



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**MISURE ATTRAVERSO TECNICHE DI REVERSE ENGINEERING PER IL CONTROLLO
QUALITA' DI PARTI REALIZZATE IN ADDITIVE MANUFACTURING**

**MEASUREMENTS USING REVERSE ENGINEERING TECHNIQUES FOR THE QUALITY
CONTROL OF PRODUCTS MADE IN ADDITIVE MANUFACTURING**

Relatore: Chiar.mo

Prof. Paolo Castellini

Tesi di Laurea di:

Baiocchi Davide

A.A. 2020 / 2021

Non fermatevi là dove siete arrivati.
Pitagora -

Sommario

La nuova frontiera delle tecniche di produzione è la Metal Additive Manufacturing (MAM). Si tratta di una tecnica nata per la prototipazione rapida, dove tramite l'utilizzo di stampanti 3D viene consentita la produzione di componenti per addizione di materiale. Tale tecnologia porta vantaggi in termini di proprietà meccaniche, velocità di realizzazione, geometrie create e minor spreco di materiale. Proprio questi motivi hanno fatto sì che nel tempo tale tecnologia si affiancasse alle moderne tecniche di produzione.

Uno degli aspetti più critici di tale applicazione è sicuramente far rispettare le tolleranze dimensionali. Di fatto, le elevate temperature, i materiali utilizzati e i gradienti termici che si creano all'interno della macchina fanno sì che le parti si ritirino durante le fasi del processo di produzione. La risoluzione di tale problema è solitamente affidata alla compensazione dell'errore tramite sovradimensionamento, quest'ultimo dovrà essere attentamente analizzato al fine di compensare correttamente la differenza dimensionale tra parte nominale e reale.

In questo lavoro di tesi si vuole effettuare un'analisi del ritiro della stampante '*Studio System 1*' della Desktop Metal. Tale analisi propone la valutazione del sovradimensionamento automatico che il software della stampante aggiunge in fase di formatura, e la disamina sulle % di ritiro durante le fasi di lavaggio e sinterizzazione.

I dati sperimentali ricavati sono frutto di un'analisi dimensionale tramite Reverse Engineering, in particolare sono state utilizzate tecniche di controllo non distruttive quali scanner 3D e macchine di misura a coordinate.

I risultati ottenuti per mezzo di simulazioni hanno evidenziato che l'accuratezza dimensionale della "*Studio System 1*" è ottima, di fatto, il sovradimensionamento automatico fornito inizialmente, consente al prodotto finale di scostarsi di poco da quello nominale e quindi di poter rispettare la maggior parte delle applicazioni richiedenti tolleranze dimensionali strette. Allo stesso tempo, tramite il confronto tra componente nominale e componente effettivo, è stato valutato lo Shrinkage Compensation Factor (SCF), di conseguenza si è ricavata un'ulteriore possibilità d'incrementare l'accuratezza complessiva del processo di *Metal Additive Manufacturing*.

Indice

I Additive Manufacturing	10
1 Additive Manufacturing	10
1.1 Problema del Ritiro	11
1.2 Metodi per la valutazione del Ritiro	12
II Analisi del Ritiro	13
2 Reverse Engineering	13
3 Macchina di Misure a Coordinate	15
4 Scanner 3D	17
III Materiali e Metodi	18
5 Stampante	18
5.1 Caratteristiche Macchina	19
5.2 Processo di Produzione:	19
5.3 Componenti stampati	20
5.4 Parametri di Stampa	20
6 Scanner 3D	21
6.1 Specifiche Tecniche	21
6.2 Scansione	21
6.3 Misurazione	23
7 Coordinate Measuring Machine	24
7.1 Specifiche Tecniche	24
7.2 Misurazione	24
IV Misure ed Elaborazioni dei Dati	26
8 Chiver	26
8.1 Quote	26
8.2 Risultati	27
9 Componente dalla Geometria Semplice	29
9.1 Quote	29
9.2 Risultati	30
10 Incertezza	31

Introduzione

La quarta rivoluzione industriale identifica una nuova era in cui le industrie, spinte dalla necessità di competere in un mercato divenuto globale, trovano nell'innovazione tecnologica la risposta per rimanere efficienti, per migliorare organizzazione e qualità del lavoro e per ridurre i costi di produzione.

L'*Industry 4.0* è basata sullo sviluppo di tecnologie dall'automazione intelligente, in particolare, la produzione additiva è considerata un ingrediente essenziale in questo nuovo movimento, e nel corso degli anni il suo utilizzo si è allargato sempre di più, fino ad affiancarsi alle comuni tecniche di produzione.

Ad offrire una definizione “universale” di cos'è la produzione additiva è la norma¹ di recente pubblicazione, che la descrive come:

“Quei processi che aggregano materiali al fine di creare oggetti partendo dai loro modelli matematici tridimensionali, solitamente per sovrapposizione di layer e procedendo in maniera opposta a quanto avviene nei processi sottrattivi”

L'AM nell'industria 4.0 è diventata uno degli elementi centrali, infatti, le sue caratteristiche si sposano bene con le necessità della nuova rivoluzione industriale che vede nella trasformazione digitale, nella personalizzazione di massa, nel miglioramento della qualità e del time to market, leve di importante spessore [6].

