pezzi ottenuti mediante processi additivi, come già illustrato in precedenza, presentano forme articolate, costituite da componenti e geometrie interne complesse, per le quali non esiste ancora una metodologia di misura consolidata e imposta quale standard.
- 2) L'ambito pionieristico all'interno del quale ci si trova a lavorare non presenta ancora una famiglia di sensori impiegabili per le misurazioni né, tanto meno, esiste una procedura che definisca quali grandezze monitorare nel sistema prodotto/processo.

Infine, un ultimo problema rilevante, è il legame fra parametri di processo, condizioni di lavoro e qualità del prodotto. In altre parole, non è ancora ben chiaro come i primi due fattori influiscano sulla qualità che si vuole monitorare né è stata definita una famiglia di grandezze standard il cui monitoraggio sia direttamente correlato al controllo della qualità del prodotto/processo.

Nella letteratura indagata e riportata, il controllo qualità per processi additivi può essere perseguito mediante tre diverse strategie [Hua14], al fine di ottenere un prodotto che rispetti i requisiti necessari al suo corretto impiego. La prima, consiste nel controllare una certa variabile di processo x , basandosi sugli scostamenti Δx della stessa; la seconda strategia, prevede invece il controllo della variabile x sulla base della distorsione Δy del prodotto. L'ultimo metodo è quello di variare l'input geometrico, ossia la forma dell'oggetto da lavorare, sulla base della distorsione Δy del pezzo. La prima e la terza strategia sono qui di seguito illustrate.

2.1 Compensazione delle distorsioni geometriche

Si consideri un semplice pezzo cilindrico, caratterizzato da una ridotta altezza e da un dato raggio nominale r_0 . A seguito del fenomeno di shrinkage, dovuto alla variazione volumetrica del prodotto insita nella natura del processo produttivo causata dal rapido passaggio di stato durante la fusione e, successivamente, durante il raffreddamento del layer, si assiste spesso ad una deformazione del prodotto finito, la cui forma si allontana quindi da quella progettata e presentata alla macchina mediante il file STL. Per ridurre tale fenomeno, garantendo così una buona accuratezza dimensionale, [Hua13][Hua14] identificano un modello di compensazione che sia in grado di modificare la forma del pezzo da produrre, prima che venga iniziata la costruzione, tenendo conto delle deformazioni a cui il prodotto andrà incontro durante il processo. L'approccio è quindi quello di deformare preventivamente il pezzo sapendo che, a seguito dello shrinkage, tale deformazione apportata verrà "compensata", arrivando così ad ottenere la forma nominale effettivamente desiderata dai progettisti.

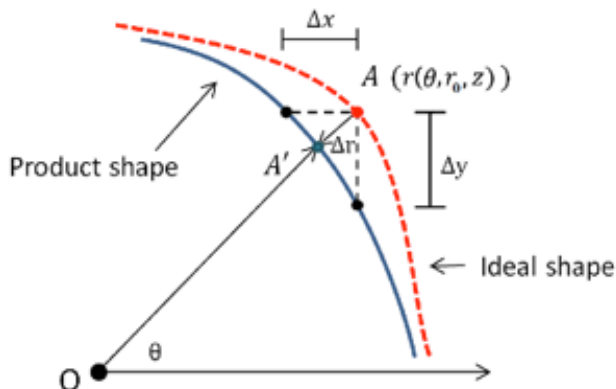


Fig 2.1: dettaglio di un cilindro, in blu la forma nominale in rosso quella reale (da Hua13)

Torniamo a considerare il pezzo cilindrico sopra descritto. Le due analisi sopra citate trascurano l'effetto di shrinkage lungo l'asse z e, per questo motivo, il cilindro considerato avrà un'altezza trascurabile; consideriamo invece ciò che avviene alla superficie superiore del pezzo. La figura 2.1, riporta in blu il raggio nominale del pezzo e, in rosso, quello che si ottiene effettivamente al termine della produzione a seguito dello shrinkage. Considerando un generico punto A, sul perimetro della superficie, è possibile esprimere lo shrinkage sia in coordinate cartesiane che polari. Per comodità di trattazione, gli autori adottano quest'ultimo sistema di riferimento, esprimendo il fenomeno come:

$$\Delta r(\theta, r_0(\theta)) = r(\theta, r_0(\theta)) - r_0 \quad (1)$$

e, quindi, come raggio reale a cui viene sottratto quello nominale. Nel proseguire della trattazione, il fenomeno verrà identificato come $f(\theta, r_0(\theta))$ e scomposto dagli autori in tre componenti:

$$f(\theta, r_0(\theta)) = f_1(\psi) + f_2(\theta, r_0(\theta)) + \varepsilon_\theta \quad (2)$$

La prima componente, identifica lo shrinkage medio, indipendente dalla posizione sulla superficie e legato alle variazioni di volume che avvengono durante il processo produttivo. Tale termine è costante per una data forma ψ . Il secondo termine è invece lo shrinkage in funzione della posizione sulla superficie, mentre l'ultimo termine raccoglie componenti che si aggiungono all'andamento dei due termini precedenti.

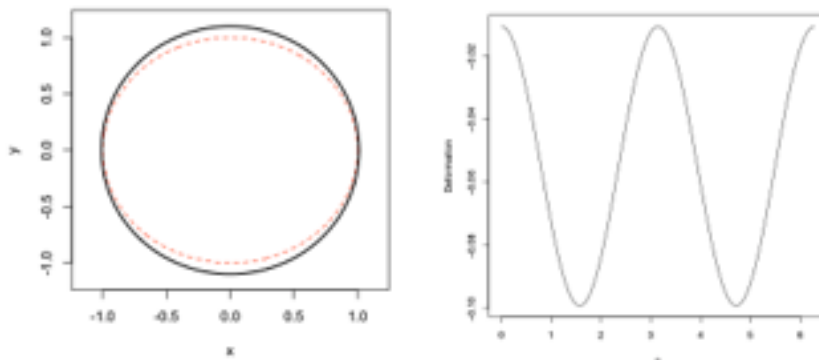


Fig 2.2: a sinistra sezione del cilindro nominale (in nero) e reale (rosso). A destra profilo di shrinkage per il cilindro (da Hua13)

Ma come si può identificare un'equazione che descriva tale termine? Se consideriamo il grafico a destra della figura 2.2, possiamo vedere il comportamento dello shrinkage per il cilindro presentato sul lato sinistro della stessa figura. L'andamento armonico mostrato dal grafico in questione, suggerisce di descrivere il fenomeno mediante il seguente sviluppo di Fourier:

$$f(\theta, r_0(\theta)) = c + \sum_k \{a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta)\} + \varepsilon \quad (3)$$

Dove i termini c , a_k e b_k sono una funzione del raggio nominale r_0 . A partire da una simile formulazione, gli autori arrivano a definire la forma della compensazione ottimale che, nota la geometria obiettivo che si vuole ottenere dal processo produttivo, fornisce come risultato la correzione che il software dovrà apportare alle dimensioni di progetto, prima di iniziare la produzione. La compensazione è così definita:

$$x^*(\theta) = -\frac{g(\theta, r_0(\theta))}{1+g'(\theta, r_0(\theta))} \quad (4)$$

Per rendere effettivamente applicabile la formulazione suesposta, gli autori procedono con la costruzione di quattro cilindri di diverso raggio e col plottaggio delle misure del loro shrinkage (fig 2.3). In questo modo, si può arrivare ad una definizione precisa del modello di shrinkage che meglio approssima i punti identificati dal grafico, ed espresso come

$$f(\theta, r_0(\theta)) = \alpha r_0^\alpha + \beta r_0^\beta * \cos(2\theta) + \varepsilon_0 \quad (5)$$

Assumendo $a \sim N(1, 2^2)$ e $b \sim N(1, 1^2)$ stimiamo i parametri α e β utili alla completa descrizione del fenomeno di shrinkage, mediante una simulazione Markov Chain Monte Carlo. Si applica il modello così ottenuto ai cinque corpi cilindrici, per verificarne la bontà. I risultati ottenuti sono riportati nella figura 2.3. Come si può notare, il modello permette di ottenere ottimi risultati per tutti i cilindri, ad esclusione di quello con raggio 0,5 cm.

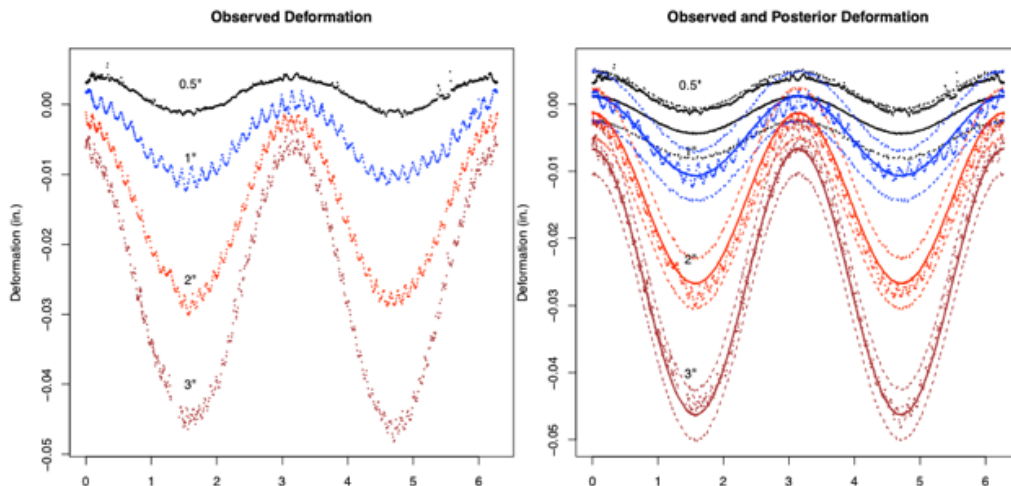


Fig 2.3: deformazione dovuta al fenomeno di shrinkage in funzione dell'angolo considerato. A sinistra i valori osservati, a destra quelli stimati e quelli reali (da Hua13)

Tale errore di previsione è riconducibile al fenomeno di “over exposure” che, sebbene presente in ogni prodotto ottenuto mediante lavorazione laser, ha un maggiore impatto nella produzione di piccoli pezzi. Infatti, il fenomeno consiste nella diffusione del fascio laser in prossimità del bordo del pezzo prodotto e conduce ad una naturale compensazione del pezzo al file CAD originale. Tale compensazione naturale, trascurabile per i pezzi di dimensioni normali ma rilevante per un pezzo di piccole dimensioni, impedisce la corretta applicazione del modello di shrinkage. Gli autori hanno così proposto un nuovo modello per lo shrinkage, che tenesse conto di questa compensazione naturale. Sono stati

ottenuti ottimi risultati previsionali e quindi il modello di compensazione ottimale proposto è:

$$x^*(\theta) = - \frac{x_0 + \hat{\alpha}(r_0 + x_0)^{\hat{\alpha}} + \hat{\beta}(r_0 + x_0)^{\hat{\beta}} * \cos(2\theta)}{1 + \hat{\alpha}\hat{\alpha}(r_0 + x_0)^{\hat{\alpha}-1} + \hat{\beta}\hat{\beta}(r_0 + x_0)^{\hat{\beta}-1} * \cos(2\theta)} \quad (6)$$

Nel secondo lavoro [Hua14], viene riproposto lo stesso risultato, arricchito da una analisi su prodotti a forma poliedrica. Lo scopo di questa indagine è duplice: da un lato, la possibilità di affiancare la compensazione ottimale per cilindri a quella per poligoni, permetterebbe di descrivere il fenomeno di shrinkage per qualsiasi geometria, ottenuta dalla combinazione dei due suddetti modelli. Dall'altro, generare un modello per figure poligonali, permette di verificare la bontà del modello per il cilindro; i risultati ottenuti da quest'ultimo modello, dovrebbero infatti essere uguali a quelli ottenibili mediante l'applicazione del modello poligonale ad una figura con un numero elevato di lati.

Il nuovo modello introdotto, che integri forme cilindriche e poligonali, è così proposto:

$$f(\theta, r_0(\theta)) = g_1(\theta, r_0(\theta)) + g_2(\theta, r_0(\theta)) + g_3(\theta, r_0(\theta)) + \varepsilon_0 \quad (7)$$

dove g_1 indica il modello per forme cilindriche, g_2 quello per geometrie poligonali e g_3 è un modello che raccoglie tutti gli aspetti non catturati dai due termini precedenti. Il modello per le forme poligonali viene stimato a partire da dati sperimentali ricavati da poligoni con un diverso numero di lati. Il modello sopra descritto si è rivelato utile per compensare le deformazioni dovute al fenomeno di shrinkage, permettendo di ridurre di circa il 75% l'entità di tali deformazioni.

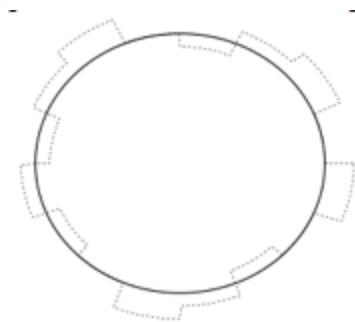


Fig 2.4: la linea tratteggiata mostra le diverse zone di compensazione. In nero è illustrato il profilo del cilindro nominale (da Hua14)

Un notevole arricchimento alla problematica in analisi viene introdotto da [Sab13]. Nei lavori precedenti, infatti, le compensazioni ai diversi angoli sono

apportate senza tener conto degli effetti che tali modifiche possono generare nelle zone adiacenti a quelle trattate. In altre parole, nell'apportare una compensazione ad un certo angolo θ , si deve tener conto delle conseguenze di tale modifica sui punti adiacenti della superficie. Per ovvi motivi pratici, le compensazioni vengono apportate in modo discreto e, per questo motivo, zone adiacenti possono presentare forti differenze di compensazione, come mostrato dal cilindro in figura 2.4. Risulta così che i punti adiacenti a tali zone di discontinuità, subiscono una compensazione che è funzione sia della compensazione applicata alla propria area sia a quella imposta all'area adiacente. Partendo dalla definizione di shrinkage fornita nei precedenti lavori, viene introdotta una definizione per il concetto suesposto di "interferenza". Il cilindro viene suddiviso in un numero N di angoli θ_i con $i=1\dots N$ e, in corrispondenza di ciascuno angolo i -esimo, viene apportata una compensazione x_i ; l'insieme delle compensazioni x_i è indicato dal vettore $x = (x_1, \dots, x_n)$. Si ha interferenza qualora, dati due diversi vettori di compensazione x, x' , si ha che, per un dato angolo θ_i :

$$\Delta r(\theta_i, r_o(\theta_i), x) \neq \Delta r(\theta_i, r_o(\theta_i), x') \quad (8)$$

con $x_i = x'_i$

In altre parole, ad un angolo θ_n , si ha interferenza se la sua deformazione (ossia lo shrinkage misurato) varia al variare del vettore x di compensazioni applicate al pezzo, mantenendo costante però la compensazione ad esso associata. La funzione impiegata nei lavori precedenti per descrivere il comportamento generale del fenomeno di shrinkage, viene quindi arricchita da un nuovo termine, che tenga conto delle interferenze. L'obiettivo dell'esperimento svolto, è quello di verificare la trascurabilità di tale fenomeno per punti lontano da zone di confine fra compensazioni diverse e, al contrario, il grande impatto dell'interferenza in tali aree.

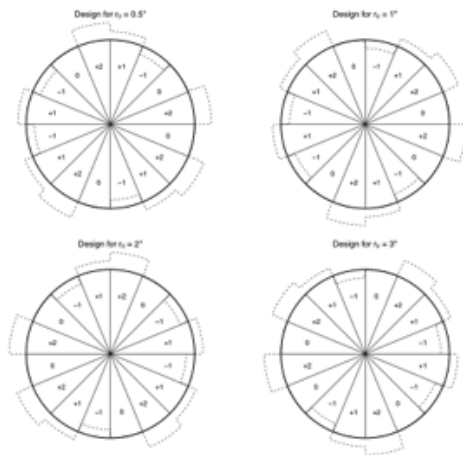


Fig 2.5: i quattro cilindri lavorati, con le rispettive compensazioni (da Sab13)

L'esperimento è svolto mediante l'impiego di quattro cilindri uguali a quelli impiegati in [Hua13], ai quali vengono applicate compensazioni a zone discrete come riportato in fig 2.5, ed è così riassumibile:

- 1) Sfruttando il modello di shrinkage in assenza di compensazioni, proposto da [Hua13], viene stimata la distribuzione dei parametri del processo produttivo per cilindri senza compensazione.
- 2) Mediante questi parametri viene fatta una previsione sul risultato ottenuto a seguito della compensazione per ciascun cilindro, mediante l'impiego del modello corretto con il termine per l'interferenza, quando questa è trascurabile.
- 3) Vengono paragonati i risultati effettivamente ottenuti con quelli previsti; se un'osservazione cade all'interno dell'intervallo di previsione al 99%, allora rispetta la distribuzione stimata e si può considerare soggetto ad una interferenza trascurabile. Al contrario, i punti che cadono al di fuori di tale intervallo sono soggetti a interferenza non trascurabile

Ci si aspetta, quindi, che i punti al di fuori dell'intervallo siano quelli vicini ai confini delle zone di compensazione. I risultati ottenuti hanno validato le ipotesi degli autori, dal momento che l'80% delle osservazioni presentano interferenza trascurabile e risultano collocate nelle zone interne delle regioni di compensazione. La ricerca così svolta arricchisce l'ambito di trattazione, portando alla luce il notevole impatto del fenomeno di compensazione sul prodotto finito, del quale si deve tener conto per l'applicazione di un modello di compensazione per il prodotto finito.

2.2 Controllo qualità in-process – distribuzione delle polveri

Le ricerche sopra illustrate si concentrano sulle deformazioni geometriche del prodotto finito e sulla loro compensazione. Tali analisi non utilizzano informazioni acquisite durante il processo, ma solo misure post-process.

Un altro ambito di ricerca di notevole importanza riguarda il monitoraggio in-process, basato sull'utilizzo di sensori installati in macchina che forniscono informazioni sul comportamento del processo, durante il processo stesso.

Vengono qui considerate due diverse metodologie di monitoraggio del processo, una che monitori la qualità del processo di coating (ossia, come già visto, di distribuzione delle polveri) e l'altra incentrata sul monitoraggio in tempo reale della dimensione della zona di fusione [Cra11].

Come visto in precedenza, una cattiva distribuzione delle polveri nella camera di lavorazione ha effetti diretti e negativi sulla rugosità del prodotto finito. Perciò è importante identificare le cause principali di una mancata omogeneità nella stesura delle polveri. I motivi che possono portare ad una simile situazione sono la rottura del “coater blade” (il rullo che distribuisce le polveri sullo strato precedente), deformazioni del pezzo, per cui alcune parti sono più alte di altre ed, infine, carenza di polveri, che causano una mancata copertura dell'intera superficie da lavorare. La soluzione proposta in [Cra11] per monitorare la qualità del processo di stesura delle polveri, prevede il rilevamento della tonalità di grigio media delle polveri in una zona della camera di lavorazione che non sia trattata dal laser. Eventuali errori nella deposizione delle polveri, infatti, causano un'alterazione nella tonalità media di grigio del letto di polveri monitorato, dal momento che valli e dossi vi introducono ombre; è quindi possibile, avendo come riferimento la tonalità media corrispondente ad una stesura di buona qualità, individuare momenti del processo caratterizzati da errori e irregolarità.

Con questo metodo, è possibile identificare due tipologie di errori: il fenomeno di “wear”, caratterizzato da graffi di ridotta entità presenti in modo omogeneo lungo tutta la superficie, e quello di “local damage”, con solchi più pronunciati ma isolati sul letto di polveri. Il sistema di controllo prevede il monitoraggio di cinque linee disposte in una zona non interessata alla lavorazione (in bianco nel lato sinistro della figura 2.6). Queste vengono utilizzate per identificare la tonalità media di grigio per ogni zona di controllo del letto di polveri. E' così possibile definire la “linea di profilo”, e costruire quindi una carta di controllo simile a quella riportata in figura 2.6.

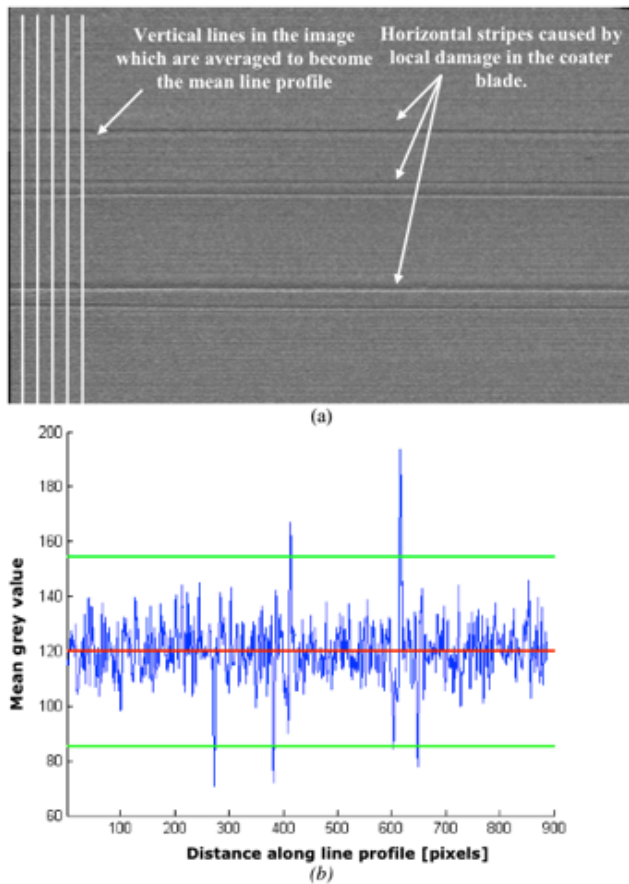


Fig 2.6: nella figura in alto è possibile vedere il letto di polveri in presenza di errori nella distribuzione. Nella figura sotto viene invece tracciata la linea del profilo ottenuta come media delle tonalità di grigio (da Cra11)

Se si paragona la linea di profilo di un letto di polveri difettoso con quella di una situazione ideale, si può notare che la tonalità media rimane attorno al valore di 120; ciò che varia notevolmente è invece la varianza, che si presta quindi ad essere utilizzata come indicatore di allarme per il fenomeno di “wear”. Il “local damage” è invece visibile in concomitanza ai punti posti al di fuori dei limiti di controllo.