I vantaggi offerti dall'*additive manufacturing* sono numerosi, tra questi aspetti vi sono sicuramente fattori legati al minore impatto ambientale, ma anche alla maggiore sicurezza che questi nuovi sistemi forniscono rispetto i precedenti metodi di produzione. Gli aspetti fondamentali di tale tecnologia risultano però essere la geometria e le proprietà meccaniche ottenibili: di fatto i pezzi prodotti hanno proprietà strutturali paragonabili a quelle di componenti realizzati con le tipiche tecniche di produzione, inoltre, le geometrie create, spesso sarebbero impossibili da produrre con i metodi di lavorazione tradizionali.

Proprio questi vantaggi hanno portato nel tempo a far sì che l'*additive manufacturing* non venga più considerata come una semplice tecnica di prototipazione rapida, ma una vera e propria tecnica di produzione che si va ad affiancare alle tecniche formative e sottrattive. Tale passaggio è inoltre dovuto al fatto che, rispetto il passato, dove i materiali sviluppati erano in gran parte termoplastici e polimerici, negli ultimi anni, anche grazie alle loro

¹ISO/ASTM 52900:2015(E)

proprietà meccaniche vantaggiose, e all'elevato interesse ingegneristico, l'attenzione e gli studi si sono spostati verso materiali metallici.

L'industria della stampa 3D attualmente cerca nuove soluzioni per creare parti metalliche che possano sostituire le controparti prodotte con processi convenzionali. I nuovi sviluppi nella tecnologia danno origine al campo di ricerca sul *Metal Additive Manufacturing* (MAM).

D'altra parte, i componenti fabbricati non hanno ancora soddisfatto le aspettative del settore. Alcuni problemi includono costo elevato dei sistemi, bassa velocità di produzione su larga scala, scarsa finitura superficiale e il fatto che a seconda dei metalli e delle tecniche utilizzate, si possano ottenere proprietà meccaniche elevatissime, così come parti non adeguate, con microstruttura eterogenea e caratteristiche anisotrope [7].

Uno dei limiti principali nella *metal additive manufacturing* risulta però essere il problema legato al ritiro della parte, di fatto i gradienti termici che si creano durante il processo di stampa portano al restringimento del componente, quindi ad una scarsa accuratezza dimensionale del processo.

Nel tempo si è cercato di risolvere il problema sovradimensionando il componente mandato in stampa in relazione al materiale e alla geometria della parte. Nonostante questa procedura abbia notevolmente migliorato l'accuratezza dimensionale, per via di fattori non determinabili a priori, il problema del ritiro non è stato del tutto eliminato. Di questo ne risentono applicazioni che necessitano tolleranze dimensionali molto strette, e il non rispettare di queste condizioni potrebbe portare a problematiche di accoppiamento e assemblaggio delle parti.

L'elaborato è volto ad analizzare, il ritiro dimensionale nella stampante FDM "Studio System 1" della Desktop Metal.

Tale sistema prevede automaticamente in fase di stampa un sovradimensionamento di circa il 15-20% delle dimensioni iniziali. Non essendo sempre sufficiente questo primo sovradimensionamento ad avere tolleranze strette e il perfetto controllo sul restringimento della parte, verrà svolta un'analisi al fine effettuare la taratura della stampante.

Tramite la taratura, verrà determinato lo **Shrinkage Compensation Factor (SCF)**, ovvero quel fattore di compensazione che permette di ridurre al minimo il ritiro, tenendo conto di quelle condizioni ambientali e di lavoro non determinabili a priori, ma che hanno influenza sul restringimento del componente.

Al fine dell'analisi delle varie fasi di ritiro, vengono utilizzati due percorsi in parallelo: da un lato verrà stampato un collo di un sassofono (chiver), tale componente rispecchia una geometria generica, e da questa geometria, tramite l'utilizzo di uno scanner 3D e del sistema Go!Scan verranno approssimativamente determinate le % di ritiro durante le diverse fasi di formatura, debinding e sinterizzazione. Questi dati serviranno poi ad ottenere l'SCF della stampante e una valutazione generica del sovradimensionamento che il sistema dà al componente in fase di formatura.

Dall'altro lato avendo lo scanner 3D dei limiti in termini di risoluzione e non essendo il chiver un elemento facile da analizzare per definire il meccanismo di sovradimensionamento, si è stampata una geometria apposita, presa in analogia con [1], per avere una chiara visione sul processo di sovradimensionamento automatico e per ottenere una maggior risoluzione grazie all'utilizzo di una macchina di misura a coordinate (CMM).

Per effettuare le misure sui componenti, sono state quindi utilizzate tecniche di **Reverse Engineering**, tali sistemi permettono di avere una maggior precisione nell'ispezione e un più ampio controllo sulle geometrie analizzate soprattutto nel caso di confronto tra componenti simili.

Il lavoro si articola in 4 capitoli. Sono brevemente descritti nel seguito:

Il **Capitolo 1 - Additive Manufacturing** è una breve introduzione sul *Additive Manufacturing* e la tecnologia di stampa utilizzata dalla "*Studio System 1*".

Il **Capitolo 2 - Reverse Engineering** è interamente dedicato alla descrizione del processo di *Reverse Engineering* e la tecnologie utilizzate nel lavoro, quali Scanner 3D e CMM.

Il **Capitolo 3 - Materiali e Metodi** descrive nello specifico i materiali ed i metodi utilizzati, quindi le caratteristiche di *Studio System 1*, *Go!Scan 3D* e *Contura*.

Il **Capitolo 4 - Misure ed Elaborazioni Dati** è dedicato alle misure ed all'analisi dei dati ottenuti, in particolare, verranno elaborati i dati sperimentali acquisiti, estrapolando le diverse % nelle varie fasi, in modo da trarre conclusioni sull'accuratezza del processo di Metal Additive Manufacturing.

Parte I

Additive Manufacturing

1 Additive Manufacturing

L'*additive manufacturing* (AM) è il processo di produzione additiva di una parte, basato sulla realizzazione di modelli fisici attraverso la deposizione di materiale in *layer*. Nasce come evoluzione dei metodi di prototipazione, velocizzando e ottimizzando un processo realizzato in modo quasi del tutto manuale (*rapid prototyping*). Tali tecnologie sono state applicate con successo anche in diversi settori industriali per la produzione di oggetti e attrezzature come componenti per il settore automotive, per la strumentazione da laboratorio etc.

Negli ultimi anni si è aperta una nuova frontiera di utilizzo dell'AM: la *rapid manufacturing*, ovvero la produzione di componenti/prodotti destinati a uso diretto. L'AM è destinato ad affiancare le più comuni tecniche di fabbricazione industriale e si prevede un utilizzo sempre più pervasivo e conveniente, con tempi di processo sempre più bassi.

L'introduzione della produzione additiva porta ad una serie di vantaggi, quali:

- velocità di realizzazione: di fatto non servono nuove catene di produzione o macchinari, si passa direttamente dal CAD alla macchina;
- minor costi di produzione e manutenzione;
- ottimizzazione topologica della parte, consentendo la realizzazione di geometrie molto complesse;
- ispezione e correzione in breve tempo dei difetti geometrici, e delle proprietà del materiale;
- minor impatto ecologico;

Al contrario, sorgono delle limitazioni come l'incapacità di produrre parti con proprietà del materiale equivalenti a quelle realizzate tramite sottrazione o tecniche formative; infatti, la maggior parte delle tecnologie di stampa tridimensionale produce parti che sono intrinsecamente anisotrope o non completamente dense; vengono inoltre riscontrate limitazioni sulla ripetibilità, il che significa che le parti spesso avranno lievi variazioni dimensionali dovute al raffreddamento differenziale o alla deformazione durante la polimerizzazione.

La sfida più importante per qualsiasi industria manifatturiera è mantenere l'accuratezza dei prototipi prodotti dalla tecnologia AM.

1.1 Problema del Ritiro

Le parti realizzate tramite la produzione additiva, per via del restringimento del componente, presentano cambiamenti dimensionali rispetto le dimensioni di progetto, ciò può creare difficoltà durante il processo di assemblaggio a causa della scarsa precisione della tecnologia.

Il ritiro dimensionale della parte, si verifica a causa dei gradienti termici che si creano nella macchina e dipenderà essenzialmente da:

- Materiale utilizzato
- Geometria
- Orientamento della parte durante la deposizione di materiale

Un ulteriore potenziale fattore di influenza dimensionale è rappresentato dal livello teorico di riempimento, tuttavia, le recenti pubblicazioni sull'argomento [3] hanno dimostrato che le *percentuali di ritiro rimangono costanti al variare delle percentuali di riempimento teoriche*.

Ciò significa che al modificare dei livelli di densità e del tipo di *infill* (riempimento) settato, il restringimento non varia, e di conseguenza viene omessa dall'analisi la dipendenza dal tipo di riempimento della struttura.

Ritiro nelle Stampanti FDM: Nelle stampanti FDM (Fused Deposition Modeling) la tecnologia stessa impiegata presuppone notevoli variazioni di temperatura del materiale utilizzato.

I gradienti termici che si creano nel processo di stampa sono legati in particolar modo alle fasi di deposizione e di sinterizzazione: mentre nella fase di deposizione tramite opportuni accorgimenti, come il piano di estrusione riscaldato o l'utilizzo di macchine chiuse, è possibile controllare la temperatura e ridurre al minimo i gradienti termici; nella fase di sinterizzazione questo è impossibile da evitare, di conseguenza, *seppur minimo il ritiro sarà sempre presente*.

Attualmente le comuni tecnologie di stampa garantiscono la valutazione del ritiro automaticamente, ciò determina che il modello mandato in stampa avrà dimensioni maggiorate rispetto quelle nominali, in questo modo, una volta completato il processo, si presuppone che la parte ottenuta si avvicini il più possibile dimensionalmente a quella desiderata.