2.3 Controllo qualità in-process – controllo del Melt Pool

Un altro possibile sistema di monitoraggio del processo produttivo on-line, riportato in [Kru07], consiste nel controllare, mediante l’impiego di una camera CMOS e di un fotodiiodo, l’area della zona di fusione ed il suo rapporto lunghezza/spessore. La camera permette di calcolare il numero di pixel compresi nella zona di fusione, dai quali è possibile ricavare informazioni geometriche sul melt pool; il fotodiiodo, invece, emette un segnale elettrico

proporzionale all'area di fusione. Entrambi gli strumenti possono essere quindi impiegati in un sistema a feed-back per monitorare e variare i parametri di processo in funzione del comportamento del melt pool.

Il processo di controllo deve iniziare con il corretto settaggio del sistema impiegato per il monitoraggio. Per far ciò è necessario individuare il livello di colore associato all'isoterma della zona di fusione, impossibile da ottenere in modo analitico. Si rivela quindi necessaria un'analisi sperimentale del processo produttivo al fine di individuare il corretto livello d'intensità luminosa associata alla zona di fusione del processo. Per far ciò viene innanzitutto misurata l'ampiezza di una passata al termine della lavorazione; tale ampiezza viene poi impiegata per identificare, sul grafico del livello di colore associato all'immagine della zona di fusione, il livello di colore corrispondente alla zona di fusione.

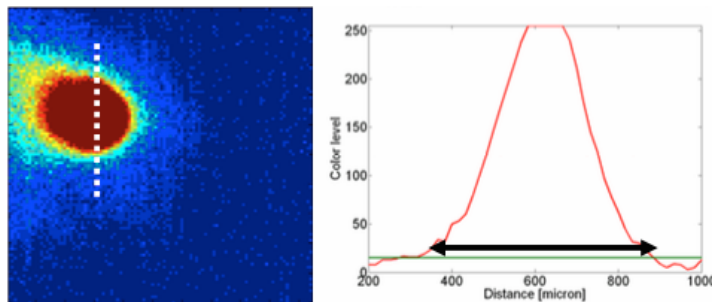


Fig 2.7: a sinistra sezione del melt pool, a destra livello di colore in funzione della distanza (da Kru07)

Nella figura 2.7 è possibile vedere il caso applicato di quanto appena descritto: sulla curva di livello del colore vengono cercati i due punti situati ad una distanza pari all'ampiezza del vettore precedentemente misurato e indicato, nel lato sinistro della figura, dalla segmento bianco. Il livello di colore associato a tali punti è quello associato al melt pool. Successivamente un apposito algoritmo deduce l'area, la lunghezza e l'ampiezza della zona di fusione, contando i pixel che, nell'immagine ricavata, presentano un livello di colore uguale o superiore a quello precedentemente definito.

Tale sistema di controllo è stato impiegato per la produzione di particolari pezzi costituiti da zone autoportanti, che non poggiano cioè su layer precedentemente lavorati e che sono luogo di forti variazioni nel melt pool, a causa della differenza di conducibilità termica delle polveri rispetto al materiale già lavorato. I grafici riportati in figura 2.8, mostrano le caratteristiche misurate mediante fotodiode e camera CMOS in funzione del tempo di produzione.

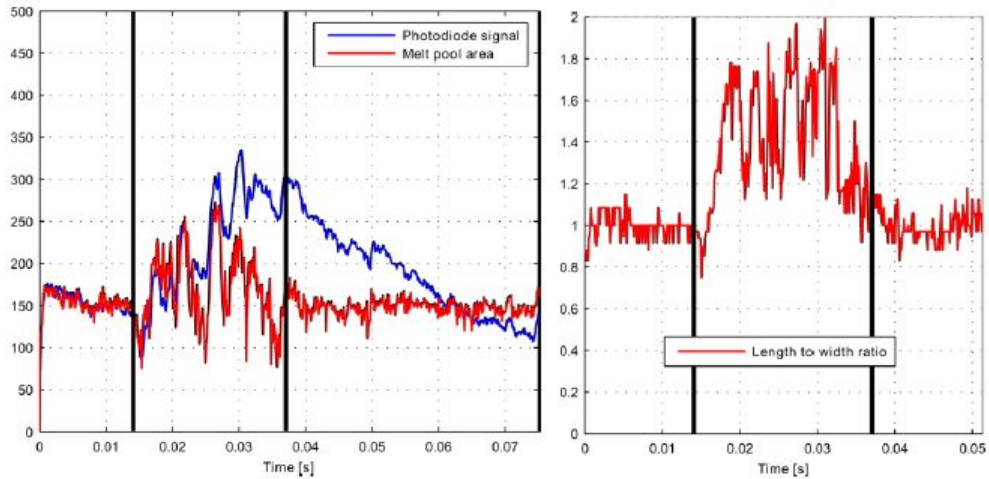


Fig 2.8: carte di controllo provenienti da un sistema di monitoraggio del melt pool durante la lavorazione di una zona sporgente (da Kru07)

E' qui possibile notare un aumento del rapporto lunghezza/ampiezza e una crescita nella varianza dell'area di fusione. Dal momento che una simile situazione potrebbe essere causa dell'effetto di "balling", il sistema di controllo in studio si rivela molto utile, poiché permette di variare in modo automatizzato i parametri di processo in prossimità di zone sporgenti, riducendo così i fenomeni indesiderati.

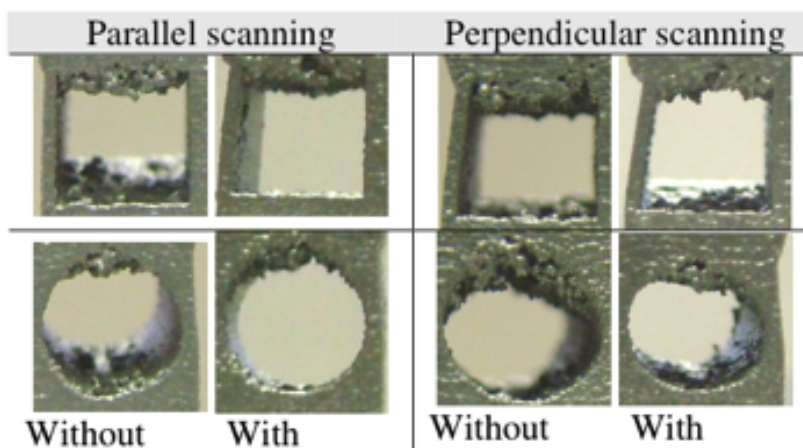


Fig 2.9: risultati ottenuti in [Kru07] con due diverse strategie di passate, con o senza sistema di feedback

In fig 2.9 sono riportati i risultati produttivi ottenuti da [Kru07] nell'applicazione di un simile sistema di controllo, associato all'utilizzo di due diverse strategie di passata. Questa tecnica di monitoraggio on-line mediante termografia viene applicata con successo anche in [Kra14], che ne verifica la bontà e l'utilità del suo impiego per monitorare in tempo reale l'evoluzione del letto di fusione, i cui repentini cambiamenti indicano la presenza di zone di criticità produttive.

2.4 Controllo qualità in-process – controllo della zona di lavorazione

Un sistema di controllo del processo simile a quello appena riportato, viene proposto in [Kra12]. Come nel precedente lavoro, il sistema di controllo qui presentato è utilizzabile per qualsiasi processo di lavorazione mediante laser; in aggiunta, esso risulta di particolare interesse dal momento che permette di identificare la presenza di zone porose durante la lavorazione.

In questo sistema di controllo, contrariamente a quanto avveniva in quello precedentemente illustrato, invece di monitorare la sola zona di fusione mediante una camera co-assiale al laser di lavorazione, viene controllato l'intero letto di polveri lavorato, mediante un sistema termografico non co-assiale che permette di rilevare l'evoluzione termica del layer appena lavorato. A causa della limitazione imposta dagli strumenti impiegati, tuttavia, non viene di fatto monitorato l'intero letto di polveri ma solo la parte centrale della zona di lavorazione, come riportato nella figura 2.10

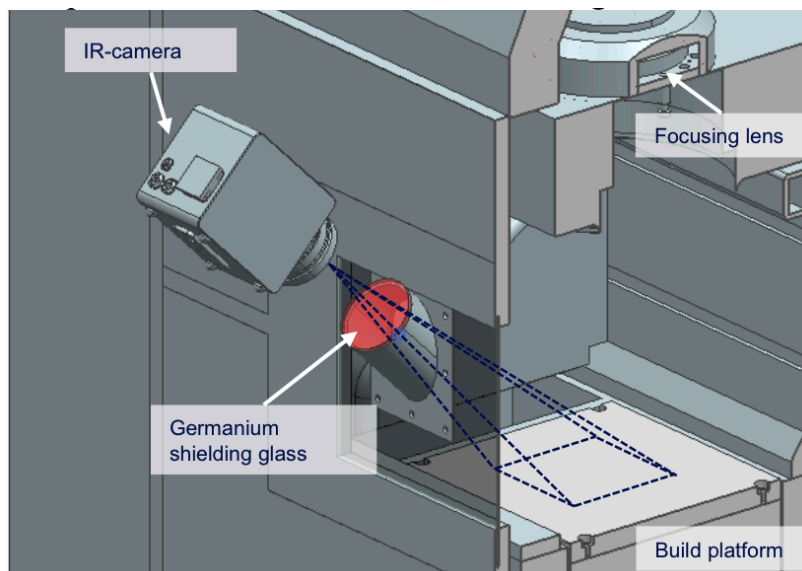
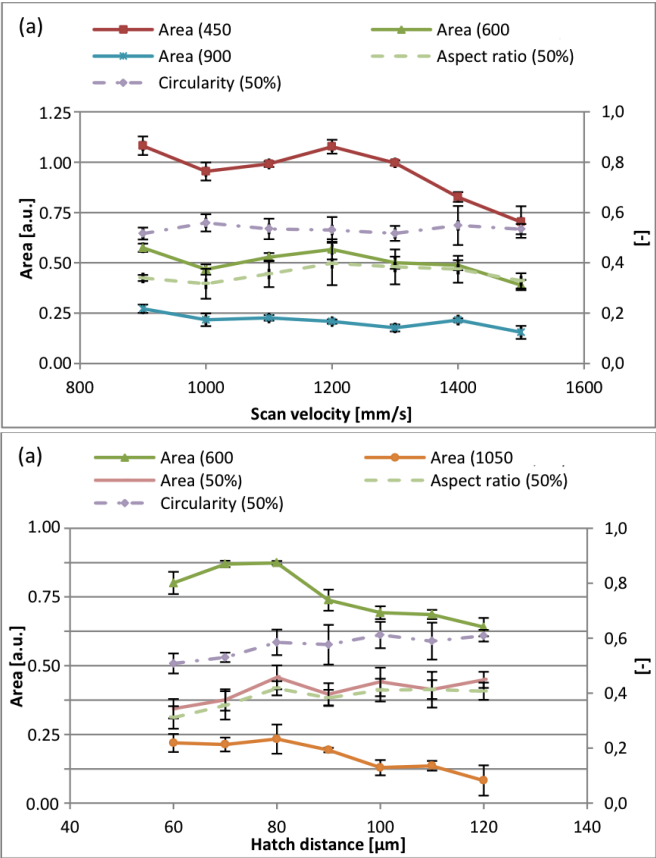


Fig 2.10: sistema di monitoraggio impiegato in [Kra12]

Il sistema termografico è in grado di misurare l'area totale, la massima larghezza e lunghezza, l'Aspect Ratio (rapporto fra asse maggiore e asse minore) e la circolarità della zona trattata. Siccome lo scopo del sistema di controllo è quello di identificare variazioni nei parametri di processo, la bontà del sistema impiegato viene valutata misurando tali grandezze al variare di parametri quali, ad esempio, la hatch distance la velocità di passata e la potenza laser.

I grafici qui riportati (Fig 2.11) mostrano le misurazioni ottenute mediante il sistema di controllo descritto per i parametri sopra indicati.



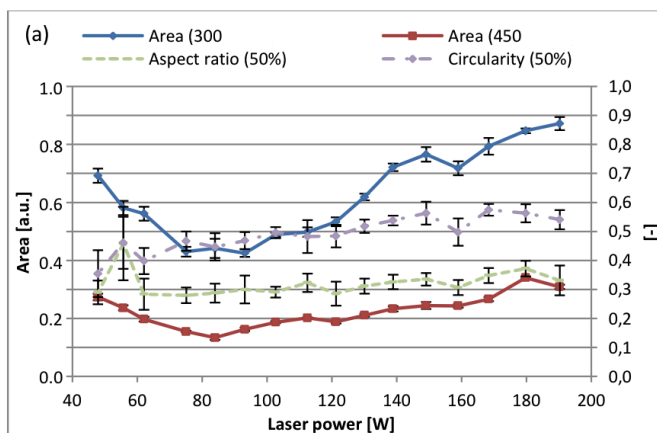


Fig 2.11: valore misurato per l'area del melt pool in funzione di diversi parametri (da Kra12)

Successivamente, il sistema è stato impiegato per identificare porosità e cavità ottenute artificialmente all'interno del prodotto, dal momento che difetti reali sono solitamente difficili da ottenere in modo naturale nel processo produttivo [Grü14]. Gli autori ritengono infatti di notevole importanza, per il futuro sviluppo della tecnologia additive, la creazione di uno strumento di controllo in grado di monitorare e identificare la formazione di pori e altre irregolarità nella superficie del layer lavorato, fonti, come già visto, di notevoli alterazioni nella qualità del prodotto finito. Ci si aspetta che il sistema impiegato sia in grado di identificare tali errori di processo facilmente, dal momento che una struttura cava o un poro dovrebbero presentare una differente dissipazione di calore rispetto alle zone correttamente lavorate. Il procedimento seguito è proprio quello di considerare un profilo di riferimento, ottenuto da un corretto processo produttivo, e di paragonarlo con il profilo di irradiazione proveniente dalla zona lavorata in presenza di cavità artificiali. Come mostrato nella figura 2.12, la differenza fra tali profili porta ad una caratteristica curva a due picchi, che permette di identificare la presenza di una zona costituita da cavità artificiali.

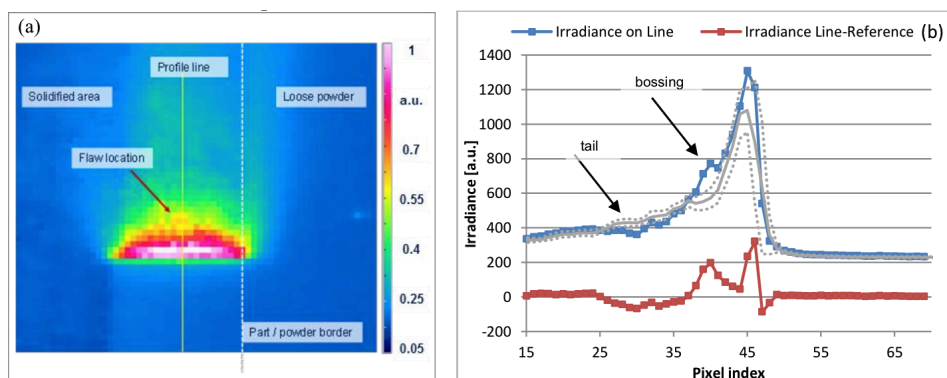


Fig 2.12: profilo di melt pool in presenza di una cavità artificiale (da Kra12)

Un altro sistema di monitoraggio concettualmente simile ai due appena presentati è riportato in [Bay08]; in questo caso vengono impiegati una camera ed un pirometro per monitorare la zona di lavorazione. Il primo strumento si rivela utile per identificare la suddivisione di un vettore lavorato in gocce di materiale fuso a seguito di un'errata lavorazione del letto di polveri. Il pirometro è invece impiegato per monitorare eventuali variazioni nello spessore dei layer lavorati e della hatch distance. Un altro lavoro, interessante per approfondire la problematica del controllo di processo per produzioni mediante tecnologie laser, sia SLM che SLS, è svolto riportato nei due lavori [Chi07][Chi10]; gli autori impiegano qui un sistema costituito da due pirometri coassiali per dimostrare che la ridotta lunghezza d'onda misurabile è comunque sufficiente a determinare la massima temperatura di lavorazione per la maggior parte dei processi produttivi. Applicazioni a livello produttivo delle ricerche sopra riportate possono essere riscontrate nel brevetto [Chul1], che descrive una metodologia per monitorare la temperatura di lavorazione mediante una apposita camera; un sistema di feedback appositamente progettato varia quindi, sulla base della temperatura appena rilevata, la velocità di passata e la potenza laser del processo produttivo.

2.5 Monitoraggio di un processo EBM

E' infine degno di nota, parlando di processi metallici, un lavoro dedicato al controllo del processo in una produzione mediante Electron Beam Melting. In [Sch12] viene infatti riportato un interessante risultato, che potrebbe aprire utili ambiti di ricerca per il controllo della porosità e dei difetti superficiali in tale sistema produttivo. Il metodo impiegato dagli autori consiste nell'utilizzo di una camera IR, la cui capacità di identificare tali difetti è messa alla prova mediante una tradizionale metodologia distruttiva per l'analisi del prodotto finito.

Più in dettaglio, un'immagine della superficie prodotta viene rilevata mediante la camera. In teoria, ci si aspetterebbe di riconoscere la zona lavorata quale area maggiormente luminosa della camera di lavorazione, essendo essa ad una temperatura superiore rispetto alla zona non trattata. Tuttavia, se osserviamo la figura 2.13 vedremo che ad essere maggiormente luminose sono le zone di polveri non lavorate; ciò è dovuto alla diversa natura del materiale fuso e delle polveri che, nonostante si trovino ad una temperatura minore rispetto alla zona fusa, presentano una luminosità superiore. Per questo motivo, la zona di lavorazione viene identificata analizzando la luminosità del materiale non lavorato: le polveri a massima luminosità saranno quelle in prossimità della zona lavorata, trovandosi ad una temperatura maggiore rispetto alle restanti polveri. Vengono così identificate sei differenti zone lavorate, ciascuna ottenuta mediante un diverso parametro di processo. I sei blocchi sono stati ottenuti

sovrapponendo un centinaio di layer e, per ciascuno di essi, è stata catturata un'immagine mediante camera IR.

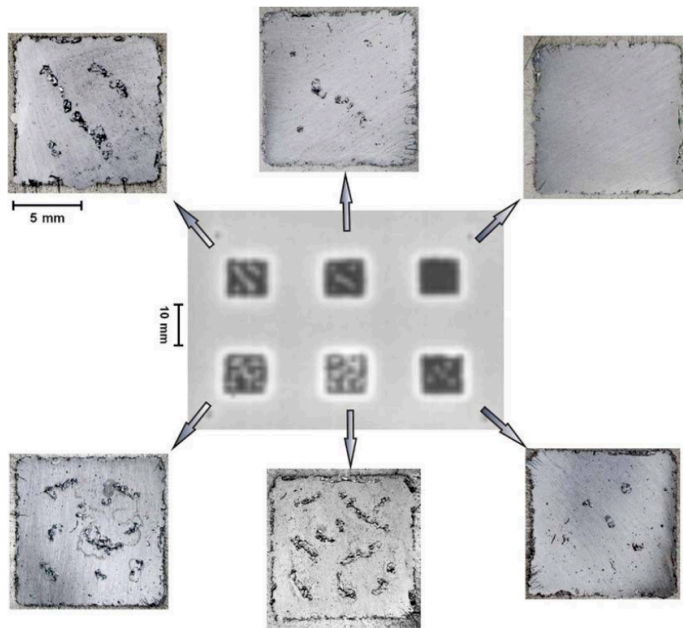


Fig 2.13: al centro l'immagine rilevata dalla camera IR, intorno le sezioni dei sei prodotti finiti lungo il novantesimo layer (da Sch12)

La figura 2.13 riguarda il novantesimo strato lavorato. Le sei figure attorno all'immagine ottenuta mediante la camera, sono stati rilevati mediante una tradizionale tecnica di sezione del provino lungo il layer considerato. Lo scopo dell'analisi è quello di verificare che, mediante l'uso della camera IR, sia possibile identificare il pattern dei difetti superficiali facilmente identificabili dall'osservazione delle sezioni.

Nonostante la risoluzione della camera sia ridotta, i risultati sono interessanti, dal momento che la maggior parte della porosità dovuta all'utilizzo di parametri non ottimali è rilevabile mediante l'impiego della camera. Si rende quindi fattibile un controllo dei difetti di produzione senza la necessità di ricorrere ad analisi distruttive del pezzo. In questo modo, al termine della lavorazione di un generico layer, si rivela possibile un sistema di trattamento del prodotto al fine di ridurre porosità e altri difetti; possibili interventi attuabili alla conclusione di ogni layer sono, per esempio, il già citato re-melting della superficie lavorata o,

in alternativa, una nuova distribuzione e lavorazioni di polveri in corrispondenza dei difetti di più grande entità.

E' da notare che la società Arcam fornisce, ormai da alcuni anni, sistemi produttivi EBM che presentano un sistema di controllo integrato, costituito da una camera IR e da un software che consente di svolgere analisi di immagini provenienti dal sistema produttivo [Kra11].

2.6 Monitoraggio di processi plastici

I metodi di controllo on-line del processo produttivo fin qui illustrati, riguardavano processi produttivi a polveri metalliche. Vengono quindi riportati di seguito due interessanti lavori dedicati unicamente alla lavorazione di materie plastiche. Il primo sistema di controllo è stato sviluppato per un processo SLS a polveri plastiche, mentre il secondo è dedicato al controllo di processo per un sistema produttivo 3DP (vedere par. 1.2.3).

2.6.1 Controllo per SLS a polveri plastiche

Come già precedentemente indicato, nei processi PBF, il letto di polveri viene pre-riscaldato al fine di portare la zona di lavorazione il più possibile vicina alla temperatura di fusione. La mancanza di omogeneità nel letto di polveri pre-riscaldato è all'origine di numerosi problemi nel prodotto finito, quali porosità, tensioni ed incurvature [Weg11]. In tale lavoro, quindi, una macchina SLS viene integrata con un sistema di monitoraggio costituito da due camere in grado di rilevare la temperatura della zona osservata. In figura 2.14 è riportato lo schema del sistema ideato.