Tuttavia, prevedere il ritiro con casistiche generali non è sempre possibile, infatti questo sarà strettamente legato al tipo di materiale utilizzato, alla disposizione della parte, alla temperatura di stampa e alle condizioni ambientali di lavoro [1-2].

1.2 Metodi per la valutazione del Ritiro

Qualora sia richiesta una maggior accuratezza dimensionale, non è quindi possibile procedere unicamente valutando il ritiro in modo generico e indipendentemente dalle condizioni di lavoro.

Per questo attualmente vengono adottate delle procedure di taratura della stampante, al fine di determinare lo ***Shrinkage Compensation Factor (SCF)***, ovvero *quel valore per cui, moltiplicato per i valori nominali del componente, otterrò un minor errore dimensionale nel prodotto stampato, migliorando quindi l'accuratezza rispetto le impostazioni generali.*

Ciò significa che la parte stampata terrà considerazione del sovradimensionamento dovuto ad una valutazione generica del ritiro (quella del software) più il sovradimensionamento (o sottodimensionamento) dovuto ad una valutazione più dettagliata e legata alle condizioni di stampa.

Le attuali tecniche utilizzate per valutare il ritiro sono basate sulla ***compensazione dell'errore***, quindi sul confronto tra la misura sperimentale di particolari feature del componente stampato e la misura delle stesse feature nel CAD (quindi considerate nominali).

Grazie a questo confronto vengono ricavati i valori caratterizzanti la retta di taratura della stampante e di seguito ricavato l'SCF lungo le direzioni scelte.

La prova molto spesso viene lasciata all'utente, consentendo ad esso di scegliere il componente, le feature e come procedere poi per il sovradimensionamento [1,2].

Molte aziende invece, consentono all'utilizzatore di effettuare una taratura standardizzata: in particolare, nel caso del 3D Systems, Inc, l'analisi del ritiro partirà dal test CHRISTMAS-TREE™; l'impresa produttrice fornirà all'utente il file CAD della parte normata e le feature sulle quali effettuare la misura; infine, i dati ricavati dovranno essere semplicemente caricati in un programma dedicato, che si occuperà autonomamente di sovradimensionare il componente mandato in stampa, basandosi sulla taratura effettuata [3].

Nel caso in questione, la valutazione dell'accuratezza della "Studio System 1" verrà fatta tramite due approcci in parallelo: da un lato verrà presa una geometria generica, come quella di un ***chiver*** (collo del sassofono), al fine di stimare un andamento generico del ritiro durante le fasi di produzione e di avere informazioni sul sovradimensionamento iniziale; dall'altro lato non essendo adatta questa geometria a ricavare con precisione il meccanismo di sovradimensionamento e volendo una accuratezza maggiore nei risultati, si utilizzerà una ***geometria apposita*** [1], con caratteristiche semplici che permetterà di avere maggiori informazioni sul meccanismo di sovradimensionamento.

Parte II

Analisi del Ritiro

L'analisi del ritiro può essere fatta utilizzando i classici strumenti di misura, ma per una valutazione più precisa dell'accuratezza dimensionale si utilizzeranno tecniche di reverse engineering per effettuare direttamente la misura sul modello ricostruito.

2 Reverse Engineering

Il *reverse engineering* (ingegneria inversa) è un processo che, tramite una scansione 3D e la conseguente elaborazione da parte di un software CAD, permette di digitalizzare un oggetto fisico. Tramite questo processo è possibile replicare o modificare tale oggetto, ma anche realizzare un nuovo prodotto che si interfacci con esso. [4] Chikofsky e Cross lo definirono come:

“Il processo di analisi di un sistema soggetto per identificare i componenti del sistema e le loro interrelazioni, al fine di creare rappresentazioni del sistema in un'altra forma o ad un livello più alto di astrazione”

Il processo di Reverse Engineering si compone principalmente di due fasi:

1. **Acquisizione:**

- (a) L'oggetto viene digitalizzato mediante scansione tridimensionale così da ottenere un insieme di punti chiamato *“nuvola di punti”*.
- (b) Per essere visualizzata sui software dedicati, questa viene rappresentata da una serie di poligoni che collegano fra loro i punti realizzando così la *“mesh poligonale”*. Maggiore è la densità dei punti rilevati, migliore risulterà l'approssimazione della *“mesh”*.

La digitalizzazione dell'oggetto fisico può essere fatta tramite dispositivi di scansione senza contatto (Scanner Ottici) o dispositivi di misurazione per contatto (CMM - Coordinate Measuring Machine). Questa fase di digitalizzazione del prodotto viene utilizzata per integrare le proprietà dei materiali, dei processi di produzione e la loro variabilità intrinseca.

2. **Trasformazione:** La nuvola di punti viene rielaborata approssimando geometricamente e razionalmente la *“mesh”* di partenza.

Il criterio principale per il processo di ricostruzione è assicurarsi che la topologia originale dell'oggetto venga preservata, così che le caratteristiche nitide e i confini della superficie possano essere riprodotti accuratamente.