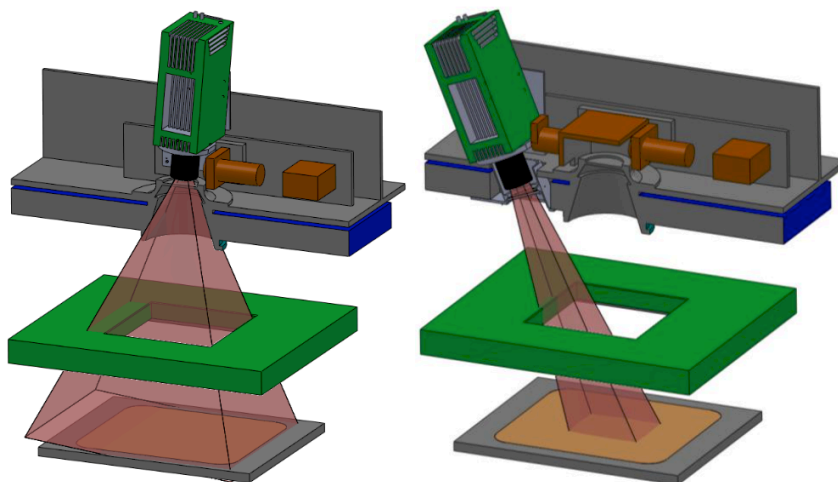


Fig 2.14 schema del sistema di rilevazione impiegato in Weg11

La prima camera, a sinistra, consente di monitorare l'intero letto di polveri, ricavandone la temperatura. A destra, invece, la camera inclinata di 23° consente di monitorare costantemente la zona di fusione e di ottenerne così una misura di temperatura. Mediante questo sistema, viene in un primo momento verificata l'effettiva omogeneità del sistema di pre-riscaldamento delle polveri. Come prevedibile, questo non appare in grado di riscaldare in modo omogeneo le polveri che, come ci si aspettava, assumeranno temperature variabili all'interno del letto di lavorazione.

Successivamente, lo stesso sistema di monitoraggio, viene impiegato per misurare la temperatura del letto di polveri. L'immagine seguente (fig 2.15) mostra (a sinistra) la distribuzione di temperatura nella zona osservata, per una temperatura target di 177° C. A destra sono invece riportate le deviazioni da tale temperatura lungo quattro linee ideali identificate sul letto di polveri ed indicate nella figura di sinistra con la dicitura L01, L02, L03, L04.

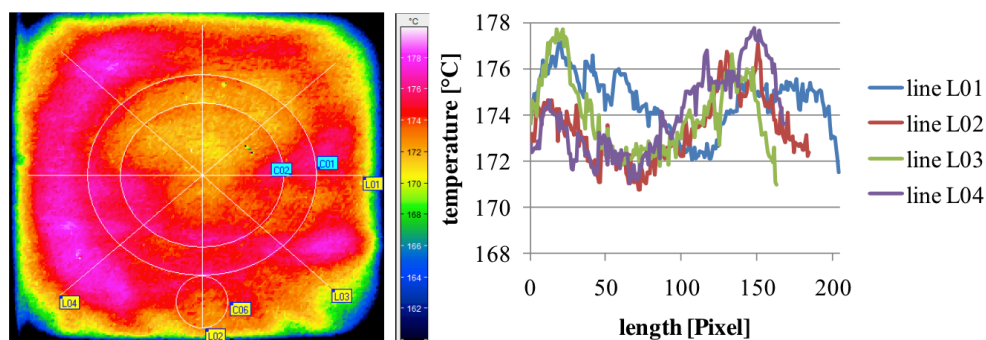


Fig 2.15: distribuzione di temperatura nella zona osservata (da Weg11)

Gli autori mostrano inoltre come l'altezza del pezzo lavorato influisca fortemente sulla disomogeneità della temperatura lungo il letto di polveri. Si nota infatti che, con l'aumentare dell'altezza di lavorazione del pezzo, ossia con l'allontanarsi della zona di fusione dal substrato di partenza, la massima deviazione della temperatura nel letto di polveri si riduce.

Nell'ultima parte del lavoro, gli autori si concentrano sulla definizione di legami fra i parametri di processo e la temperatura del letto di fusione. I risultati ottenuti sono sintetizzati dai seguenti grafici e mostrano la capacità del sistema di controllo di identificare variazioni nei parametri di processo monitorando la temperatura della zona di fusione.

Nella figura 2.16.a è riportato il legame fra temperatura e passata laser. E' interessante notare come la prima doppia esposizione non alteri notevolmente la temperatura del melt pool, mentre la seconda doppia esposizione vari

notevolmente la temperatura raggiunta. Nel grafico 2.16.b è viene fatta variare la hatch distance e la velocità di passata. La figura 2.16.c mostra invece i legame della temperatura con la lunghezza del vettore lavorato, per i due diversi set di parametri impiegati.

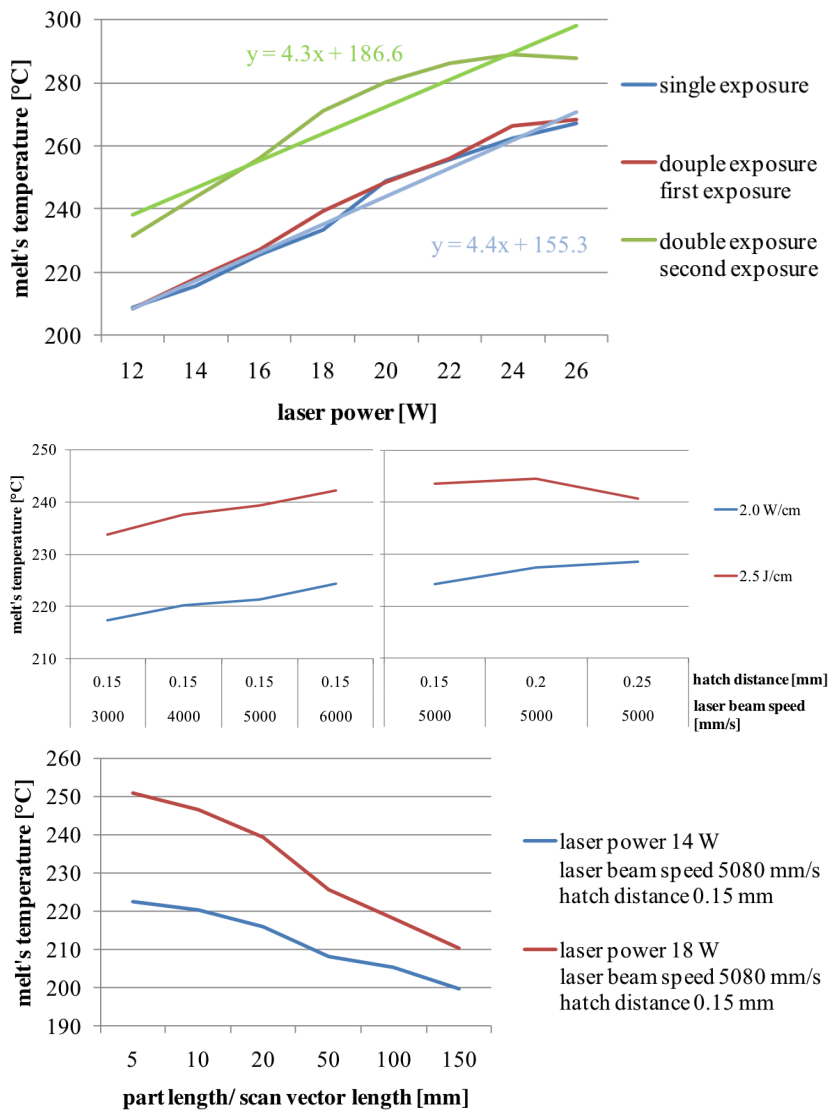


Fig 2.16: risultati ottenuti in Weg11

2.6.2 Monitoraggio per processi 3DP

Il lavoro presentato in [Gat11] apre un interessante scorcio nella possibilità di impiegare camere di monitoraggio per svolgere misurazioni sui prodotti ottenuti mediante 3DP senza dover ricorrere a misure distruttive del prodotto finito. Il

primo passo dell'analisi è stato quello di settare correttamente il sistema di trattamento delle immagini, per far sì che le misurazioni svolte su di esse non risentissero dei tipici problemi correlati all'analisi di immagini, quali eccessivo gradiente di illuminazione, dovuto al fenomeno di vignettatura ossia alla diversa risposta dei pixel alla luce; rumore delle immagini, cioè la naturale variazione casuale della luminosità o dei colori nel processo di rilevamento immagini ed, infine, dal fenomeno di "blurring", che rende sfocati i bordi dell'immagine rilevata. Nella prima fase del lavoro, quindi, vengono svolte misure esterne del pezzo che, paragonate con le misure nominali e con altre ottenute mediante calibro, permettono di verificare l'affidabilità del sistema di trattamento delle immagini.

Successivamente, verificata la bontà del sistema, vengono svolte misure del pezzo durante la sua produzione. L'obiettivo è di poter monitorare la tipica struttura a due pezzi dei prodotti 3DP, che presentano una zona "core" ed una "shell". La prima è la zona interna al prodotto ed è solitamente caratterizzata da una minor saturazione di legante rispetto alle polveri di lavorazione; al contrario, la zona "shell" non è altro che il bordo del pezzo in lavorazione, che presenta generalmente una maggior saturazione di legante [Mar10]. La dimensione e la composizione di tali zone altera le proprietà del prodotto e, per questo motivo, potrebbe rivelarsi molto utile un controllo dimensionale durante la fase produttiva. Il sistema impiegato si è rivelato in grado di processare le immagini provenienti dal sistema produttivo, individuare e misurare le dimensioni delle due zone. Questa possibilità apre la strada, secondo gli autori, alla progettazione di un sistema di feedback in grado di variare i parametri di processo on-line in risposta a variazioni delle dimensioni attese delle parti interne al prodotto in lavorazione.

Capitolo 3

Caratterizzazione della porosità

Come abbiamo visto nei paragrafi precedenti, la porosità ricopre una notevole importanza all'interno dei processi additive, non solo perché determina numerose proprietà fisiche e meccaniche del prodotto finito, ma anche perché può essere sfruttata per particolari applicazioni in diversi ambiti. Esempi d'impiego di prodotti metallici a porosità controllata sono riportati nei già citati [Pat11][Yar14]. Uno studio approfondito della porosità di un prodotto metallico si rende quindi necessario sia per svolgere un corretto controllo della qualità del prodotto finito, al fine di monitorarne le proprietà meccaniche, sia per costruire prodotti che possano essere impiegati, mediante la presenza di strutture porose controllate e preventivamente progettate, in particolari ambiti.

Un possibile esempio di future applicazioni della tecnologia sia SLM sia EBM, sono le “schiume metalliche” che, grazie alla loro leggerezza e alla notevole proprietà di smorzamento delle vibrazioni, possono essere impiegate in diversi ambiti, anche come materiale per l'assorbimento di energia a seguito di urti di notevole importanza nel settore automotive. Una dettagliata trattazione delle proprietà delle schiume metalliche è riportata in [Dav83]. Diverse tecniche produttive Additive sembrano essere impiegabili per la produzione di tali schiume [Ken12]. In particolar modo, il processo SLM, visti i notevoli risultati ottenuti in ambito medico, dove si sono ottenute celle di dimensioni variabili dai 0,5 mm ai 2 mm, si propone come possibile sostituto ai tradizionali metodi produttivi per le schiume metalliche, costituite da pori di dimensione variabile fra i 0,3 e i 5 mm. Ricerche in questo ambito sono presenti, ad esempio, in [Fer12].

E' chiaro quindi che, oltre alla convenienza economica ed alla fattibilità di un processo produttivo di schiume metalliche mediante SLM, risulta necessaria una approfondita indagine della porosità di questi prodotti, al fine di identificarne degli utili descrittori che permettano poi di generare un sistema di controllo per il prodotto finito ottenuto mediante processo additive. Per giungere ad un tale obiettivo, si è rivelato necessario lo svolgimento di una breve indagine sui descrittori della porosità e sulle sue tecniche di misura.

3.1 Analisi della porosità

L'analisi delle caratteristiche dei prodotti porosi (pore medium) ha interessato numerose discipline di diversa natura, dalle scienze geologiche alla manifattura metallica, passando per le applicazioni mediche. Lo scopo è sempre stato quello di identificare dei parametri, misurabili sperimentalmente a partire dal prodotto

finito, utili sia a confrontare fra loro diversi medium sia a prevederne comportamenti e proprietà. Per far ciò sono state sviluppate due metodologie descrittive della porosità di un prodotto: la tradizionale “Analisi geometrica” e la più recente “Local porosity theory” (LPT). La differenza sostanziale risiede in ciò che le due teorie ritengono l’aspetto di maggior aleatorietà all’interno di un pore medium [Hu05]. Per l’analisi geometrica, il fattore maggiormente variabile, che quindi può essere meglio impiegato per fornire una descrizione analitica della porosità di un prodotto, è la “porosity size” del campione considerato, ossia la dimensione dei pori che, come si vedrà poco più avanti, può essere descritta in diversi modi. La LPT considera invece la porosità stessa come principale fattore di casualità e ritiene quindi che sia questa la proprietà di maggior interesse nel descrivere le caratteristiche di un pore medium.

3.1.1 Analisi geometrica tradizionale

Ritiene che le caratteristiche di porosità possano essere esaustivamente descritte mediante un ridotto insieme di indicatori, ricavabili da immagini 2D, ossia sezioni di provini analizzati mediante appositi software, o 3D ottenute, ad esempio, mediante tomografia. Altri importanti metodi di misura per la porosità sono riportati sotto. Gli indicatori ritenuti utili dalla teoria tradizionale sono [Nim04]:

- porosità, intesa come frazione del corpo non occupata dal materiale, rispetto al volume totale del medium. Può essere ottenuta mediante analisi volumetrica, superficiale (rapportando l’area della zona porosa con la superficie della sezione studiata) o lineare.
- porosity size, identificata generalmente con il raggio effettivo di un poro, può essere misurata anche come l’area della sezione trasversale di un poro, come il suo volume o ancora mediante il “raggio idraulico”, definito come il rapporto fra l’area della sezione trasversale e la circonferenza.
- porosity size distribution: indica la numerosità di pori con una certa dimensione all’interno di un campione rappresentativo del pezzo in studio (fig. 3.1). La funzione $f(r)$ assume un valore proporzionale al volume totale occupato da tutti quei pori che hanno un “raggio effettivo” pari a ‘r’.

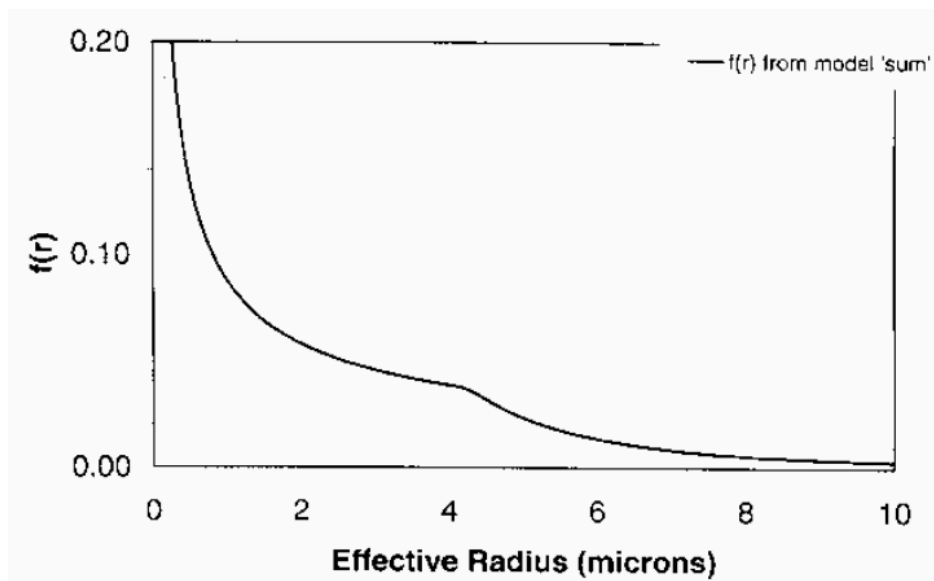


Fig 3.1: pore size distribution (da Nim04)

E' utile ed interessante notare che valori simili di porosità ottenuta mediante analisi lineare, superficiale o volumetrica, denota l'isotropia del medium considerato. Identica considerazione può essere fatta per la curva $f(r)$ della pore size distribution. Un simile risultato può essere molto utile, dal momento che è così possibile definire se il prodotto finito ottenuto mediante una certa lavorazione risulta isotropo o meno, ottenendo così una prima informazione sull'omogeneità delle caratteristiche meccaniche del pezzo.

3.1.2 Local Porosity Theory

Dal momento che la maggior parte dei pori, lungi dall'essere entità singole a sé stanti, risultano in gran parte fra loro connessi, si rende necessario, nella analisi tradizionali, introdurre un certo grado di arbitrarietà per delimitarne artificialmente i bordi. Proprio per questa intrinseca arbitrarietà nel metodo di analisi, molti studiosi ritengono di dover evitare il concetto di poro e porosity size [Nim04]. La LPT considera quindi, quali fattori per la definizione della proprietà di porosità di un prodotto, le due seguenti voci:

- local porosity distribution: non è altro che la densità di probabilità empirica, ottenuta calcolando il numero di pori di una certa dimensione all'interno di un ben definito sottoinsieme di analisi. Consideriamo un pore medium di dimensioni $M_1 \times M_2 \times M_3$ pensato come un sottoinsieme $S \subset \mathbb{R}^3$ dello spazio reale. Tale insieme sarà a sua volta costituito dall'unione $S = \mathbb{P} \cup \mathbb{M}$ con $\mathbb{P} \cap \mathbb{M} = \emptyset$, dove \mathbb{P} è lo spazio dei pori, mentre \mathbb{M} è l'insieme del materiale di base del prodotto. Indichiamo poi con $\mathbb{K}(x, L)$ un generico cubo di lato L e centrato nel vettore del reticolo

x. All'interno di questo cubo viene calcolata la porosità, definita come $\phi(x, L) = \frac{V(\mathbb{P} \cap \mathbb{K}(x, L))}{V(\mathbb{K}(x, L))}$ dove $V(\cdot)$ indica il volume dell'insieme considerato. Si definisce quindi la "local porosity distribution" come $\mu(\phi, L) = \frac{1}{m} \sum_x \delta(\phi - \phi(x, L))$ dove m è il numero di celle di misure $\mathbb{K}(x, L)$ impiegate.

- local percolation probability: una cella $\mathbb{K}(x, L)$ si definisce "percolata lungo la direzione x" se esiste un percorso interno all'insieme $\mathbb{P} \cap \mathbb{K}(x, L)$ che connetta le due facce di S perpendicolari alla direzione x considerata. Si definisce quindi la "local percolation probability" lungo la direzione α come $\lambda_\alpha(\phi, L) = \frac{\sum_x \Lambda_\alpha(x, L) \delta\phi(x, L)}{\sum_x \delta\phi(x, L)}$ dove $\Lambda_\alpha(x, L)$ è una variabile booleana che assume valore 1 se la cella $\mathbb{K}(x, L)$ è percolata lungo la direzione α , 0 altrimenti.

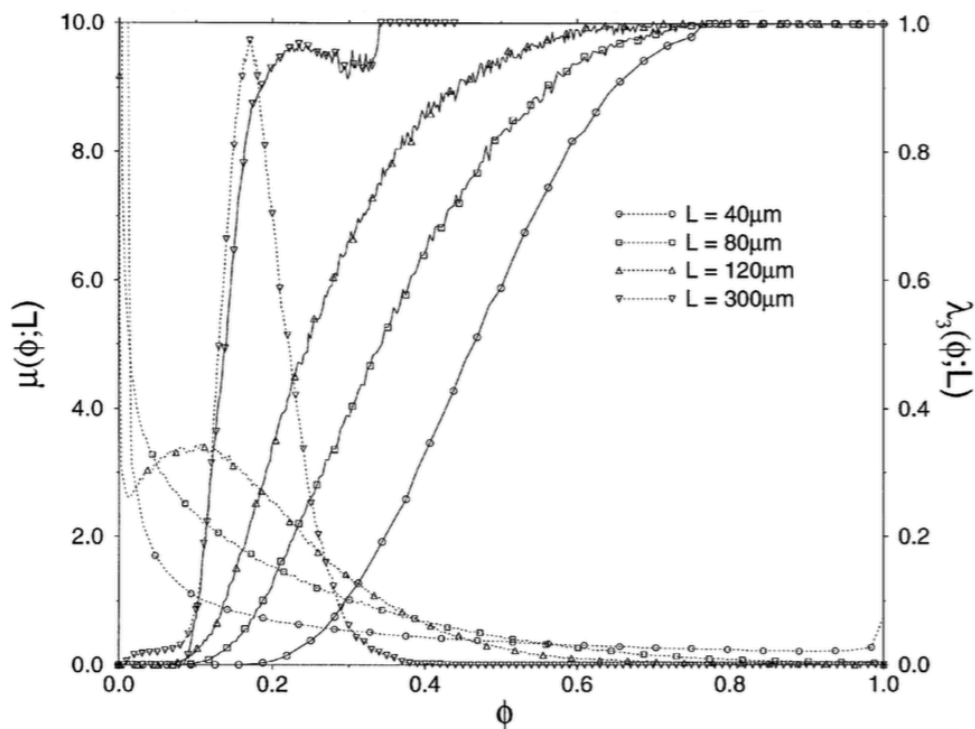


Fig 3.2: funzione di "local porosity distribution" (tratteggiata) e di "local percolation probability" (linea continua) ottenute con diversi valori di L (da Nim04)

Le due funzioni sopra indicate, di cui sono riportati alcuni esempi nella figura 3.2, possono fornire utili risultati qualora impiegate per paragonare prodotti di diversa tipologia. Ad esempio, la funzione $\mu(\phi, L)$ può essere utilizzata per avere informazioni riguardanti l'eterogeneità dei pori all'interno del medium

considerato. La “local percolation probability” permette di avere informazioni sulle fluttuazioni della percolazione all’interno del prodotto. Altra curva di interesse, ricavabile a partire dalla “local percolation probability”, è la “total fraction of percolating cells” che indica la frazione di celle $\mathbb{K}(x, L)$ percolate lungo la direzione α . Dalla curva è possibile ricavare la minima lunghezza L che permette di identificare il “representative elementary volume” (REV), definito come il volume all’interno del quale la deviazione standard di una certa proprietà (in questo caso la porosità) è all’interno di un livello ritenuto accettabile [Hu05].

Un aspetto non tenuto in conto nei due modelli fin qui presentati è la natura frattale che alcune strutture porose possono presentare. Diversi studi sono stati svolti al fine di identificare metodologie di misura della natura frattale dell’oggetto in studio; tuttavia, come riportato in [Hon98], tale natura ha una particolare importanza nello studio del suolo e nell’idrologia. Una analisi frattale dei pori non sembra quindi avere ricadute sulle proprietà meccaniche dei pore medium.

3.2 Metodi di misura

Esistono diversi livelli di analisi di un prodotto poroso che permettono di ottenere informazioni sulla natura dei pori e sulla loro struttura (fig 3.3). Data la variabilità e l’intrinseca difficoltà nel misurare accuratamente la vera natura del prodotto, i risultati ottenibili mediante le diverse tecniche possono variare anche notevolmente. Tuttavia è possibile condurre paragoni fra prodotti diversi, a patto che le tecniche impiegate siano le stesse per ogni misurazione.

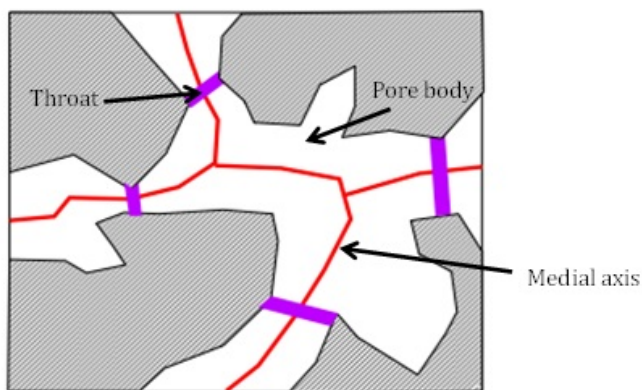


Fig 3.3: schema della struttura di un materiale poroso. E’ possibile vedere la differenza fra “Pore Body” e “Pore throat” (da <https://resultanengineering.wordpress.com/2013/03/18/x-ray-computerized-tomography-test-of-a-fractured-specimen/>)

Tecniche di “mercure porosimetry” (adatta per pori di grande dimensioni) e “gas adsorption” (consigliata per pori di piccole dimensioni) consentono di identificare il volume dei pori accessibili, ossia tra loro interconnessi. Non permettono di identificare pori isolati. Inoltre, mediante misure così ottenute, è possibile dedurre la curva di “pore size distribution” solo a patto di poter fare ipotesi sulla geometria dei pori e sul modello di assorbimento del gas. Le stesse misure possono essere ottenute, in modo meno accurato, mediante una Tomografia a raggi X; questa tecnica, seppure meno precisa, consente tuttavia di ricavare direttamente sia porosità che pore size distribution, senza bisogno di fare ipotesi sui modelli che descrivono geometria e comportamento fisico dei pori. Inoltre, la tomografia misura la vera pore size distribution, mentre per la “mercure porosimetry” sarebbe meglio parlare di una misura della “neck size distribution” [Far03].

La porosità può essere ricavata anche mediante analisi di immagini; sezioni del prodotto in studio possono essere facilmente analizzate mediante l’impiego di microscopi e software per l’analisi di immagini. Naturalmente, a meno che non si abbia la certezza di isotropia nella porosità del materiale, l’analisi di un limitato numero di sezioni potrebbe non fornire indicazioni accurate sulla reale porosità del prodotto. Tuttavia, se viene analizzato un elevato numero di sezioni, si può notare una sostanziale coincidenza della porosità media, calcolata sulle sezioni studiate, e la porosità effettiva del materiale [Fer12].

Esiste infine una classe di algoritmi che, ipotizzando l’omogeneità della porosità all’interno del pore medium, permettono di dedurre la struttura tridimensionale del prodotto in studio a partire dalle misurazioni ottenibili mediante analisi di sezioni del pezzo. In [Lia98] si verifica la bontà di tale metodo, verificando la similarità fra misure effettuate su sezioni 2D ottenute sulla struttura tridimensionale modellata e i risultati ottenuti dalla sezione 2D effettivamente analizzata.

3.3 La porosità nella letteratura Additive

Come già visto in precedenza, la porosità ricopre un ruolo fondamentale in ambito additive, dal momento che la densità, da essa influenzata, è uno dei fattori maggiormente utilizzati per l’analisi della bontà di un pezzo e del relativo processo produttivo. Essa, infatti, influenza fortemente le proprietà meccaniche del prodotto finito e, conseguentemente, le sue performance. Nonostante la tecnologia SLM garantisca una elevata densità del materiale, numerosi sforzi sono stati sostenuti per raggiungere una densità del 100%, obiettivo non indifferente dal momento che le uniche forze che entrano in gioco in tale processo sono quelle termiche e gravitazionali, contrariamente a quanto avviene nei processi di stampaggio, che vedono l’impiego di pressioni meccaniche

durante la lavorazione [Kru 09]. L'assenza di questa ultima categoria di forze, nel processo produttivo, rende più difficile l'identificazione di una semplice metodologia per l'incremento della densità, dal momento che non si può far leva sulle pressioni meccaniche per raggiungere l'incremento desiderato. A questa difficoltà si aggiunge il rischio, intrinseco nel processo produttivo, che bolle di gas restino intrappolate all'interno di un layer durante la lavorazione. Tale fenomeno, che aumenta notevolmente la porosità del pezzo riducendone la densità, può essere dovuto a diverse ragioni, la più frequente delle quali è una ridotta qualità nel processo di distribuzione delle polveri. La superficie di un layer appena lavorato, come visto nel paragrafo dedicato alle ricerche in ambito SLM, mostra una naturale rugosità, caratterizzata dalla presenza di picchi e valli. Tale proprietà, impedisce al coater di distribuire in modo omogeneo il nuovo letto di polveri; alcune zone, quindi, saranno più spesse di altre e, di conseguenza, potrebbero non essere portate a completa fusione. Inoltre, soprattutto in presenza di layer particolarmente spessi, anche qualora l'intero strato fosse portato alla temperatura di fusione, le aree di maggior spessore presenterebbero una zona di fusione più profonda, all'interno della quale eventuali bolle di gas potrebbero non fare in tempo a raggiungere la superficie del pezzo, prima che questa si raffreddi, restando così intrappolate nel layer appena lavorato. Si verrebbero così a creare dei pori. [Min14]. La figura 3.4 mostra proprio il profilo della zona di fusione in funzione dello spessore del layer in lavorazione; in presenza del layer più spesso si può osservare la formazione di un microporo, dovuto proprio al fenomeno sopra spiegato.

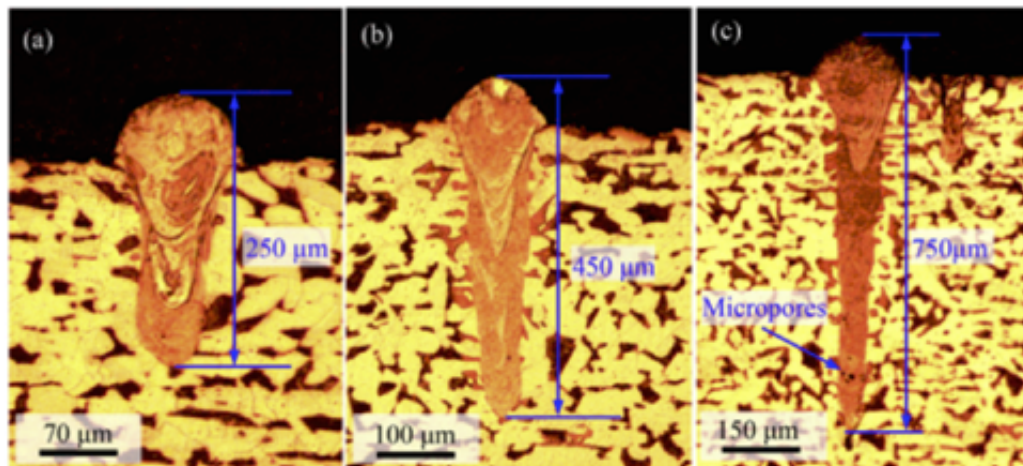


Fig 3.4: molten pool a spessori di layer crescenti. Se il layer risulta eccessivamente spesso, bolle di gas potrebbero restare intrappolate sul fondo della zona trattata (da Min14)

Quindi, pur non potendo sfruttare pressioni meccaniche come nei processi di stampaggio, è possibile far leva su un buon controllo della distribuzione delle polveri per ridurre la porosità del pezzo in costruzione.

Un altro fattore di cui si deve tener conto nel processo produttivo SLM è la velocità di passata, che ha una grande influenza sulla densità del prodotto finito, come mostra il seguente grafico (fig 3.5). Come si può vedere, per velocità di passata ridotte, la densità del prodotto finito è praticamente indipendente dalla dimensione del layer. All'aumentare della velocità, invece, questa indipendenza viene meno e, come si può notare, layer più spessi presentano una maggior porosità, che si rispecchia in un aumento della densità, proprio per le problematiche sopra espone.

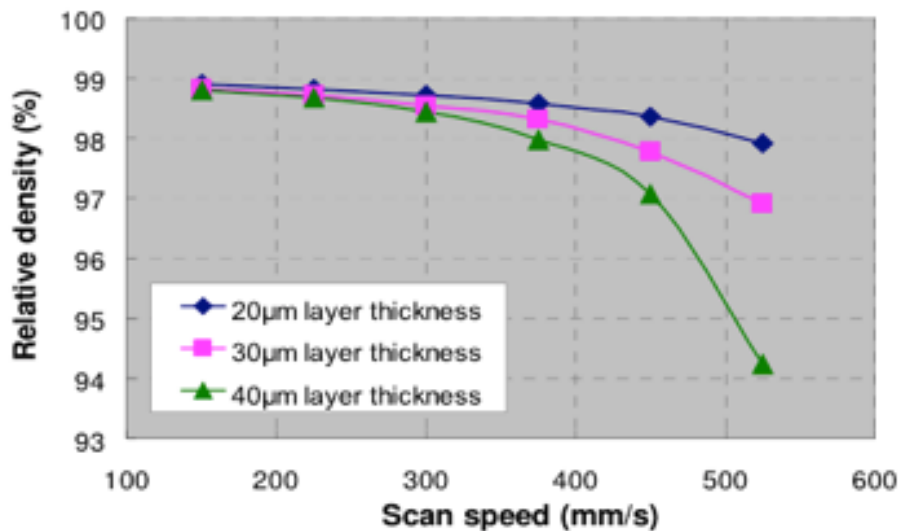


Fig 3.5: densità in funzione della velocità di passata per un prodotto in AlSi 316L (da Kru07)

Un altro fattore che gioca una grande importanza nella creazione di pezzi ad elevata densità è la strategia di passata. I layer possono infatti essere creati con diversi orientamenti del tragitto del fascio laser, riducendo le deformazioni termiche e contribuendo alla riduzione dell'effetto di balling, ossia alla suddivisione del vettore lavorato in gocce separate. [Kru04]

Infine, notevoli incrementi nella densità del prodotto possono essere ottenuti mediante l'impiego di un processo di Laser Surface Re-melting, (LSR) che consiste nel ripassare un layer appena lavorato oppure la sola superficie del prodotto finito. Il processo è degno di una rapida trattazione che verrà rapidamente esposta nel paragrafo successivo. Tuttavia è necessario chiarire subito che, tale processo, non deve essere confuso con il trattamento "Two

zones”. Questa metodologia lavorativa, infatti, prevede sì che il layer appena lavorato venga ritrattato mediante laser, ma in modo completamente diverso. Se il Laser Surface Remelting ha lo scopo di rifondere i vettori precedentemente lavorati, magari con una strategia di passata differente, il metodo “Two zones” prevede la lavorazione degli spazi vuoti inter-vettoriali, ossia delle zone che in precedenza non erano state lavorate dalla sorgente laser. [Yad07]

3.5 Laser surface Re-Melting

Visti gli ottimi risultati ottenibili con tale metodologia, a patto di accettare un aumento dei tempi di lavorazione, è utile riportare brevemente il contenuto della ricerca presentata in [Yas11], nella quale vengono analizzati i legami fra parametri di LSR e caratteristiche del prodotto finito.

Come già accennato, nel processo di re-melting possono essere ri-lavorati sia tutti i layer del prodotto, ripetendo la passata alla fine del trattamento di ogni singolo strato, sia la sola superficie esterna. Nel primo caso, quindi, uno stesso strato viene lavorato due o più volte prima di passare al layer successivo. Nel lavoro citato vengono analizzate diverse caratteristiche del prodotto ottenuto mediante re-melting, qui di seguito rapidamente riassunte.

1. Porosità: è la prima caratteristica analizzata che, come abbiamo visto, ricopre un ruolo di grande importanza nella definizione delle proprietà meccaniche di un prodotto finito. In questo caso, utilizzando un input ad alta energia, ottenibile dall'impiego di elevata potenza laser o ridotta velocità di passata, si osserva un aumento della porosità all'aumentare del numero di re-melting per layer; al contrario, in presenza di un input a bassa energia, si avrà una modesta porosità che varierà poco all'aumentare del numero di re-melting. E' quindi consigliabile impiegare laser a bassa potenza o velocità di passata elevata, proprio per evitare una degradazione della densità del prodotto. Come si vedrà poco più avanti, tuttavia, tale scelta risulterà in contrasto con la possibilità di aumentare la durezza del prodotto finito.
2. Rugosità: di notevole importanza per la qualità superficiale e porosità del prodotto finito, la rugosità viene misurata mediante l'indice Ra.

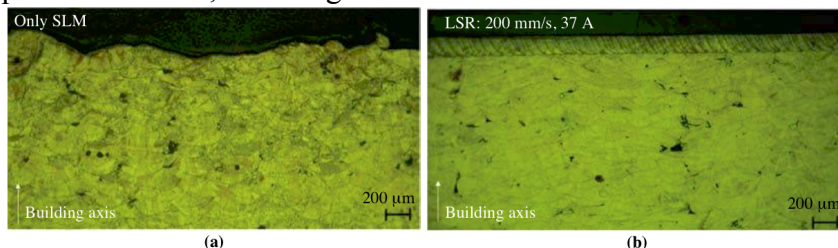


Fig 3.6: risultati ottenuti a seguito di un processo LSR sulla superficie del prodotto (da Yas11)

Osservando la figura 3.6 si può notare che l'applicazione del re-melting sulla sola superficie del prodotto finito e non, quindi, sui singoli layer, permette di ridurre notevolmente la rugosità, ottenendo così una superficie più liscia ed omogenea.

3. Durezza: in prossimità delle zone trattate mediante Laser Surface Re-melting si assiste ad un aumento della durezza; tale incremento andrà via via diminuendo nell'allontanarsi dalla zona trattata. Tanto maggiore è l'energia impiegata per il trattamento, tanto più ampia sarà la zona interessata dall'incremento della durezza, incremento che avrà naturalmente un'entità maggiore. Come detto sopra, la scelta di aumentare l'energia impiegata al fine di migliorare la durezza del prodotto è in contrasto con l'obiettivo di ridurre la porosità del pezzo.
4. Microstruttura: i vettori di lavorazione e la loro direzione sono facilmente identificabili sulla superficie di un pezzo prodotto mediante SLM; a seguito di un processo di re-melting, tuttavia, questa eterogeneità inizia a venir meno e gli strati del prodotto iniziano a presentare una superficie maggiormente lamellare, che diventa sempre più omogenea all'aumentare del numero di processi re-melting.

3.3.1 Gli strumenti di misura

Abbiamo fino ad ora riportato i numerosi lavori dedicati all'analisi di densità dei prodotti ottenuti mediante tecnologia additive. Per concludere questo capitolo, può quindi essere utile una breve panoramica sulle metodologie impiegate per misurare tale proprietà dei pezzi analizzati. [Ken12] e [Min14] utilizzano il "Metodo di Archimede" che consiste nel paragonare il peso del prodotto in atmosfere contenenti gas di diversa natura; [Buc11] impiega invece un microscopio ottico che, osservando il prodotto layer per layer durante la sua produzione, permette di stimare la densità totale del pezzo.

Un altro metodo, che negli ultimi anni si sta notevolmente diffondendo, è quello della Tomografia (fig 3.7) impiegata, ad esempio, in [Vil08] per analisi microscopiche, al fine di identificare la posizione di eventuali irregolarità del prodotto finito e misurare in modo accurato la porosità del pezzo.

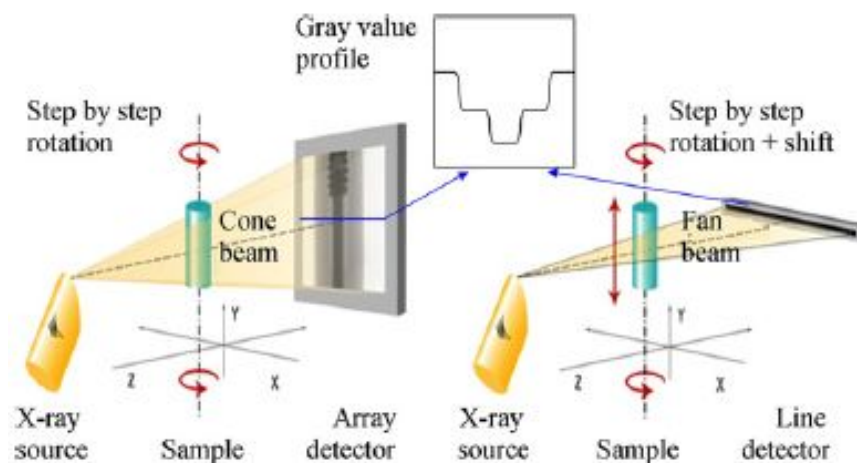


Fig 3.7: esempio di tomografia su un intero pezzo (con immagine 2D come output) o su una sola sezione (con immagine 1D come output) (da Kru11)

Questa metodologia si sta rivelando particolarmente interessante, dal momento che è l'unica a permettere l'osservazione sia delle caratteristiche esterne di un prodotto, sia di quelle interne, senza la necessità di rompere il pezzo osservato [Kru11]; permette quindi una analisi non distruttiva del prodotto finito in studio. La Tomografia permette inoltre di ottenere, simultaneamente, un controllo della qualità dimensionale e di prodotto. E' possibile, per esempio, ottenere informazioni sia sulla tolleranza geometrica di un componente che sulla sua porosità. Vista la sua potenzialità è utile fornire sommariamente una descrizione del processo di analisi tomografica.

Il funzionamento alla base della Tomografia impiegata per la metrologia è lo stesso che sottende l'impiego di tale tecnologia per gli altri ambiti di applicazione (quello medico in particolar modo). Una sorgente genera raggi X che si propagano all'interno del pezzo in studio e possono essere assorbiti o dispersi. L'entità dell'assorbimento dipende dalla lunghezza del percorso fatto dai raggi X all'interno del materiale, dalla sua densità e composizione; misurando l'entità dell'attenuazione è possibile definire i materiali attraversati e il loro rispettivo spessore. I raggi X non assorbiti né dispersi vanno a formare un'immagine 2D del prodotto o 1D in base alla metodologia di analisi impiegata; tali proiezioni vengono prelevate a diverse angolazioni e, successivamente, un apposito modello matematico produce il modello tridimensionale a partire da tali input. Altri studi devono essere svolti per migliorare, in particolar modo, l'accuratezza di questo sistema di misura ma, grazie alle sue proprietà, la Tomografia si sta rapidamente imponendo come innovativa tecnologia per la misurazione ed il controllo della qualità di prodotti finiti [Kru11].

Capitolo 4

Metodologia di analisi della porosità

Viene in questo capitolo proposta una metodologia per la caratterizzazione ed il monitoraggio della porosità nelle schiume metalliche (estendibile a prodotti porosi ottenuti mediante processo AM).

4.1 I provini e l'analisi d'immagine

I set di dati impiegati per l'analisi sono stati ottenuti da tre diversi prodotti, di diametro pari a 26 mm e spessore medio di 1,03 mm, generati mediante un processo di schiumatura di una polvere di alluminio. Ciascun componente in schiuma è stato sezionato in un diverso numero di provini, dai quali sono state ricavate poi immagini digitali mediante una tecnica di retroilluminazione. Nelle figure 4.1, 4.2, 4.3 sono riportate tre sezioni per ciascuna schiuma metallica studiata. Come si può notare, i pori sono facilmente distinguibili sulla superficie di ciascuna sezione.

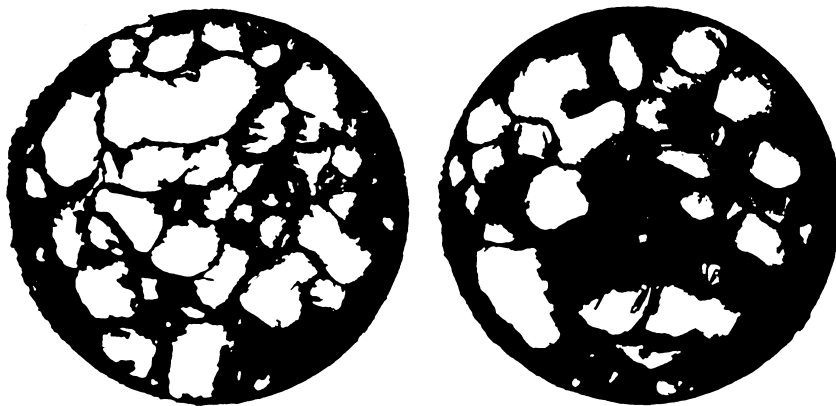


Fig 4.1: provini della schiuma denominata "Sample1"

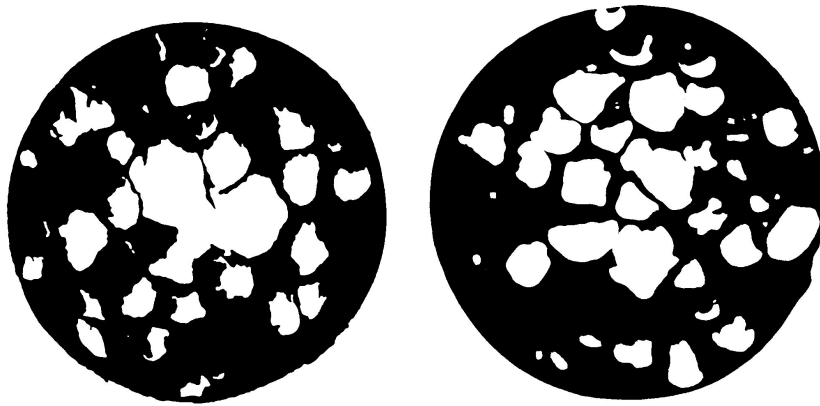


Fig 4.2: provini della schiuma denominata “Sample2”

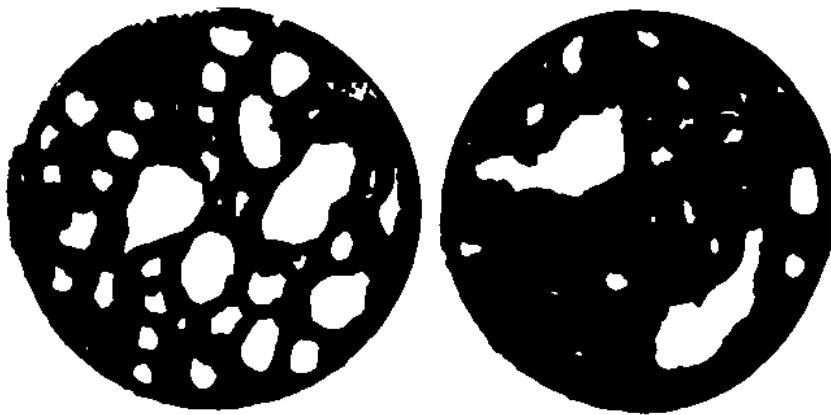


Fig 4.3: provini della schiuma denominata “Sample3”

Per ottenere informazioni su tali pori è stato impiegato Imagej, un software di analisi d'immagini. Con questo semplice strumento è stato possibile ottenere una serie di descrittori utili ad una prima caratterizzazione della porosità. Le misurazioni ottenute sono qua sotto illustrate.