Nella fase di trasformazione l'eventuale presenza di “rumori di fondo”, buchi o distorsioni, può pregiudicare la precisione del risultato. Per tale motivo, prima di procedere con la trasformazione, è importante ridurre le diverse imperfezioni che non corrispondono ad una caratteristica dell'oggetto, ma ad errori di acquisizione.

Nella letteratura scientifica sono molti gli approcci per l'implementazione del Reverse Engineering, la maggior parte di questi prevede l'analisi di nuvole di punti acquisite attraverso la misurazione delle coordinate geometriche della parte. Nella stragrande maggioranza dei casi, il software del dispositivo utilizzato implementa automaticamente il processo di reverse, acquisendo e rielaborando in modo autonomo la nuvola di punti ricostruita, fornendo all'utente direttamente il modello sul quale lavorare.

Lo sviluppo dell'ingegneria inversa avviene solitamente tramite dispositivi come macchine di misura a coordinate (CMM), scanner ottici o sistemi interferometrici.

Tra i macchinari più utilizzati, la tomografia computerizzata, seppur recente in ambito industriale, ha preso velocemente campo, e in poco tempo è risultata essere tra le tecniche più vantaggiose dal punto di vista del processo di Reverse Engineering. Tale tecnologia però paga in termini di costo e di tempi, inoltre, per effettuare misure è quasi sempre necessario un programma esterno.

Molto spesso, quando l'obiettivo è implementare il Reverse Engineering per effettuare misure sulla superficie del pezzo, si utilizzano più frequentemente dispositivi come **scanner ottici** o **macchine di misure a coordinate**, dove si ha una maggior velocità nella digitalizzazione e nell'elaborazione dati. Queste tecnologie pagano però in termini di possibilità di analizzare i difetti interni e le feature più nascoste, oltre che, al contrario di quanto accade per la CT, non vi è possibilità di acquisire informazioni riguardo le proprietà del materiale della parte posta in analisi.

Nell'analisi svolta, sono state appunto utilizzate un sistema di **misure a coordinate (CMM)** e uno **scanner 3D**, sono stati scelti questi sistemi data la loro flessibilità, facilità di utilizzo e di elaborazione dati soprattutto dal momento in cui non vi era necessità di ricavare informazioni sulla microstruttura interna dei componenti.

3 Macchina di Misure a Coordinate

Una macchina di misura a coordinate è un dispositivo meccanico per misurare dimensionali, basato sulla movimentazione di una sonda che permette di determinare le coordinate spaziali di punti appartenenti alle superfici di un pezzo in un determinato spazio di lavoro. Dai punti ricavati si risale all'andamento delle superfici del pezzo posto in analisi.

Le CMM (Coordinate Measuring Machine) sono tipicamente applicate per il controllo di qualità e per il reverse engineering.

Esistono diverse tipologie di macchine di misura a coordinate che si differiscono per come viene gestita la movimentazione degli assi e con quali dispositivi vengono effettuate le misure, in ogni caso tali sistemi sono generalmente costituiti da:

- Struttura Meccanica (A)
- Sensori di Ispezione (B)
- Basamento (C)
- Sensori di Controllo Elettronico (D)

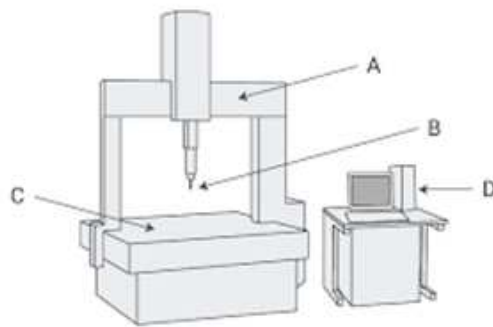


Figura 1: CMM - Coordinate Measuring Machine

La macchina deve garantire l'insensibilità ai disturbi esterni ed essere in grado di lavorare in diverse condizioni ambientali (spesso vengono posizionate in ambienti controllati), ne deriva la scelta, di realizzare la struttura in materiali che garantiscano: elevate rigidità statica per ridurre al minimo i movimenti involontari tra macchina e componente, insensibilità alle vibrazioni meccaniche, buono smorzamento, stabilità a lungo termine e stabilità termica. Tradizionalmente vengono sfruttati materiali come la ghisa, granito e ceramica.

A seconda delle caratteristiche della macchina e della finalità della misurazione si possono utilizzare diverse tipologie di sensori di ispezione, in particolare si distinguono dispositivi di acquisizione a "contatto" e "non a contatto".

In ogni caso, indipendentemente dalla tecnologia utilizzata, tali sistemi rilevano un particolare punto sulla parte, il sistema campionerà le coordinate individuate e andrà a digitalizzare quella particolare caratteristica.

La finalità dell'acquisizione è duplice, da un lato i singoli punti possono essere utilizzati per la verifica delle tolleranze di parti o assiemi, dall'altro lato il processo ripetitivo di acquisizione porta alla formazione di una "nuvola di punti", utile poi per la ricostruzione della parte e per ottenere la digitalizzazione del componente tramite opportuni algoritmi di regressione.