- **Area di ciascun poro.** Una volta definiti i limiti della scala di grigio presenti nell' immagine, in questo caso corrispondenti ai due soli colori bianco e nero, imagej identifica automaticamente i pori e ne ricava l'area, misurata in *pixel*² .
- **Centro di massa,** ottenuto come media delle coordinate x-y di tutti i pixel interni ad un dato poro; le coordinate sono misurate in base alla luminosità di ciascun pixel e sono indicate con la voce XM, YM.

- **Descrittori della forma**, costituiti da circolarità, che assume il valore 1 per un cerchio perfetto e tende a 0 in presenza di una forma più allungata; Aspect Ratio, ottenuta mediante il rapporto fra asse maggiore e asse minore del poro; Roundness, definita come $4 * \frac{area}{\pi * major\ axis^2}$, e Solidity = $\frac{area}{convex\ area}$
- **Frazione d'area**, poco significativa per i singoli pori ma, se calcolata sull'intera sezione in studio, fornisce la porosità della sezione stessa

4.2 Correlazione spaziale

Il primo obiettivo perseguito nell'analisi, una volta ottenuti i descrittori per tutti i provini di ciascuna schiuma considerata, è stato quello di identificare un'eventuale correlazione spaziale fra le proprietà misurate mediante Imagej. Per far ciò è stato impiegato l'Indice di Moran, il cui fondamento teorico viene qui brevemente illustrato.

Si prenda in considerazione un insieme di x_i, x_n di osservazioni per le quali si vuole valutare l'esistenza di una correlazione spaziale [Mor50]. L'Indice di Moran viene definito come

$$I = \frac{n * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} * z_i * z_j}{S_0 * \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1)$$

Dove n è il numero di osservazioni, z_i è la deviazione dell'osservazione i-esima $x_i - \bar{X}$, $w_{i,j}$ è il peso associato alla distanza fra le osservazioni i,j. S_0 è l'aggregato di tutti i pesi degli spazi, ossia

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (2)$$

L'indice di Moran varia nell'intervallo [-1,1]. Il valore nullo indica una dispersione casuale dei dati, ossia una totale assenza di correlazione spaziale.

4.3 Densità di probabilità mediante Kernel Density Estimation

La procedura proposta per la caratterizzazione della porosità si basa sulla stima della funzione di densità di probabilità per l'indicatore sintetico "Area" di ciascun poro. Il metodo proposto è illustrato in Fig. 4.5.

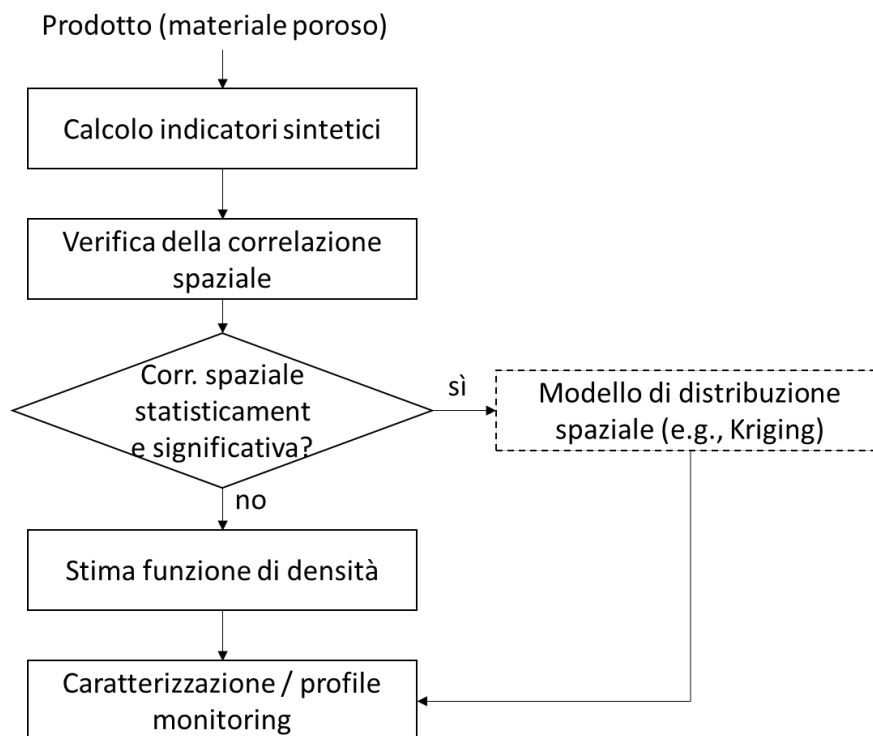


Fig 4.4: Schema logico del metodo di analisi seguito per l'analisi della porosità. L'utilizzo dei modelli di distribuzione spaziale non è stato qui impiegato, dal momento che sarebbe stato utile solo qualora fosse stata verificata l'effettiva correlazione spaziale della proprietà in studio.

La scelta di concentrarsi sull'indicatore area è stata dettata principalmente dalla grande importanza che la superficie del poro ricopre nella definizione delle caratteristiche meccaniche e morfologiche dei prodotti porosi, come più volte indicato nei capitoli precedenti.

Il problema che si è presentato, è stato quindi quello di individuare una funzione di densità per una grandezza empirica la cui distribuzione risultava ignota. Implementando un apposito script in R, è stato possibile raggiungere tale scopo mediante la metodologia della "Kernel Density Estimation", un metodo di analisi statistica non parametrico che permette proprio di stimare la densità di variabili casuali. Lo script è stato implementato in modo da ottenere una funzione che fosse in grado di fittare gli istogrammi ottenibili per ciascun provino di ciascuna schiuma metallica analizzata. Viene qui di seguito illustrata la generale problematica della stima di una funzione di densità.

Supponiamo di aver a disposizione un campione $X_1 \dots X_n$ di osservazioni casuali aventi una densità di probabilità f ignota. E' possibile ottenere la stima \hat{f} di tale densità nel seguente modo:

$$\hat{f}_n(x, h) = \frac{1}{nh} * \sum_{i=1}^n K * \frac{x-X_i}{h} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n K_h(x - X_i) \quad (3)$$

dove $k(\cdot)$ è la funzione Kernel, per la quale deve essere

$$\int k(x)dx = 1 \text{ e} \\ k(x) \geq 0 \forall x.$$

La funzione Kernel può essere definita a sua volta in diversi modi, ciascuno dei quali implementabile anche in ambiente R. La tipologia di Kernel impiegata in questa analisi è quella Gaussiana, maggiormente impiegata nelle stime di densità [Elg02]. I Kernel maggiormente impiegati nella stima delle funzioni di densità sono riportati in [Zuc03].

<i>Kernel</i>	<i>K(t)</i>	<i>Efficiency (exact and to 4 d.p.)</i>
Epanechnikov	$\frac{3}{4}(1 - \frac{1}{5}t^2)/\sqrt{5}$ for $ t < \sqrt{5}$ 0 otherwise	1
Biweight	$\frac{15}{16}(1 - t^2)^2$ for $ t < 1$ 0 otherwise	$(\frac{3087}{3125})^{1/2} \approx 0.9939$
Triangular	$1 - t $ for $ t < 1$, 0 otherwise	$(\frac{243}{250})^{1/2} \approx 0.9859$
Gaussian	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)t^2}$	$(\frac{36\pi}{125})^{1/2} \approx 0.9512$
Rectangular	$\frac{1}{2}$ for $ t < 1$, 0 otherwise	$(\frac{108}{125})^{1/2} \approx 0.9295$

Fig 4.5: esempi di Kernel impiegabili (da Zuc03)

Dove l'efficienza del Kernel impiegato viene misurata sulla sua capacità di minimizzare la funzione di errore $MISE(\hat{f})$, che verrà poco più avanti ripresa. E' stato dimostrato [Wan95], che sotto quest'ottica il Kernel di Epanechnikov è il più efficiente. Di conseguenza, l'efficienza dei restanti Kernel è misurata

relativamente a questa metodologia di stima. Per comprendere il concetto di efficienza del Kernel si consideri, ad esempio, una stima effettuata con Kernel Rettangolare che, come riportato in figura 4.5 ha una efficienza del 93%. Si può allora affermare che il valore ottimale della funzione MISE ottenuto impiegando Kernel Epanechnikov in presenza di 93 osservazioni, è approssimabile al valore ottenibile mediante l'impiego di Kernel Rettangolare impiegando però 100 osservazioni. In altre parole, quindi, il Kernel Epanechnikov utilizza il minor numero di osservazioni per individuare il valore minimo della funzione MISE.

Una volta scelto il Kernel mediante il quale svolgere la stima di densità, si passa ad analizzare il parametro "h" detto "Bandwidth". Questo è il parametro che maggiormente influenza la stima di densità e rappresenta l'indice di smorzamento per la stima. La variazione di tale parametro influenza notevolmente la bontà della funzione di densità stimata; si deve quindi trovare un modo per identificare il valore ottimale della Bandwidth in presenza di una data tipologia di Kernel impiegata. L'idea alla base dei metodi impiegati per la selezione della Bandwidth, ed elencati poco più sotto, consiste nel minimizzare, variando il parametro h, la funzione di errore "Mean Integrated Squared Error", MISE [Jon96] che, tuttavia, non è utilizzabile praticamente così come viene definita in teoria, dal momento che è espressione della funzione di densità ignota [Kil10].

$$MISE(\hat{f}) = E \int_{-\infty}^{\infty} (\hat{f}(x) - f(x))^2 dx \quad (4)$$

Tale funzione di errore, in presenza di un numero di osservazioni molto grande ($n \rightarrow \infty$), può essere approssimato dalla funzione

$$AMISE(h) = n^{-1} * h^{-1} * R(K) + h^4 R(f'') * \left(\int x^2 \frac{K}{2} \right)^2 \quad (5)$$

Dove $R(\varphi) = \int \varphi^2(x)$ e $\int x^2 \frac{K}{2} = \int x^2 K(x) dx$

Tale formulazione è utile dal momento che permette di visualizzare facilmente i contributi del parametro "h" di smorzamento nella costruzione della funzione di errore. Il primo termine, ad esempio, è molto grande per valori ridotti di "h" e, al contrario, il secondo termine è grande per elevati valori di "h". Un altro vantaggio nell'impiego della funzione AMISE è quello di poter ricavare facilmente il valore di bandwidth che la minimizza. Si ottiene infatti:

$$h_{AMISE} = \left(\frac{R(K)}{n * R(f'') * \left(\int x^2 K \right)^2} \right)^{1/5} \quad (6)$$

Tuttavia, questo metodo di stima del valore di Bandwidth ottimale non sempre si rivela applicabile e soddisfacente in pratica [Mar92]. Sono stati quindi sviluppati numerosi altri metodi di stima del parametro “h” che minimizzino una funzione di stima della funzione MISE. Tali metodologie, riassunte in [Jon96] sono:

- Rules of Thumb: il termine ignoto di $h_{AMISE}, R(f'')$, viene stimato basandosi su valori ottenuti mediante l'impiego di una famiglia parametrica quale $N(0, \sigma)$ [Sil86].
- Least Squares Cross Validation: si basa sulla minimizzazione di una diversa funzione di errore, detta Integrated Squared Error:

$ISE(h) = \int (\hat{f}_h - f)^2 = \int \hat{f}_h^2 - 2 \int f_h f + \int f^2$ dove il primo termine è noto mentre il secondo può essere stimato come $-2n^{-1} \sum_1^n \hat{f}_i X_i$ e dove \hat{f}_i è la stima della funzione di densità mediante metodo “Leave one out” ottenuta dal set X di dati di partenza tolto un valore X_i .

- Biased Cross Validation: viene minimizzata direttamente la funzione AMISE mediante la minimizzazione della funzione

$$BCV(h) = n^{-1}h^{-1}R(K) + h^4 * \left[R(\hat{f}'') - \frac{R(K'')}{mh} \right] * \left(\int x^2 * \frac{K}{2} \right)^2$$

- Plug-in approach: l'idea è quella di inserire una stima di $R(\hat{f}'')$ all'interno della rappresentazione della funzione di h_{AMISE} .
- Smoothed Bootstrap: la funzione di errore impiegata per la stima della Bandwidth ottimale viene definita come:

$$BMISE = n^{-1} \{ h^{-1}R(K) + r(K_h * \hat{f}_g) \} + R(K_h * \hat{f}_g - \hat{f}_g)$$

Così definito l'ambiente teorico entro il quale ci si trova ad operare, i passaggi per la definizione di una appropriata stima della funzione di densità sono pochi. Scelta la tipologia di Kernel da impiegare per la creazione della funzione \hat{f} , viene costruita la funzione di errore e, sulla base di tale funzione ed in relazione alla metodologia scelta per l'identificazione della Bandwidth, si procede alla minimizzazione della funzione d'errore e alla conseguente identificazione del valore ottimale per ‘h’.

Una volta identificato il valore di ‘h’ ottimale è possibile procedere alla definizione della funzione \hat{f} . Sebbene numerosi studi siano stati svolti per fornire un'indicazione di massima su quale metodologia risulti la migliore (si veda [Par90][Par92][Cao94]), un simile risultato non è mai stato raggiunto; la scelta dipende fortemente dalla tipologia di dati studiati e varia quindi da caso a caso. Tuttavia, essendo lo scopo di questa analisi una semplice ed indicativa descrizione della natura dei dati in analisi, è stato scelto l'approccio più classico

di Least Squares Cross Validation, impiegato per anni quale standard di analisi per la stima della funzione di densità [Cao94].

Per svolgere in ambiente R una simile analisi, è stato impiegato il pacchetto ‘sm’, unico in grado di lavorare con dataset costituiti da soli valori positivi. Gli altri numerosi pacchetti disponibili, compreso la funzione “density” fornita dal software di base, portano infatti alla stima di una funzione di densità anche per valori negativi di superfici, causando così una distorsione nella stima della reale funzione di densità per il nostro caso, che prevede unicamente dati a valori positivi. E’ stata quindi utilizzata la funzione *sm.density*, che basa i calcoli per la stima dei valori della funzione di densità su un Kernel Gaussiano. Il valore ottimale di Bandwidth è stato invece ricavato mediante il comando *h.ucv()*, metodo di Least Squares cross-validazione che definisce la seguente funzione da minimizzare:

$$UCV(h, r) = \int (\hat{f}_h(x)^r)^2 - 2n^{-1}(-1)^r \sum_1^n f_{h,i}^{2r}(X_i) \quad (7)$$

dove r è l’ordine di derivazione del Kernel, nel nostro caso lasciato di default uguale a 1. La definizione della Bandwidth è quindi, in questo caso,

$$\hat{h}_{ucv}^r = \arg \min_{h,r} UCV_{h,r} \quad (8)$$

Una volta definita la Bandwidth ottimale è stato quindi possibile stimare la funzione di densità per ciascuna sezione di schiuma metallica a disposizione.

4.4 Profile monitoring via Principal Component Analysis

Una volta stimata la funzione di densità dell’indicatore sintetico (area dei pori), possono essere eseguite diverse analisi per caratterizzarne il pattern e per determinare se tale pattern rimane stabile nel tempo man mano che nuove parti vengono prodotte e misurate. Si tratta quindi di un problema che viene definito in letteratura con il termine di “profile monitoring” [Col07]. In questo studio viene seguito l’approccio presentato in [Col07], mediante l’impiego di analisi delle componenti principali (PCA). Come riportato in [Col07] e come mostrato in [Ram05] è infatti possibile considerare gli n valori ottenuti ad intervalli regolari da una curva continua ed affetta da rumore, come realizzazioni di n variabili di un processo multivariato. In altre parole, i valori di densità stimati mediante l’impiego della Kernel Density Estimation, possono essere considerati quali variabili che concorrono alla formazione dell’output di un processo, in questo caso la funzione di densità. In quest’ottica, quindi, è possibile impiegare una analisi delle componenti principali al fine di ridurre l’elevato numero di variabili di partenza ad un più ristretto gruppo, che permetta poi successive

analisi di processo multivariate. Tale approccio prende il nome di Functional Principal Component Analysis.

La PCA è un particolare tipo di analisi per processi multivariati, che consiste nell'identificazione di quelle che sono dette "componenti principali" del processo. Dato un processo costituito da p variabili x_1, x_2, \dots, x_p , le componenti principali sono una particolare combinazione lineare delle variabili:

$$z_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + c_{1p}x_p \quad (9)$$

$$z_2 = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + c_{2p}x_p \quad (10)$$

$$z_p = c_{p1}x_1 + c_{p2}x_2 + c_{pp}x_p \quad (11)$$

Con c_{ij} sono costanti determinate durante il processo di analisi.

Da un punto di vista geometrico, le componenti principali non sono altro che i nuovi assi di un diverso sistema di riferimento, rispetto a quello di partenza, lungo i quali viene spiegata la maggior variabilità del processo [Mon05]. In altre parole, ruotando gli originari assi x rappresentanti le variabili di partenza, si ottiene un nuovo sistema di riferimento; lo scopo è quello di poter spiegare una buona parte della variabilità del processo impiegando un numero $m < p$ di componenti principali.

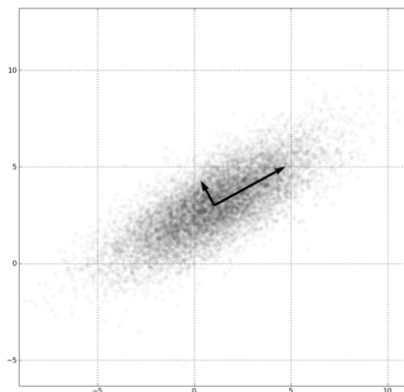


Fig 4.6: le due componenti P1 e P2 meglio si adattano a spiegare la variabilità del processo. In particolare, la componente P1, spiega la maggior parte della variabilità del processo rispetto alla componente P2 (da <http://jblomo.github.io/datamining290/slides/2013-02-08-Preprocessing.html>)

La figura 4.6 mostra il risultato derivante da un'analisi a componenti principali su un processo a due sole variabili. In questo caso, quindi, l'applicazione del metodo non riduce la complessità del problema multivariato, ma permette di intuire facilmente lo scopo di una simile analisi.

L'applicazione dell'analisi a componenti principali nell'ambito delle funzioni di densità per la superficie dei pori può essere così interpretata: si consideri di avere a disposizione un numero n di funzioni di densità, ciascuna delle quali è misurata per un insieme di punti p equidistanti. In questo modo, quindi, ciascuna funzione può essere rappresentata mediante un vettore di p variabili. Sia $y_j(k)$ il generico punto k misurato per la funzione j -esima \mathbf{y}_j con $k=1, 2, \dots, p$ e $j=1, 2, \dots, n$. I dati osservati possono quindi essere riscritti in notazione di matrice come segue:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1(1) & y_1(k) & y_1(p) \\ y_j(1) & y_j(k) & y_j(p) \\ y_n(1) & y_n(k) & y_n(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_j \\ \mathbf{y}_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

Indichiamo poi con \mathbf{S} la matrice di covarianza di \mathbf{Y} ottenuta come

$$\mathbf{S} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\mathbf{y}_j - \bar{\mathbf{y}}) (\mathbf{y}_j - \bar{\mathbf{y}})^T \quad (13)$$

dove $\bar{\mathbf{y}} = [\bar{y}(1), \bar{y}(k), \bar{y}(p)]$ è la funzione di densità media. L'analisi delle componenti principali consiste nell'identificare le due matrici \mathbf{L} e \mathbf{U} tali per cui [Col07]:

$$\mathbf{U}^T \mathbf{S} \mathbf{U} = \mathbf{L} \quad (14)$$

Dove \mathbf{L} è una matrice diagonale contenente gli autovalori λ_i con $i=1, \dots, p$ della matrice \mathbf{S} , mentre la matrice \mathbf{U} contiene, in ciascuna colonna, l' i -esimo autovettore associato al i -esimo autovalore di \mathbf{S} . La varianza dell' i -esima componente principale è data dall' i -esimo autovalore; in questo modo è possibile definire la percentuale di variabilità totale spiegata dalla i -esima componente principale quale:

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} \quad (15)$$

Poiché, nel nostro caso, il numero di variabili $p > n$ (numero di funzioni), la matrice di covarianza \mathbf{S} avrà dimensione massima $n - 1$ e, di conseguenza, potranno essere ottenute al massimo $n - 1$ componenti principali.

4.4.1 Il controllo multivariato mediante Carte di Hotelling e Carte Q

Una volta selezionate le componenti principali, è stato possibile passare alla creazione di un sistema di controllo multivariato. Per giungere a tale obiettivo, si

è scelto di applicare una carta di controllo di Hotelling, per osservazioni singole, ossia per dati i cui sottogruppi presentano ampiezza 1 [Mon05] e di carte di controllo impieganti la statistica Q per il monitoraggio dei residui [Col10].

Riassumendo quanto illustrato nel paragrafo precedente, a valle dell'analisi PC avremo a disposizione un numero m di componenti principali z_1, z_2, \dots, z_m per ciascuna delle n curve di densità a disposizione per ciascuna schiuma metallica. Lavorando quindi sulle componenti principali, si impiega la statistica T^2 per il loro monitoraggio simultaneo. Definita $\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{S}$ il vettore delle medie e la matrice delle covarianze campionarie, la statistica T^2 viene definita come:

$$T^2 = (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})' \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (16)$$

mentre i limiti di controllo per una simile carta sono:

$$UCL = \frac{p(m+1)(m-1)}{m^2 - mp} * F_{\alpha, p, m-p} \quad (17)$$

$$LCL = 0 \quad (18)$$

Per quanto riguarda l'analisi dei residui, si può ricorrere a quella che viene definita Statistica Q o anche Squared Prediction Errore (SPE). Per poter creare una carta di controllo basata su tale statistica, è ovviamente necessario ricavare i residui corrispondenti alla differenza fra la funzione osservata (ossia quella ottenuta mediante applicazione della KDE) e funzione stimata mediante PCA. Per far ciò si consideri una generica funzione di densità $y_j, j \in [1, n]$, per la quale sono state ricavate le 'm' componenti principali $z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jm}$. Sia poi \bar{y} la funzione di densità media ottenuta come:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n y_j \quad (19)$$

Allora, impiegando le m componenti principali ottenute, è possibile stimare la funzione di densità j -esima come

$$\hat{y}_{j,m} = \bar{y} + z_{j1} \mathbf{u}_1 + z_{j2} \mathbf{u}_2 + \dots + z_{jm} \mathbf{u}_m \quad (20)$$

dove \mathbf{u}_k è il k -esimo autovettore della matrice \mathbf{S} .

Ottenute così le stime per le 'n' funzioni di densità di una schiuma, è possibile ricavare la statistica Q_j per la j -esima funzione, quale somma degli errori al quadrato, ossia

$$Q_j = (y_j - \hat{y}_{j,m})' (y_j - \hat{y}_{j,m}) \quad (21)$$

I limiti di controllo di tale statistica sono definiti [Nom95]:

$$UCL = g\chi_{\alpha,h}^2 \quad (22)$$

$$LCL = 0 \quad (23)$$

Dove $\hat{g} = \frac{\hat{\sigma}_Q^2}{2\bar{Q}}$ e $h = \frac{2\bar{Q}^2}{\hat{\sigma}_Q^2}$ e $\chi_{\alpha,h}^2$ è il $100(1 - \alpha)$ percentile di una distribuzione Chi-quadro con 'h' gradi di libertà.

Le carte di controllo così definite saranno create per ciascuna schiuma metallica. Per la definizione dei limiti di controllo non saranno impiegate tutte le osservazioni di ciascuna schiuma. Al contrario, sarà utilizzata solo una frazione dei dati disponibili (circa la metà) al fine di poter poi testare la bontà di tali carte di controllo sulla restante porzione di dati. Successivamente, le osservazioni provenienti da una schiuma saranno impiegate per la stima di nuovi limiti di controllo, che verranno poi applicati alle due restanti schiume metalliche. Dal momento che i prodotti osservati sono considerati in controllo, ci aspettiamo che le carte applicate alla parte di dati non impiegata per la definizione dei limiti, non segnalino punti fuori controllo.

Nel successivo capitolo, seguendo la metodologia appena illustrata, vengono esposti tutti i risultati ottenuti durante il processo di analisi dei dati.

Capitolo 5

Analisi dei risultati

La metodologia di analisi illustrata nel capitolo precedente è stata applicata alle sezioni di tre differenti schiume metalliche così composte:

- Sample 1: schiuma metallica costituita da 15 sezioni
- Sample 2: schiuma metallica costituita da 29 sezioni
- Sample 3: schiuma metallica costituita da 27 sezioni

Esempi delle immagini di sezioni utilizzate possono essere viste all'inizio del capitolo precedente.

5.1 Gli indicatori

Mediante Imagej sono poi stati ottenuti i diversi descrittori della porosità ossia, come riportato in dettaglio nel capitolo precedente, misure dell'area di ciascun poro, coordinate del centro di massa, descrittori della forma e frazione d'area. L'output numerico generato da Imagej, che riporta i valori dei descrittori per ogni poro, è associato ad un utile output grafico, nel quale vengono mostrati i contorni dei pori identificati sulla superficie della sezione in analisi. A ciascun poro è associato un numero, che lo identifica univocamente all'interno della tabella di valori ottenuta come output numerico. Un esempio di output grafico è qui di seguito riportato.

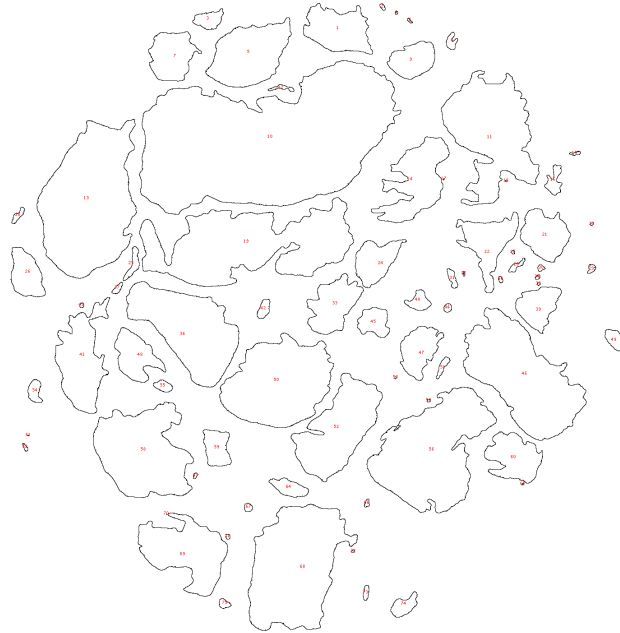
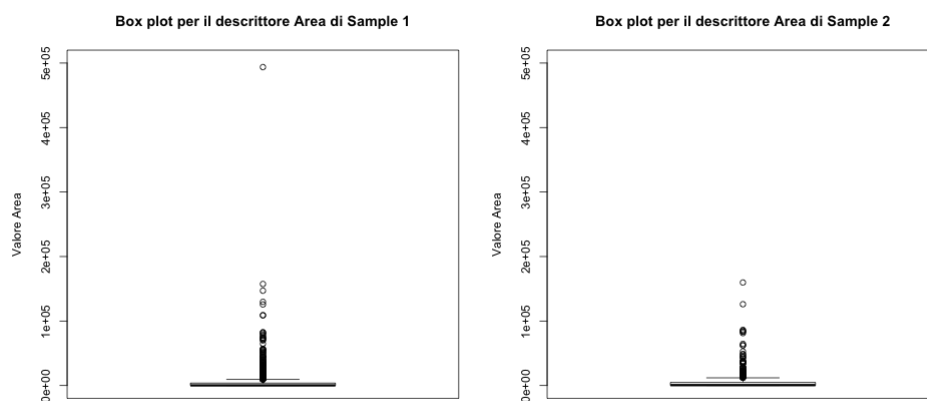


Fig 5.1: output grafico ottenuto mediante ImageJ. I pori sono contrassegnati mediante un numero in rosso.

Nella successiva parte del lavoro di analisi, ci si è poi focalizzati sull'indagine del primo descrittore ottenuto dall'output di ImageJ, ossia la superficie di ciascun poro presente su ogni sezione analizzata. Una descrizione sintetica dei valori di superficie ottenuti è visualizzabile mediante box-plot. Da tali grafici è possibile notare una diversa distribuzione del descrittore in studio fra le diverse schiume metalliche.



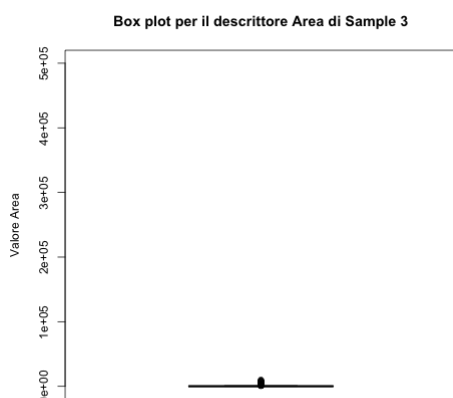


Fig 5.2: boxplot per i valori di Area dei pori per ciascun sample

Successivamente, è stato impiegato il Test di Moran per verificare eventuali correlazioni spaziali. I risultati ottenuti sono riassunti nella seguente tabella.

Test di Moran per i valori di Area dei pori di Sample1

N provino	Observed	Expected	sd	p-value
1	0.003712231	-0.01351351	0.01662015	0.2999981
2	0.02002604	-0.01538462	0.02606417	0.1742749
3	-0.01562352	-0.02325581	0.02899659	0.7923861
4	0.02447293	-0.01851852	0.03407903	0.2071208
5	0.01539595	-0.01190476	0.01965283	0.1647874
6	0.007368597	-0.01851852	0.0291405	0.3743496
7	-0.0007991034	-0.009345794	0.01778313	0.630796
8	-0.01042194	-0.01666667	0.006424521	0.331043
9	0.008658774	-0.00862069	0.01829079	0.3448078
10	0.005932722	-0.00729927	0.01389041	0.3407933
11	0.009110956	-0.0125	0.018345	0.2387848
12	0.008403462	-0.01176471	0.01879811	0.2833237
13	0.006265205	-0.01123596	0.01892804	0.355166
14	0.0002351937	-0.006756757	0.01301306	0.5910585
15	0.006647049	-0.006711409	0.01585173	0.399389

Test di Moran per i valori di Area dei pori di Sample2

N provino	Observed	Expected	sd	p-value
1	0.006572216	-0.0212766	0.02789533	0.3181183
2	-0.01517901	-0.01388889	0.01732011	0.9406231
3	-0.04264025	-0.03333333	0.04125655	0.8215231

4	-0.0267909	-0.02380952	0.02423077	0.9020746
5	-0.05678083	-0.03448276	0.02606311	0.3922514
6	0.02397588	-0.02380952	0.03399231	0.1597921
7	0.04733912	-0.02702703	0.03310088	0.02466229
8	0.03528652	-0.02631579	0.04851911	0.2042092
9	-0.04979935	-0.05882353	0.01899622	0.6347505
10	-0.01690417	-0.03333333	0.05315543	0.7572623
11	-0.01354647	-0.02040816	0.009734598	0.4808868
12	-0.0194387	-0.02777778	0.01264175	0.5094813
13	0.02425507	-0.04166667	0.05330206	0.216177
14	0.006442696	-0.01298701	0.02511708	0.4391877
15	-0.05678083	-0.03448276	0.02606311	0.3922514
16	-0.01095556	-0.02857143	0.03277331	0.5909177
17	-0.007922298	-0.02941176	0.02570526	0.4031577
18	-0.007922298	-0.02941176	0.02570526	0.4031577
19	-0.007409009	-0.02040816	0.02806632	0.6432508
20	-0.02025189	-0.02	0.02678961	0.9924979
21	-0.01913795	-0.0212766	0.02779334	0.9386649
22	0.03030239	-0.01515152	0.02410875	0.05937998
23	-0.002680761	-0.01666667	0.01412142	0.321977
24	-0.007049726	-0.01	0.01787	0.868868
25	-0.01288488	-0.02272727	0.02796867	0.7249074
26	-0.002057957	-0.01886792	0.02291624	0.4632295
27	-0.00465864	-0.01136364	0.01629517	0.6807269
28	-0.007616815	-0.025	0.01946225	0.3717638
29	-0.009017094	-0.02222222	0.02413395	0.584269

Test di Moran per i valori di Area dei pori di Sample3

N provino	Observed	Expected	sd	p-value
1	-0.01400659	-0.02325581	0.0235395	0.694376
2	-0.01386959	-0.02272727	0.02285025	0.6982821
3	-0.04461187	-0.04166667	0.02754742	0.9148574
4	-0.08635493	-0.0625	0.03606509	0.5083295
5	-0.0822396	-0.09090909	0.04577864	0.8497962
6	-0.04718764	-0.03448276	0.0297824	0.6696779
7	-0.02829484	-0.05	0.02069718	0.2943156
8	-0.03982713	-0.03703704	0.01586781	0.8604249
9	-0.05886464	-0.07142857	0.02015903	0.5331262
10	-0.06360829	-0.1	0.03756818	0.3327027

11	0.03101832	-0.02325581	0.03205583	0.09043399
12	0.01400691	-0.02857143	0.0463735	0.3585346
13	-0.03950181	-0.04545455	0.02685412	0.8245714
14	0.007858248	-0.03703704	0.0385727	0.2444591
15	-0.02358085	-0.04347826	0.0431514	0.6447219
16	-0.1024737	-0.05	0.03592192	0.1440782
17	-0.01712846	-0.04166667	0.03703271	0.507581
18	-0.01514577	-0.03571429	0.03136127	0.5119159
19	-0.006345853	-0.03448276	0.04002772	0.482096
20	-0.02080359	-0.03225806	0.01664604	0.491377
21	-0.04207306	-0.04761905	0.01161002	0.632871
22	-0.02483445	-0.03448276	0.04072032	0.8127026
23	-0.02870382	-0.03225806	0.01954771	0.8557207
24	-0.05094267	-0.04166667	0.03229745	0.7739551
25	0.01394686	-0.05	0.05104251	0.2102727
26	-0.06086166	-0.04545455	0.0294692	0.6010989
27	-0.02495136	-0.02857143	0.03184761	0.9095007

I titoli “Sample1”, “Sample2” e “Sample3” indicano a quale schiuma metallica appartengono i risultati sotto riportati. I numeri tra parentesi quadre indicano il numero di sezione a cui fanno riferimento i valori sottostanti. I valori “observed” vengono paragonati a quelli “expected” per lo svolgimento del test di Moran. SD indica invece la deviazione standard del valore atteso e, infine, il p-value consente di identificare la verifica o no dell’ipotesi nulla di assenza di correlazione spaziale.

Come è possibile vedere, ad una significatività del test di ipotesi del 5%, si verifica l’inesistenza di correlazione spaziale della proprietà “Area” per tutte e tre le schiume metalliche. Come riportato nel capitolo precedente, quindi, non potendo applicare a tale descrittore alcun modello per di correlazione spaziale, si è passati ad una analisi della funzione di densità di probabilità di ciascuna sezione a disposizione.

5.2 Stima della funzione di densità

Imboccata la strada per la stima della funzione di densità mediante metodologia di Kernel Density Estimation, è stato necessario prima di tutto definire la Bandwidth ottimale per la stima di ciascuna sezione delle schiume metalliche. Come già spiegato precedentemente, la scelta di “h” avviene minimizzando una particolare funzione di errore. Tali funzioni sono state ottenute in R mediante comando `h.ucv`, che consente di ottenere il valore ottimale di ‘h’ mediante una metodologia di Cross-Validation. La variabilità di ‘h’ all’interno di ciascun

sample, ossia fra una sezione e l'altra, e fra i tre diversi sample può essere visualizzata nei seguenti plot, che riportano in ordinata il numero di sezione ed, in ascissa, il valore di h corrispondente.

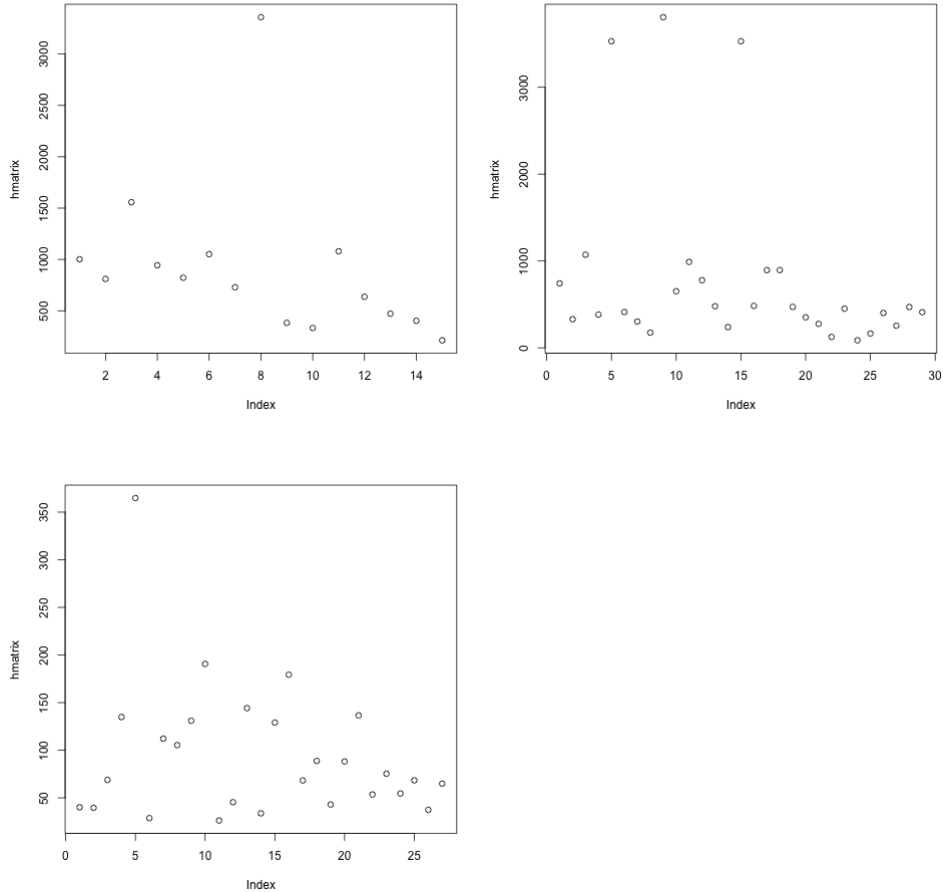


Fig 5.3: i valori di bandwidth ottimale per i tre diversi sample.

E' possibile notare da tali grafici, una notevole variabilità del valore di Bandwidth all'interno di uno stesso sample. Paragonando fra loro le schiume, invece, si osserva una certa similitudine fra Sample1 e Sample2; fortemente differenti sono invece i valori di 'h' per Sample3.

Una volta ottenuti i valori ottimali di Bandwidth per ciascuna sezione, è stato possibile disegnare la funzione di densità stimata mediante la metodologia di Kernel Density Estimation.

L'istogramma dell'indicatore area presenta una forte asimmetria positiva dovuta alla forte variabilità delle aree dei pori. Ciò rende difficile la stima ottima del parametro di bandwidth, con un effetto negativo sulla bontà della stima della funzione di densità stessa. Per questo motivo viene applicata una trasformazione logaritmica, con lo scopo di rendere meno "wild" la distribuzione e semplificare

la stima della densità. Nella figura seguente sono paragonati gli istogrammi di una stessa sezione, ottenuti mediante i dati di partenza (in alto) e quelli trasformati mediante funzione logaritmica (in basso).

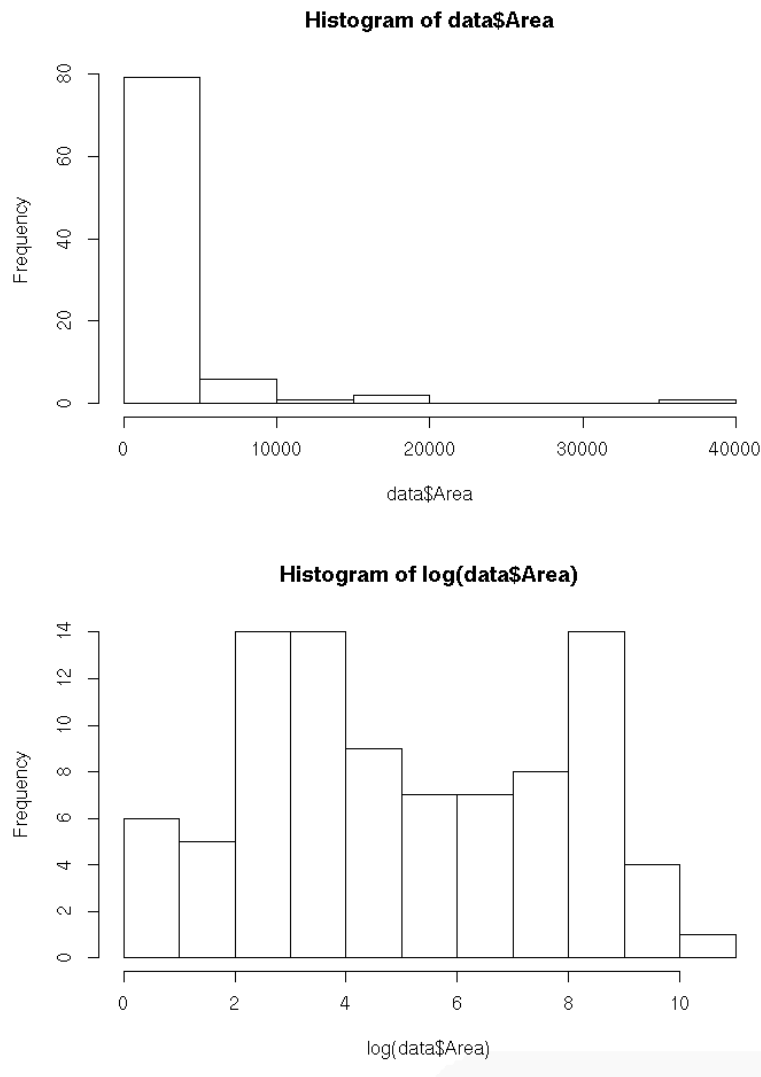


Fig 5.4: confronto fra i dati originari e quelli ottenuti mediante trasformazione logaritmica, per la sezione 27 di sample2

Come si può vedere, l'istogramma dei dati trattati risulta essere notevolmente meno asimmetrico rispetto a quello di partenza. Un risultato analogo è stato ottenuto per le altre sezioni dei tre sample considerati. Si è così scelto di impiegare, per la restante analisi, i dati trasformati. Su di essi, è stato ripercorso lo stesso procedimento fin qui illustrato, al fine di ottenerne una stima della funzione di densità. Come per i dati di partenza,

vengono qui riportati i valori di 'h' ottimali ottenuti per le sezioni di ciascuno dei tre sample.