Molto importante risulta essere la strategia di misura, ovvero la definizione iniziale della sequenza di punti da campionare, i riferimenti primari e il modo in cui il tastatore si deve muovere per raggiungere le feature. Di fatto, al variare della forma del componente, e di ciò che vogliamo ottenere, la strategia di misura cambierà, così come il posizionamento del componente nel macchinario.

4 Scanner 3D

La scansione 3D è un processo grazie al quale è possibile ottenere la digitalizzazione in tre dimensioni della superficie esterna di un componente: tramite questa è possibile fare misure molto accurate sull'oggetto oppure procedere con il processo di Reverse Engineering per ottenere il CAD della parte.

Le tecnologie di scansione 3D si basano su diversi principi fisici, in particolare si distinguono tecnologie più adatte per la scansione a breve raggio e quelle maggiormente adeguate alla scansione per medie o lunghe distanza. Di nostro interesse, in questo momento sono gli scanner a corto raggio, ovvero quella categoria di dispositivi che permettono la digitalizzazione del componente data una distanza molto ravvicinata.

Gli Scanner 3D a corto raggio hanno il vantaggio di consentire una scansione molto accurata, ad elevata risoluzione e rapida, inoltre sono spesso portatili; hanno lo svantaggio però di essere molto sensibili al tipo di illuminazione dell'ambiente di lavoro e non hanno una buona risposta con superfici non cooperative, tanto da necessitare spesso di un trattamento opacizzante sulla superficie del pezzo. Questi dispositivi lavorano principalmente con due tecnologie:

- Scanner a triangolazione laser;
- Scanner a luce strutturata:

Tale elaborato, per implementare il processo di Reverse Engineering sul collo del sassofono prevede l'utilizzo di scanner a luce strutturata.

Gli scanner a luce strutturata utilizzano la triangolazione trigonometrica al fine di determinare le coordinate della superficie posta in scansione; per far questo viene proiettato uno schema luminoso (solitamente pattern di linee parallele o matrice di punti randomizzata) direttamente sull'oggetto, la deformazione indotta dalla superficie viene acquisita tramite una telecamera e sfruttata per il calcolo e la ricostruzione delle coordinate tridimensionali.

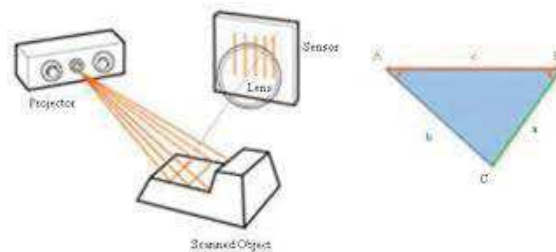


Figura 2: Scanner a luce strutturata

Parte III

Materiali e Metodi

Il lavoro viene svolto essenzialmente in 3 passaggi: la prima fase è quella di produzione del componente tramite la stampante 3D, segue la parte dedicata al Reverse Engineering dove il chiver verrà digitalizzato tramite l'utilizzo dello scanner 3D, mentre tramite la macchina di misure a coordinate verranno campionati dei punti della parte dalla geometria semplice.

La fase finale è quella di misura ed elaborazione dei dati, in particolare i rispettivi software di scanner e CMM permetteranno di effettuare le misure direttamente al loro interno, per poi elaborare i vari dati ottenuti tramite un programma Excel e ottenere così i dati sul ritiro durante la varie fasi.

5 Stampante

La produzione del componente posto in analisi è stata eseguita in additive manufacturing tramite la stampante “*Studio System 1*” prodotta dalla Desktop Metal. Tale sistema sfrutta una tecnologia di tipo **FDM** (Fused Deposition Modeling) che fa parte della categoria *material extrusion*. Il sistema è composto essenzialmente da tre elementi:

- Stampante;
- Debinder;
- Sinterizzatore;

Il principio di funzionamento sfruttato da questa tecnologia è l'estrusione, dove un materiale malleabile in uno stato semi solido viene depositato, attraverso l'ugello di un estrusore, su uno strato di materiale sottostante depositato in precedenza e già solidificatosi. La deposizione e l'indurimento progressivo degli strati consente la realizzazione dell'oggetto dal basso verso l'alto.

Le parti ottenute sono paragonabili a quanto ottenuto con fusione, quindi elementi in metallo ad altissima densità, pronti per essere definiti o lavorati meccanicamente. A fronte di ottime proprietà chimiche e meccaniche, la finitura superficiale dei prodotti realizzati con questa tecnologia appare grezza, solitamente la superficie viene migliorata con procedimenti di sabbiatura, abrasione chimica o verniciatura.

Nella “*Studio System 1*” non vengono utilizzati filamenti di materiale, ma stick composti da polvere di metallo e specifico collante. Grazie a questa tecnologia, rispetto i metodi tradizionali di produzione additiva dei metalli,

viene velocizzato il processo di stampa e ottimizzata la facilità di realizzazione di parti metalliche, non necessitando più di tecnici specializzati, tanto da definire la “Desktop Metal – Studio System 1” come “*stampante da ufficio*”.

5.1 Caratteristiche Macchina

La velocità massima di costruzione della *Studio System* è di $16 \text{ cm}^3/\text{h}$.