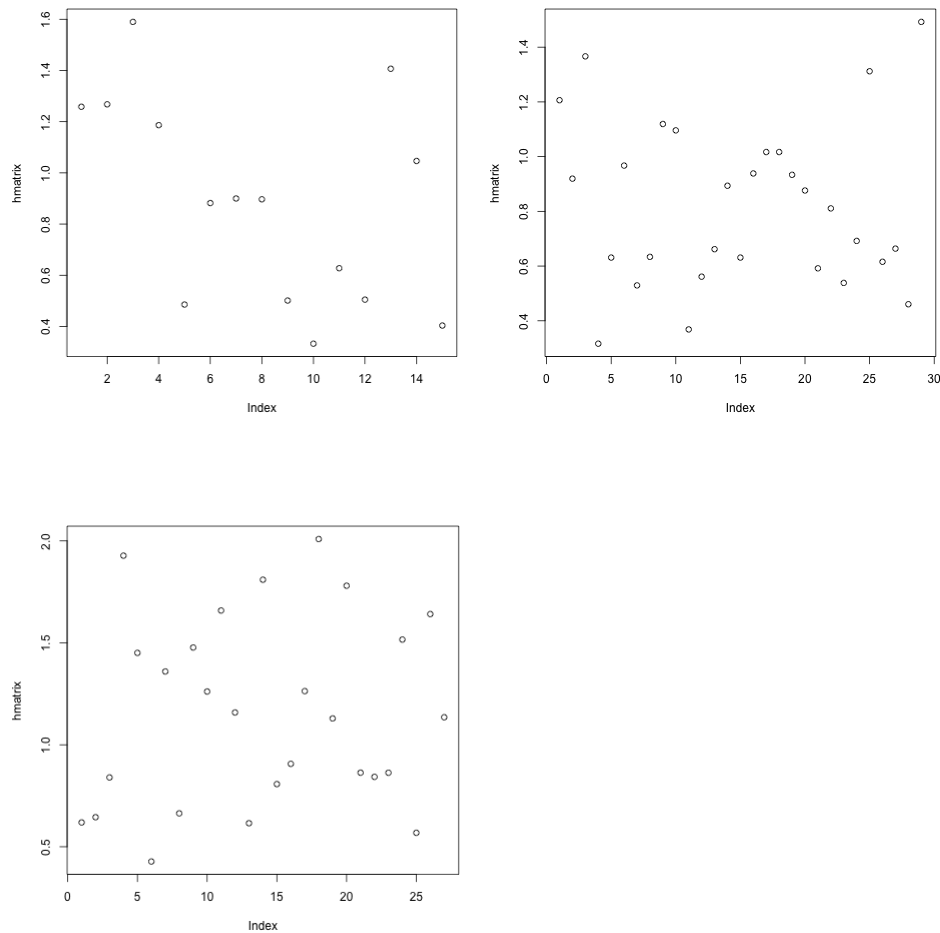


Fig 5.5: valori di bandwidth ottimale per i tre sample a seguito della trasformazione logaritmica

Come si può notare, la variabilità, sia interna che esterna, alle tre schiume è notevolmente ridotta. Ottenuti i valori di Bandwidth ottimale, sono state quindi plottate le funzioni di densità per i dati trasformati. Successivamente, al fine di identificarne eventuali similitudini fra le sezioni appartenenti ad una stessa schiuma, sono state plottate le funzioni di densità di ciascuna schiuma in un unico grafico; i risultati sono qui sotto riportati.

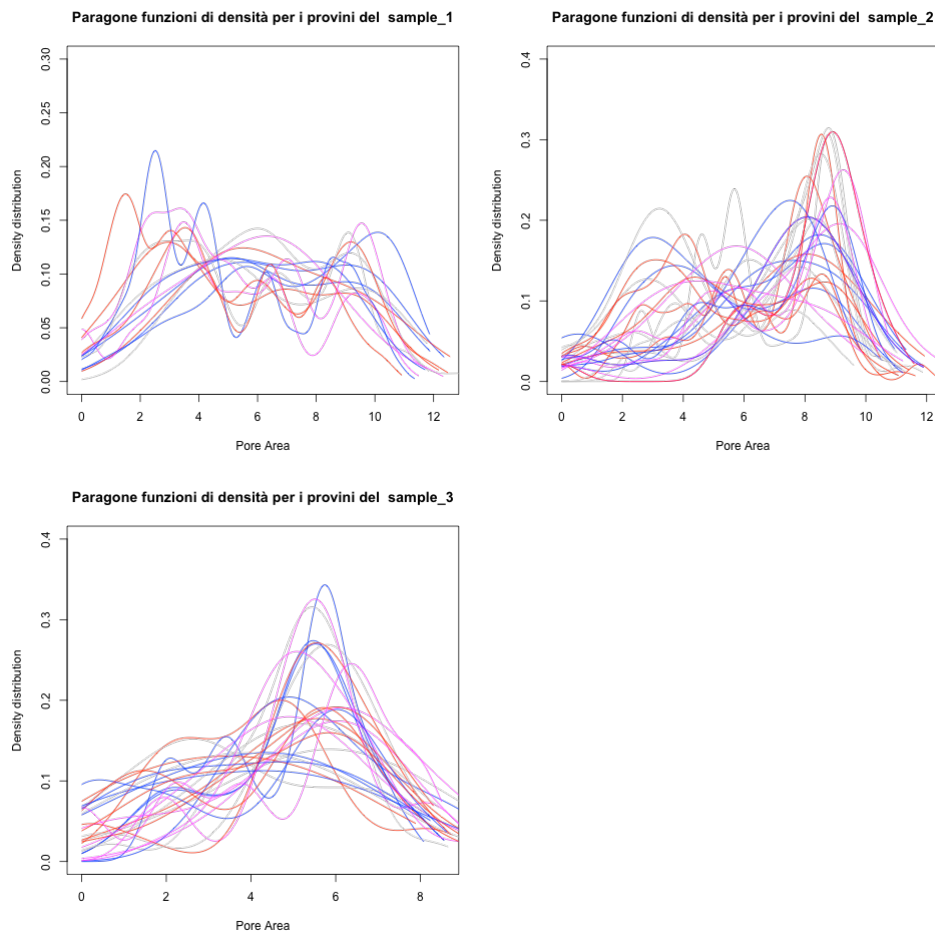


Fig 5.6: funzioni di densità per i valori di area trasformati mediante funzione logaritmica. L'intestazione di ogni grafico indica la schiuma di appartenenza delle funzioni di densità riportate.

Come già precedentemente accennato, da questi grafici è possibile notare una minore asimmetria nelle curve di densità ottenute mediante trasformazione logaritmica. Al proprio interno le schiume sembrano presentare un andamento simile. I provini di sample1 sembrano presentare due tipologie di curve, una costituita da un solo picco e l'altra caratterizzata invece da funzioni più ondulate e meno simmetriche rispetto alla prima famiglia di funzioni. La seconda schiuma presenta invece curve costituite da due picchi, uno a più alta densità, in corrispondenza di elevati valori di $\log(\text{Area})$ e l'altro, costituito da un minor valore di densità, in presenza di più bassi valori dell'area trasformata. Infine, anche per le sezioni di Sample 3 valgono le osservazioni fatte per la prima schiuma: è possibile identificare due diverse tipologie di curve, una più simmetrica e senza picchi né valli, l'altra più variabile.

I valori ottenuti mediante funzione logaritmica sono quindi stati utilizzati per la successiva costruzione di carte di controllo, i cui risultati sono illustrati nel paragrafo successivo.

5.3 Profile monitoring

La creazione del sistema di controllo mediante monitoraggio delle due statistiche di Hotelling e Q per i residui, ha un duplice scopo. Il primo è quello di verificare l'esistenza di eventuali similitudini fra le curve di densità di sezioni appartenenti ad uno stesso sample. Il secondo obiettivo è quello di ottenere uno strumento in grado di verificare la somiglianza o meno del processo produttivo impiegato per le tre diverse schiume metalliche. In altre parole, se i limiti di controllo e il modello PCA ottenuti in Fase I non mostrano punti fuori controllo, si possono ritenere simili le funzioni di densità di ciascuna sezione del sample considerato. Inoltre, se i punti in Fase II risultano essere in controllo, allora si possono ritenere i processi produttivi simili fra loro. Per raggiungere il primo obiettivo, sono state considerate in Fase I le singole sezioni di ciascuna schiuma e, successivamente, le rimanenti sezioni della stessa. Per il secondo scopo, sono invece state utilizzate in Fase I tutte le sezioni appartenenti ad un sample e, per la successiva fase, le sezioni delle rimanenti schiume. Il procedimento impiegato all'interno di ciascuna Fase è qui di seguito riportato.

A seguito dell'analisi PCA svolta sulle tre schiume metalliche, si è deciso di mantenere, per la costruzione delle carte e l'applicazione del modello, quattro componenti principali per ciascuna schiuma. Per tutti e tre i sample, infatti, un tale numero di componenti si è rivelato sufficiente alla spiegazione di più del 90% della variabilità del processo. Per spiegare la restante parte di variabilità, sarebbe stato necessario incorporare un valore doppio di componenti; si è quindi preferito rinunciare ad una parte di descrizione di variabilità per poter mantenere un numero ristretto di componenti principali anche perché, come riportato in [Jac03], non è detto che un ridotto numero di componenti principali comporti una ridotta qualità nell'analisi. Vengono qui riportati i tre barplot che indicano la percentuale cumulata di variabilità dei dati spiegata dalla m-esima componente principale.

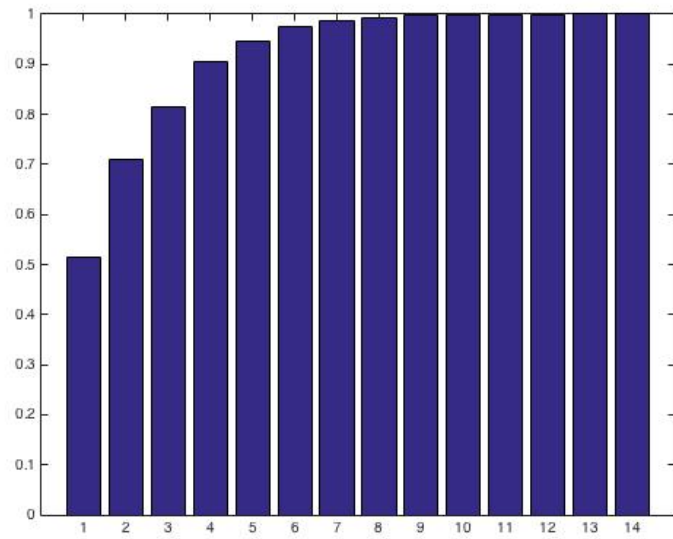


Fig 5.7: Cumulata della percentuale di varianza spiegata dalle componenti principali per sample1.

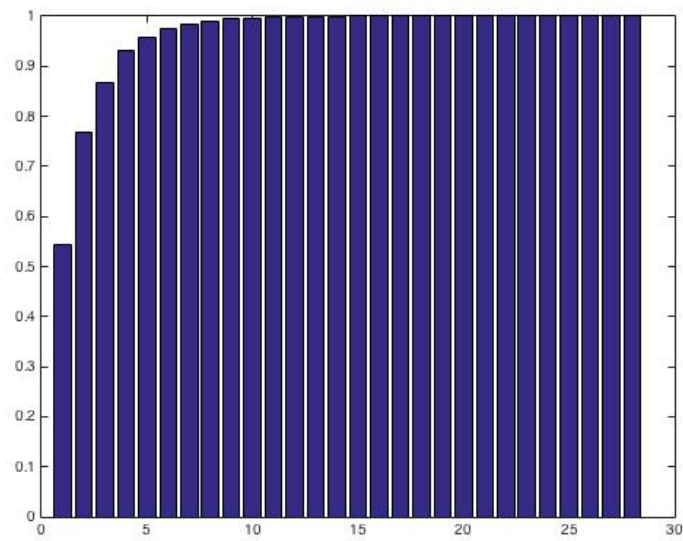


Fig 5.8: Cumulata della percentuale di varianza spiegata dalle componenti principali per sample2.

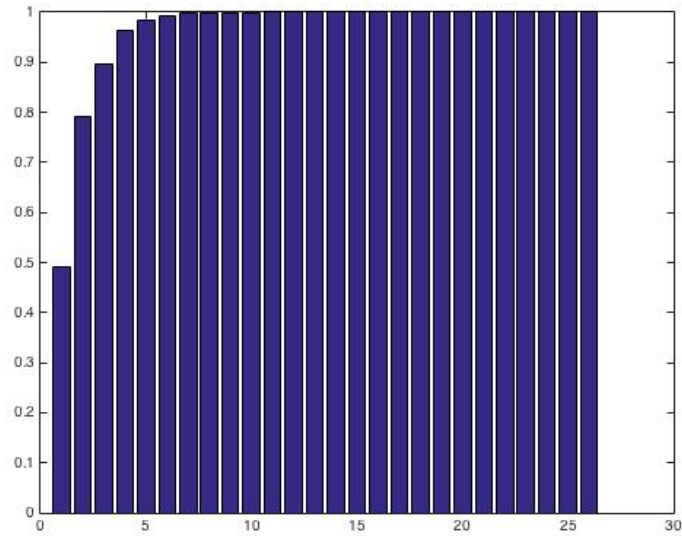


Fig 5.9: cumulata della percentuale di varianza spiegata dalle componenti principali per Sample3

Scelto il numero di componenti principali da mantenere nell'applicazione dell'analisi a componenti principali, sono state costruite le carte di controllo come sopra indicato. Sono qui di seguito riportati i risultati ottenuti impiegando, in Fase I, tutti i dati associati al Sample1. In verde è indicata la media della statistica plottata. Le Fig. 5.10, 5.11 e 5.12 mostrano, rispettivamente, le carte di controllo di Fase I per Sample 1, Sample 2 e Sample 3.

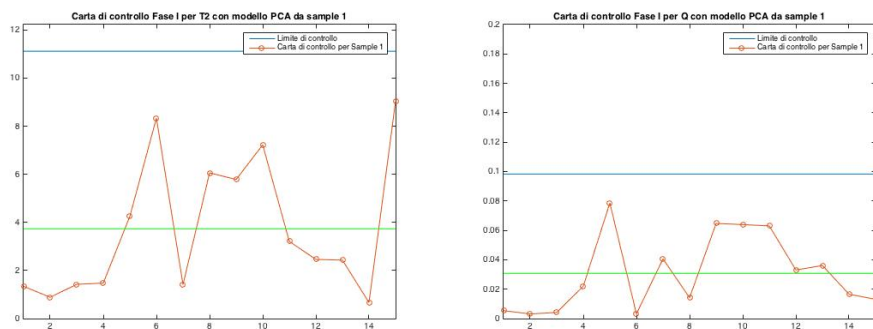


Fig 5.10: Carte di controllo di Fase I (Sample 1)

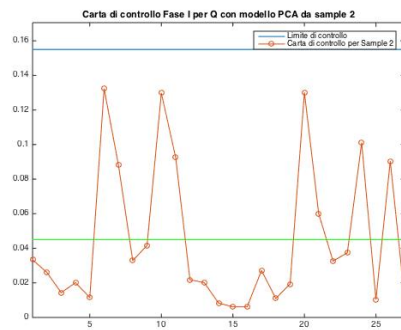
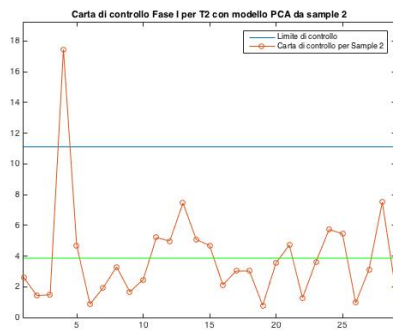


Fig 5.11: Carte di controllo di Fase I (Sample 2)

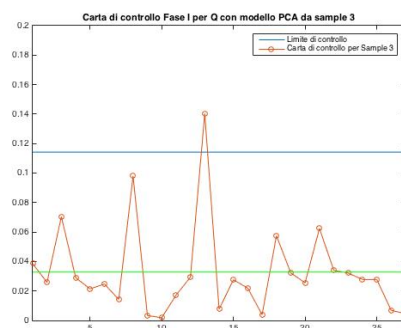
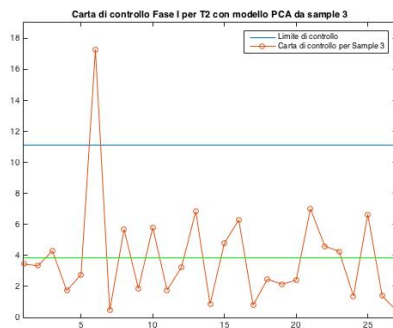


Fig 5.12: Carte di controllo di Fase I (Sample 3)

Per quanto riguarda il Sample 1, la Fase I mostra un sistema in controllo, indice che le sezioni appartenenti alla prima schiuma metallica sono caratterizzate da funzioni di densità per l'area dei pori simili fra loro.

Per quanto riguarda il Sample 2, viene segnalato un profilo di densità fuori controllo, caratterizzato da una funzione di densità particolarmente variabile e costituita da numerosi picchi e valli.

Per quanto riguarda il Sample 3, vengono segnalati due profili di densità fuori controllo. Anche in questo caso, se si paragonano tali funzioni di densità alle altre dello stesso plot, si può notare un loro andamento fortemente variabile.

Nelle figure 5.13 e 5.14 sono riportati i profili corrispondenti ai punti fuori controllo, paragonati ai restanti profili del sample.

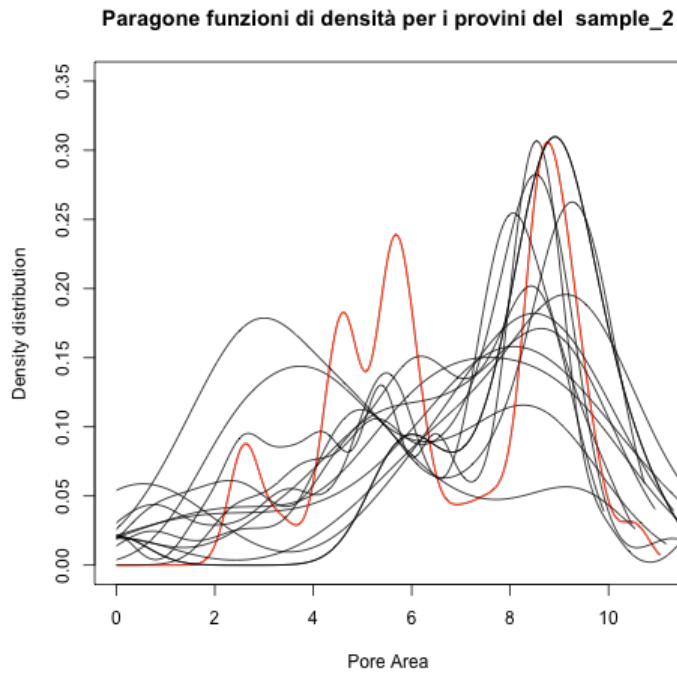


Fig 5.13: profilo della sezione corrispondente al punto fuori controllo in FaseI per Sample2

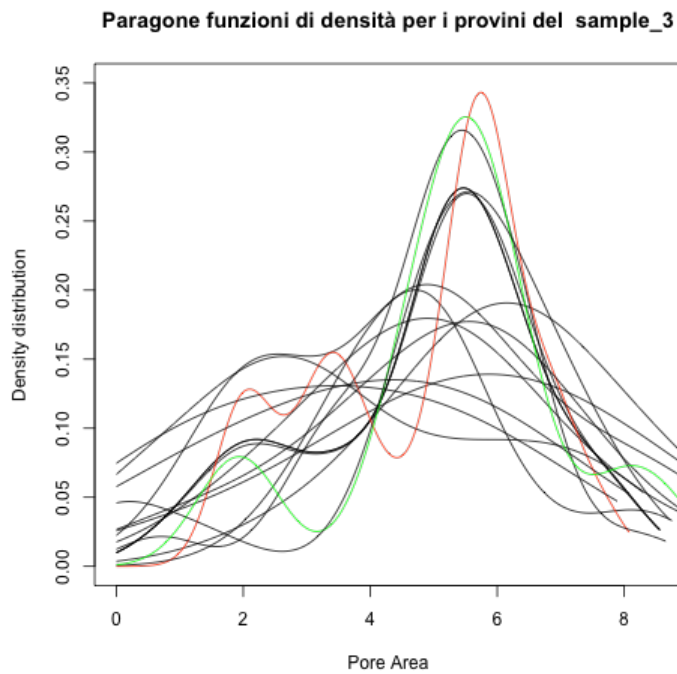


Fig 5.14: profilo della sezione corrispondente al punto fuori controllo in FaseI per Sample2 (in rosso profilo 6, in verde profilo 13)

Può essere infine interessante valutare se le carte di controllo basate su PCA segnalano differenze significative tra campioni di schiuma differenti, differenziando i dataset utilizzati in fase di addestramento (Fase I) e in fase di test (Fase II). Vengono brevemente illustrati i risultati ottenuti utilizzando i dati di un singolo campione per la progettazione della carta e i dati dei restanti due campioni in Fase II.

Le Fig. 5.15 e 5.16 mostrano le carte di controllo addestrate su Sample 1 e applicate in Fase II su Sample 2 e Sample 3.

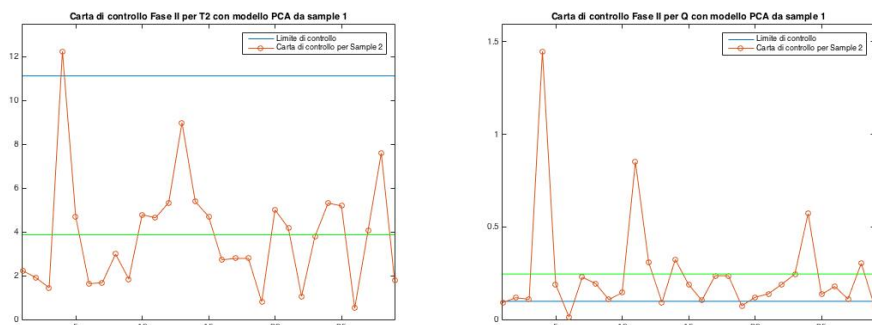


Fig 5.15: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 1 e testing set basato su dati da Sample 2

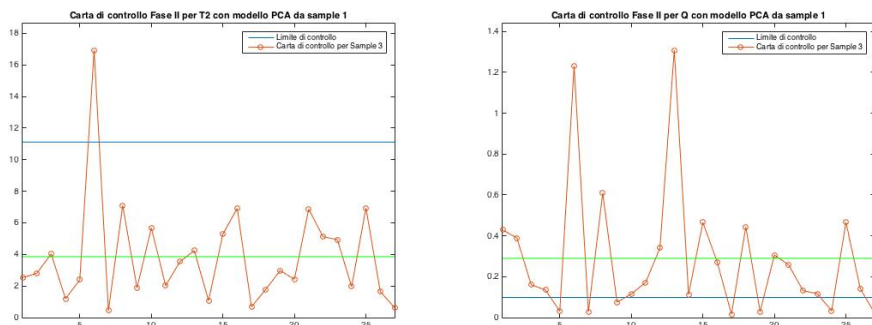


Fig 5.16: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 1 e testing set basato su dati da Sample 3

Le Fig. 5.17 e 5.18 mostrano le carte di controllo addestrate su Sample 2 e applicate in Fase II su Sample 1 e Sample 3.