La velocità media di stampa (comprensiva di accelerazione e decelerazione, interruptori della testina di stampa, etc.) è di circa $6 \text{ cm}^3/\text{h}$ durante la stampa con il profilo di stampa "standard" a $150 \mu\text{m}$ di altezza dello strato.

Il software *Fabricate Desktop Metal* genera automaticamente le strutture di supporto necessarie per stabilizzare la parte sia durante la stampa che durante la sinterizzazione. Il software crea anche automaticamente uno strato di rilascio in ceramica tra la parte e i suoi supporti, entrambi stampati in metallo. Lo strato di rilascio ceramico viene depositato con una seconda testina di stampa durante la stampa e consente la fabbricazione di geometrie complesse e assiemi multicomponente in quanto resiste alla sinterizzazione nel forno, consentendo una facile separazione manuale della parte dai suoi supporti dopo la sinterizzazione.

5.2 Processo di Produzione:

1. **Stampa:** il materiale estruso si deposita strato su strato partendo dal piano di lavoro fino al completamento della geometria.
2. **Debinder,** l'unità di lavaggio rimuove il materiale polimerico che funge da collante primario nello stampato, l'operazione avviene attraverso l'immersione in un fluido proprietario. Tale passaggio permette di preparare le parti alla successiva sinterizzazione in fornace.
3. **Sinterizzazione** delle polveri metalliche: l'oggetto viene trattato ad alte temperature fino alla realizzazione dell'oggetto finito all'interno di un forno capace di raggiungere una temperatura massima di 1400° . Desktop Metal assicura una distribuzione uniforme delle temperature sui prototipi sia in fase di riscaldamento sia di raffreddamento.

Il ritiro si verifica in particolar modo durante la fase di sinterizzazione e dipende dal materiale. Detto questo, indipendentemente dal materiale, le indicazioni della casa produttrice dicono che le parti dovrebbero in genere ridursi di dimensioni di circa il 15/20%. Il restringimento è relativamente uniforme, con un leggero ritiro maggiore nella direzione z (come stampato).

5.3 Componenti stampati

Le parti mandate in stampa sono 2: la prima ha una geometria semplice, presa in analogia con [1] per effettuare poi un confronto tra SCF con diversi materiali, e realizzata in modo tale da poter determinare un andamento generico su feature di natura diversa. Il secondo componente realizzato è un chiver (collo di un sassofono), tale parte servirà per valutare in modo generico il sovradimensionamento automatico fornito dal software e per osservare il ritiro nelle fasi di formatura, debinding e sinterizzazione.

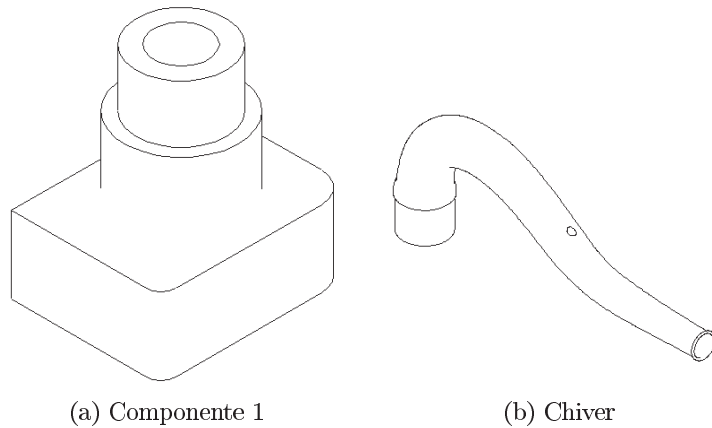


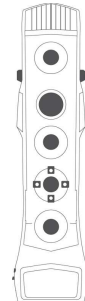
Figura 3: Parti mandate in stampa

5.4 Parametri di Stampa

	Chiver	Componente 1
Materiale	17-4 PH Stainless Steel	17-4 PH Stainless Steel
Layer	623	853
Formatura	30 h 55 min	80 h 14 min
Debinder	37 h 45 min	97 h 45 min
Sinterizzazione	39 h 02 min	41 h 19 min
Metallo	808.39 g - 161.36 cm^3	597.10 g - 119.18 cm^3
Ceramica	11.91 g - 5.73 cm^3	1.78 g - 0.85 cm^3
Peso finale	88.29 g	436.88 g
Dimensione [mm]	248.07 × 41.72 × 94.37	81.29 × 65.22 × 86.32

6 Scanner 3D

La scansione del chiver è stata fatta tramite il sistema Go!SCAN 3D della Creafom, tale dispositivo sfrutta un sistema a luce bianca strutturata per la digitalizzazione delle superfici della parte.



6.1 Specifiche Tecniche

Accuratezza	fino a 0.050 <i>mm</i>
Risoluzione delle misurazioni	0.100 <i>mm</i>
Risoluzione delle mesh	0.200 <i>mm</i>
Frequenza di misurazione	1.500.000 <i>misurazioni/s</i>
Area di Scansione	390 × 390 <i>mm</i>
Fonte luminosa	Luce Bianca

6.2 Scansione

La prima fase del processo di acquisizione è quella di definizione dei target. I target possono essere attaccati al pezzo, oppure come in questo caso, incollati ad una superficie. Questa prima acquisizione è di fondamentale importanza poiché permettere al sistema di definire una prima terna di coordinate, quindi di avere dei riferimenti fissi durante la triangolazione nella fase di scansione.