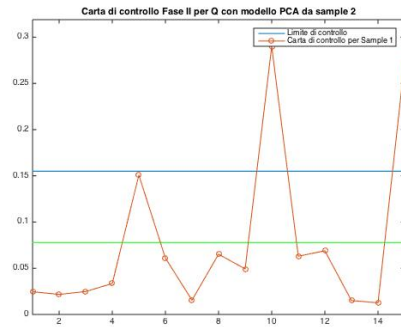
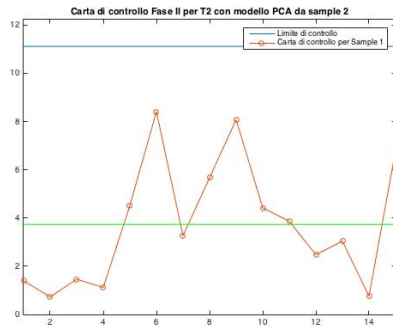


Fig 5.17: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 2 e testing set basato su dati da Sample 1

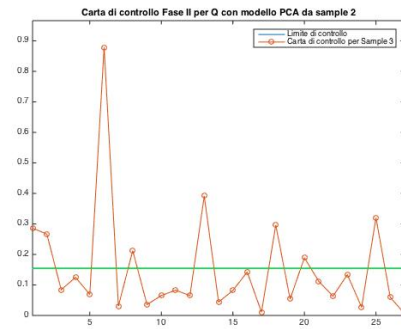
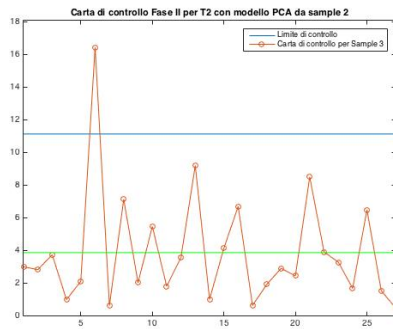


Fig 5.18: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 2 e testing set basato su dati da Sample 3 - Il limite di controllo per la carta Q è prossimo al valore medio delle Q e quindi non visibile

Le Fig. 5.19 e 5.20 mostrano le carte di controllo addestrate su Sample 3 e applicate in Fase II su Sample 1 e Sample 2.

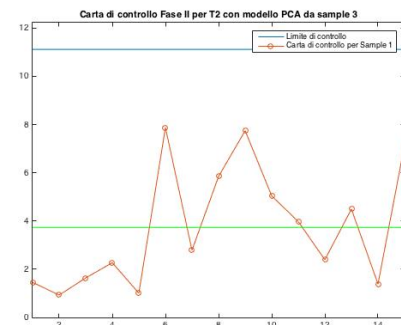
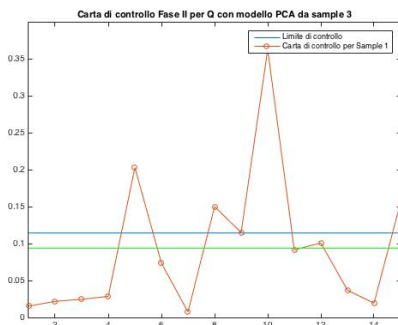


Fig 5.19: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 2 e testing set basato su dati da Sample 1

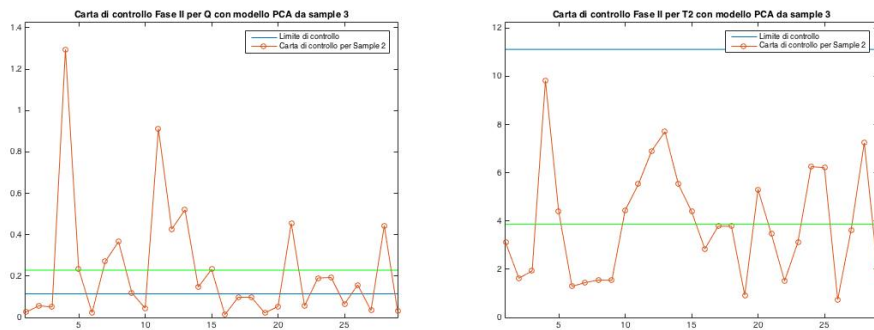


Fig 5.20: Carte di controllo di Fase II: training set basato su dati da Sample 3 e testing set basato su dati da Sample 2

Come ci si aspettava, i tre campioni in schiuma presentano proprietà di porosità diverse che vengono segnalate dalle carte di controllo basate sull'analisi delle componenti principali delle funzioni di densità.

Il metodo proposto rappresenta un primo tentativo di caratterizzare in modo sintetico la porosità di componenti ad elevata porosità, quali le schiume metalliche. Sviluppi futuri sono necessari per approfondire la metodologia e per valutarne l'estendibilità in ambito AM.

Conclusioni

Le tecnologie AM sono state inizialmente proposte per applicazioni di “Rapid Prototyping”, con l’obiettivo di ottenere una rapida produzione di prototipi con elevata precisione e costi e tempi ridotti rispetto alle tecnologie tradizionali. Tuttavia, lo sviluppo tecnologico ha portato ad una elevata versatilità anche in ambiti produttivi per prodotti funzionali e produzioni in serie.

Obiettivo del presente lavoro era di studiare le diverse tipologie di processi AM, le loro applicazioni industriali e le varie problematiche dal punto di vista del controllo della qualità del prodotto finale e delle prestazioni di processo.

Particolare attenzione è stata data alla descrizione dei numerosi processi produttivi che, pur facendo capo alla stessa logica additiva per il processo produttivo, presentano notevoli differenze nei materiali lavorati, nelle metodologie produttive impiegate e nella tipologia di prodotto finito ottenuto.

La letteratura in ambito Additive riguardante il controllo della qualità dei processi di stampa 3D è stata presentata al fine di fornire un quadro delle metodologie più recenti impiegate per la creazione di sistemi di controllo per i processi produttivi; particolarmente promettente, in ambito di lavorazione polveri metalliche, sembra essere il monitoraggio della temperatura della zona di fusione.

I principali metodi di descrizione della porosità di prodotti finiti sono stati presentati insieme alle ricerche dedicate al ruolo che la porosità ricopre all’interno dei processi produttivi di stampa 3D. Tale indagine è stata utile per comprendere l’ambito teorico all’interno del quale ci si è mossi nell’analisi della porosità delle schiume metalliche. Partendo da queste conoscenze, è stata proposta una metodologia per la caratterizzazione e l’eventuale monitoraggio della porosità.

Il metodo proposto si basa sui seguenti passi:

- 1) stima di indicatori sintetici (e.g., area dei pori, rotondità dei pori, etc.) utili a caratterizzare in modo sintetico le proprietà superficiali di una parte che presenta elevata porosità;
- 2) verifica di correlazione spaziale di tali indicatori;
- 3) se si osserva correlazione spaziale statisticamente significativa, può essere adottato un modello che descriva la dipendenza spaziale al fine della caratterizzazione superficiale;
- 4) se non si osserva correlazione spaziale statisticamente significativa, viene proposta la stima della funzione di densità dell’indicatore scelto:

tale funzione può essere infine monitorata mediante tecniche di profile monitoring.

Il metodo proposto è stato applicato e verificato utilizzando campioni di parti cilindriche ottenute per schiumatura di polveri di alluminio, ma è pensato per poter essere esteso a materiali porosi lavorati attraverso processi AM.

Possibili sviluppi futuri potrebbero riguardare l'applicazione della metodologia illustrata a prodotti porosi ottenuti mediante tecnica Selective Laser Melting. Il numero di sezioni a disposizione, ossia di osservazioni utilizzabili per la costruzione delle carte di controllo, pare avere avuto una grande importanza nella bontà del sistema generato; potrebbe quindi essere utile l'impiego di un più elevato numero di provini su cui basare la metodologia presentata.

Bibliografia

- [Abd12]: K. Abd-Elghany, D.L. Bourell, *Property evaluation of 304L stainless steel fabricated by selective laser melting*, Rapid prototyping Journal, 2012.
- [Bay08]: F. Bayle, M. Doubenskaia, *Selective Laser Melting Process monitoring with high speed infra-red camera and pyrometer*, Proceedings of SPIE, 2008
- [Bre12]: S. Bremen, W. Meiners, A. Diatlov, *Selective Laser Melting, a manufacturing technology for the future?*, www.laser-journal.de, 2012
- [Buc11]: D. Buchbinder, H. Schleifenbaum, S. Heidrich, W. Meiners, J. Bültmann, *High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of aluminium parts*, Physics Procedia, 2011
- [Cao94]: R. Cao, A. Cuevas, W. G. Manteiga, *A comparative study of several smoothing methods in density estimation*, Computational Statistics & Data Analysis, 1994.
- [Chi07]: Y. Chivel, I. Smurov, *SLS process monitoring and adaptive control*, Proceedings of the International WLT conference on Lasers in Manufacturing, 2007.
- [Chi10]: Y. Chivel, I. Smurov, *On-line temperature monitoring in selective laser sintering/melting*, Physics Procedia, 2010.
- [Chu11]: M. Chung, A. L. Allanic, *Sintering method and apparatus using thermal image feedback*, EP20040008747, 2011.
- [Col07]: B. M. Colosimo, M. Pacella, *On the use of Principal Component Analysis to identify systematic patterns in roundness profiles*, Quality and reliability engineering international, 2007.
- [Col10]: B. M. Colosimo, M. Pacella, *A comparison study of control charts for statistical monitoring of functional data*, International Journal of Production Research, 2010.
- [Cor04]: D. Cormier, O. Harrysson, H. West, *Characterization of H13 steel produced via electron beam melting*, Rapid Prototyping Journal, 2004.
- [Coy12]: J. Coykendall, M. Cotteleer, J. Holdowsky, M. Mahto, *3D opportunity for aerospace and defense*, Deloitte University Press, 2012.
- [Cra11]: T. Craeghs, S. Clijsters, E. Yasa, J. P. Kruth, *Online quality control of elective Laser Melting*, Solid Freeform Fabrication Symposium, 2011
- [Dav83]: G. J. Davies, S. Zhen, *Metallic foams: their production, properties and applications*, Journal of Materials Science, 1983.

- [Elg02]: A. Elgammal, R. Duraiswami, D. Harwood, L. S. Davis, *Background and foreground modeling using nonpramaetrics kernel density estimation for visual surveillance*, Proceeding of the IEEE, 2002.
- [Far03]: L. Farber, G. Tardos, J. N. Michaels, *Use of X-Ray tomography to study the porosity and morphology of granules*, Powder Technology, 2003
- [Fat14]: M. Fateri, A. Gebhardt, S. Thuemmler, L. Thurn, *Experimental investigation on Selective Laser Melting of glass*, 8th international conference on Photonic technologies, 2014
- [Fer12]: A. Ferrarese, A. Montalto, *Realizzazione di laminati compositi contenenti differenti livelli di porosità e stima della loro influenza sulle prestazioni meccaniche*, Tesi magistrale Politecnico di Milano, 2012.
- [Gar11]: Gartner Hype Cycle for Additive Manufacturing, Gartner Magic Quadrants, 2011.
- [Gat11]: M. Gatto, R. A. Harris, *Non-destructive analysis (NDA) of external and internal structures in 3DP*, Rapid prototyping Journal, 2011.
- [Gib10] I. Gibson, D.W. Rosen, B Stucker, *Additive Manufacturing Technologies, rapid prototyping to direct digital manufacturing*, Springer 2010
- [Grü14]: T. Grünberger, R. Domröse, *Optical In-Process monitoring of Direct Metal Laser Sintering*, www.laser-journal.de, 2014.
- [Him04]: T. Himmer, A. Techel, S. Nowotny, E. Beyer, *Metal laminated tooling, a quick and flexible tooling concept*, Proceeding of the solid freeform fabrication symposium, 2004.
- [Hon98]: H. Sun, M. Koch, *Fractal generation of surface area of porous media*, Stochastic Hydrology and Hydraulics, 1998
- [Hu05]: J. Hu, P. Stroeven, *Local porosity analysis of pore structure in cement paste*, Cement and concrete research, 2005.
- [Hua13]: Q. Huang, J. Zhang, A. Sabbaghi, T. Dasgupta, *Optimal Offline compensation of shape shrinkage for 3D printing processes*, 2013.
- [Hua14]: Q. Huang, H. Nouri, K. Xu, Y. Chen, S. Sosina, T. Dasgupta, *Statistical predictive modeling and compensation of geometric devistions of 3D printed products*, 2014
- [Hul90]: C. W. Hull, *Method for production of three-dimensional objects by stereolithography*, 3D Systems Inc. US Patent 4.929.402, 1990 .
- [Jac03]: J. E. Jackson, *A user's guide to Principal Component*, Wiley, 2003
- [Jon91]: M. C. Jones, R. F. Kappenman, *On a Class of Kernel Density Estimate Bandiwdth Selectors*, Scandinavian Journal of Statistics, 1991.

- [Jon96]: M. C. Jones, J. S. Marron, S. J. Sheather, *A brief survey of Bandwidth Selection for density estimation*, Journal of the American Statistical Association, 1996.
- [Kah01]: F.J. Kahlen, A. Kar, *Tensile strength for laser fabricated parts and similarity parameters for rapid manufacturing*, ASME, 2001.
- [Kem12]: K. Kempen, L. Thijs, J. Van Humbeeck, J. P. Kruth, *Mechanical properties of AlSi20Mg produced by Selective Laser Melting*, Physic Procedia, 2012.
- [Ken12]: A. Kennedy, *Porous Metal and Metal Foams made from powders*, INTECH Open Acces Publisher, 2012.
- [Kho04]: B. Khoshnevis, *Automated Construction by Contour Crafting*, Journal of Automation in Construction, 2004.
- [Kil10]: H. Kile, *Bandwidth Selection in Kernel Density Estimation*, Norwegian University Of Science and Technology, 2010.
- [Kra12]: H. Krauss, C. Eschey, M. F. Zaeh, *Thermography for monitoring the Selective Laser Melting process*, Proceediing of the solid freeform Fabrication Symposium, 2012
- [Kra14]: H. Krauss, T. Zeugner, M. F. Zaeh, *Layerwise monitoring of the selective laser melting process by Thermography*, 8th International Conference on Photonic Technologies, 2014
- [Kru04]: J.P Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, , B. Lauwers, *Selective Laser Melting of iron-based powder*, Journal of material processing technology, 2004
- [Kru05]: J. P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen, M. Rombouts, *Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering anda Selective Laser Melting*, Rapid Prototyping Jorunal, 2005.
- [Kru07]: J. P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, T. Craeghs, *Feedback control of Selective Laser Melting*, Proc of the 3th Int. Conf. On advanced research in virtual and rapid prototyping, 2007.
- [Kru09]: J.P. Kruth, M. Badrossamay, E.Yasa, J. Deckers, L. Thijs, J. Van Humbeeck, *Part and material properties in Selective Laser Melting of metals*, International Symposium of Electromachining, 2009.
- [Kru11]: J. P. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. De Chiffre, A. Weckenmann, *Computed tomography for dimensional metrology*, CIRP Annals manufacturing Technology, 2011.
- [Lian98]: Z. R. Liang, C. P. Fernandes, F. S. Magnani, P. C. Philippi, *A reconstruction technique for three-dimensional porous media using image*

- analysis and Fourier transforms*, Journal of petroleum science and Engineering, 1998.
- [Mar10]: G. Marchelli, D. Storti, M. Ganter, R. Prabhakar, *An introduction to 3D glass printing*, Proceedings of the Annual Solid Freeform Fabrication Symposium, 2010
- [Mar92]: J. S. Marron, M. P. Wand, *Exact Mean Integrated Squared Error*, The annals of statistics, 1992.
- [Mas04]: S. H. Masood, W. Q. Song, *Development of a new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused Deposition Modelling*, Materials&Design, 2004.
- [Mei02]: W. Meiners, C. Over, K. Wissenbach, R. Poprawe, *Direct generation of Metal Parts And Tools by Selective Laser Powder Remelting (SLPR)*, Proceeding of the SME's Rapid Prototyping and Manufacturing Conference, 2002.
- [Min14]: Mingming Ma, Zemin Wang, Ming Gao, Xiaoyan Zeng, *Layer thickness dependence of performance in high-power Selective Laser Melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel*, Journal of materials processing technology, 2014
- [Mon01]: M. Montero, S. Roundy, D. Odell, S. H. Ahn, P. K. Wright, *Material characterization of Fused Deposition Modelling (FDM) ABS by designed experiments*, Proceedings of Rapid Prototyping and Manufacturing conference, 2001.
- [Mon05]: D. C. Montgomery, *Introduction to statistical quality control*, McGraw-Hill, 2005
- [Mor09]: L. Mortara, J. Hughes, P. S. Ramsundar, F. Livesey, D. R Probert, *Proposed classification scheme for direct writing technologies*, Rapid Prototyping Journal, 2009.
- [Mor50]: P. Moran, *Notes on continuous stochastic phenomena*, Biometrika, 1950.
- [Nav12]: G. Navangul, R. Paul, S. Anad, *Error minimization in layered manufacturing parts by stereolithography file modification using a Vertex Translation algorithm*, Journal of manufacturing science and engineering, 2013.
- [Nim04]: J. R. Nimmo, *Porosity and Pore Size Distribution*, Encyclopedia of soils in the environment, 2004
- [Nom95]: P. Nomikos, J. F. MacGregor, *Multivariate SPC charts for monitoring batch processes*, Technometrics, 1995.
- [Pan12]: Y Pan, C. Zhou, Y. Chen, *A fast Mask Projection Stereolithography Process for Fabricating Digital Models in minutes*, Journal of manufacturing

science and engineering, 2012.

[Par90]: B. U. Park, J. S. Marron, *Comparison of data-driven Bandwidth Selectors*, Journal of the American Statistical Association, 1990

[Par92]: B. U. Park, B. A. Turlach, *Practical Performance of several data-driven Bandwidth selectors*, Computational Statistics, 1992.

[Pat11]: D. K. Pattanayak, A. Fukuda, T. Matsushita, M. Takemoto, S. Fujibayashi, K. Sasaki, N. Nishida, T. Nakamura, T. Kokubo, *Bioactive Ti metal analogous to human cancellous bones: fabrication by selective laser melting and chemical treatments*, Acta Biomaterialia Journal, 2011

[Ram05]: J. O. Ramsey, B. W. Silverman, *Functional Data Analysis*, Springer, 2005.

[Sab13] A. Sabbaghi, T. Dasgupta, Q. Huang, J. Zhang, *Inference for deformation and interference in 3D printing*, 2013

[Sac92]: E. Sachs, M. Cima, P. Williams, D. Brancazio, J. Cornie, *Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1992.

[San04]: E.C. Santos, K. Osakada, M. Shiomi, Y. Kitamura, F. Abe, *Microstructure and mechanical properties of pure titanium models fabricated by selective laser melting*, 2004

[San06]: E. C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada, T. Laoui, *Rapid Manufacturing of metal components by laser forming*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006.

[Sch10]: H. Schleifenbaum, W. Meiners, K. Wissenbach, C. Hinke, *Individualized production by means of high power Selective Laser Melting*, Journal of manufacturing science and technology, 2010

[Sch12]: J. Schwerdtfeger, R. F. Singer, C. Cörner, *In situ flaw detection by IR-imaging during electron beam melting*, Rapid Prototyping Journal, 2012

[Sil86]: B. W. Silverman, *Density estimation for statistics and data analysis*, CRC press, 1986

[Tol10]: I. Tolosa, F. Garcianda, F. Zubiri, F. Zapirain, A. Esnaola, *Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by "Selective laser melting", following different manufacturing strategies*, Springer, 2010.

[Van07]: Martin Van Elsen, *Complexity of Selective Laser Melting: a new optimization approach*, 2007.

- [Van91]: B. van Es, *Likelihood Cross-Validation bandwidth selection for nonparametric Kernel Density Estimation*, Journal of Nonparametric statistics, 1991.
- [Vil08]: T. Vilaro, S. Abed, W. Knapp. *Direct manufacturing of technical parts using selective laser melting: example of automotive application*, Proc. of 12th European Forum on Rapid Prototyping. 2008.
- [Wan95]: M. P. Wand, M. C. Jones, *Kernel Smoothing*, Crc Press, 1994
- [Weg11]: A. Wegner, G. Witt, *Process monitoring in laser sintering using thermal imaging*, Proceedings of the Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2011.
- [Woh11]: T. Wohlers, T. Gornet, *History of Additive Manufacturing*, Wohlers Associates, 2011.
- [Xia12]: D. Xiao, Y. Yang, X. Su, D. Wang, *Topology optimization of microstructure and selective laser melting fabrication for metallic biomaterial scaffolds*, Transactions of nonferrous metals society of china, 2012
- [Yad07]: I. Yadroitsev, L. Thivillon, P. Bertrand, I. Smurov, *Strategy of manufacturing components with designed internal structure by Selective Laser Melting of metallic powder*, Applied surface science, 2007.
- [Yad11]: I. Yadroitsev, I. Yadroitsava, P. Bertrand, I. Smurov, *Factor analysis of Selective Laser Melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks*, Rapid Prototyping journal, 2011
- [Yad11b]: I. Yadroitsev, I. Smurov, *Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders*, Physics Procedia, 2011.
- [Yad12]: I. Yadroitsev, I. Yadroitsava, P. Bertrand, I. Smurov, *Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks*, Rapid Prototyping Journal, 2012.
- [Yad13]: I. Yadroitsev, P. Bertrand, G. Antonenkova, S. Grigoriev, I. Smurov, *Use of track/layer morphology to develop functional parts by selective laser melting*, Journal of laser applications, 2013.
- [Yar14]: A. L. Jardini, M. A. Larosa, R. M. Filho, C. A. de Carvalho Zavaglia, L. F. Bernardes, C. S. Lambert, D. R. Calderoni, P. Kharmandayan, *Cranial reconstruction: 3D biomodel and custom-built implant created using additive manufacturing*, 2014.
- [Yas11]: E. Yasa, J. Deckers, J. P. Kruth, *The investigation of the influence of Laser Re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts*, Rapid prototyping Journal, 2011.
- [Yi04]: S. Yi, F. Liu, J. Zhang, S. Xiong, *Study of the key technologies of LOM*

for functional metal parts, Journal of material processing technology, 2004.

[Zuc03]: W. Zucchini, A. Berzel, O. Nenadic, *Applied smoothing techniques, Part I: Kernel Density Estimation*, 2003.