Conclusa la definizione dei target, si importa il file con il primo sistema di riferimento nel programma, si definiscono i parametri di acquisizione (altrimenti il software li definirà in automatico) e si prosegue con la scansione del chiver, ottenendo quindi la mesh della superficie posta in analisi.

Prima di salvare il risultato va verificata l'eventuale presenza di rumore e di buchi nella superficie, per poi ottimizzare la mesh ottenuta attraverso opportuni comandi.

La qualità della mesh aumenta con l'aumentare del tempo di scansione e sulla bontà finale dei dati influiranno il materiale e l'illuminazione ambientale (un'illuminazione eccessiva non farebbe lavorare correttamente i sensori).

Tramite lo scanner 3D sono state fatte 3 scansioni che corrispondono alla superficie del chiver dopo la fase di formatura, dopo il lavaggio nel debinder e dopo la sinterizzazione.

Nelle figure successive sono rappresentate le scansioni dopo le varie fasi, rispettivamente: post-formatura, post-debinder e post-sinterizzazione.

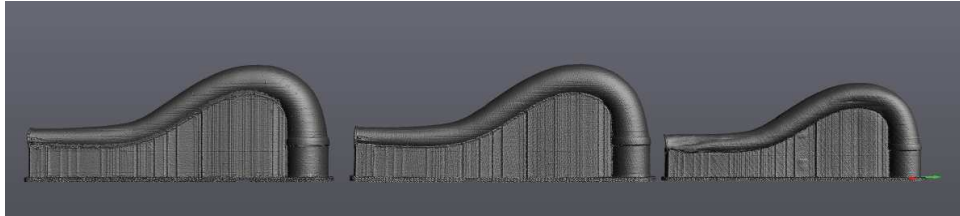


Figura 4: Allineamento, vista laterale



Figura 5: Allineamento, vista dall'alto

Già attraverso un'analisi visiva è possibile vedere l'avanzamento del ritiro durante il processo di stampa, in particolare confrontando la scansione post-formatura e post-sinterizzazione si nota come il componente nell'ultima fase abbia una minore altezza e larghezza rispetto la condizione precedente.

L'entità del ritiro durante le varie fasi è considerevole, ciò significa che ci si aspetta un'elevata percentuale di sovradimensionamento per compensare l'errore dovuto al ritiro della parte.

6.3 Misurazione

Una volta concluse le scansioni, il sistema *Creaform* permette di effettuare misure e analisi direttamente al suo interno tramite i programmi *VX Model* e *VX Inspect*.

Il primo step è quello di definire, per ciascuna scansione, un sistema di riferimento univoco e legato ad entità geometriche; questo poiché il software quando effettuerà le misure si riferirà sempre al sistema di coordinate definito e di conseguenza per poter realizzare un confronto tra le tre scansioni è necessario che il sistema di riferimento scelto sia lo stesso.

In questo caso le tre scansioni sono state allineate prendendo come riferimento il centro del cilindro terminale del collo, la mezzeria tra le superfici laterali e il piano base sul quale poggia il componente.

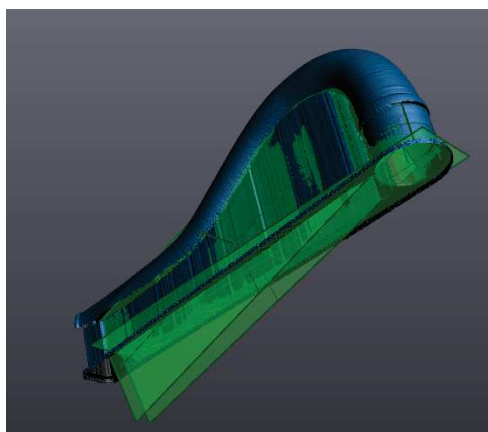


Figura 6: Definizione sistema di riferimento

Una volta definito il sistema di riferimento, all'interno di *VX Model*, è possibile allineare le scansioni per avere un primo riscontro visivo e poi procedere con le misurazioni.

Le feature scelte per fare un confronto, devono essere geometrie caratteristiche del pezzo, che permettano di essere definite univocamente, altrimenti si rischierebbe di mettere in relazione entità diverse. Nel caso in analisi sono state scelte 4 dimensioni da comparare:

1. Diametro cilindro base
2. Altezza
3. Lunghezza
4. Diametro dettaglio sopra il cilindro base

Dalle entità ricostruite si ricaveranno le quote richieste sfruttando i best-fit eseguiti e le distanze tra le varie feature.

7 Coordinate Measuring Machine

Le misure sul componente dalla geometria semplice sono state effettuate per mezzo del sistema CCM Contura 7/10/6 della Zeiss.



Figura 7: Zeiss - Contura 7/10/6

7.1 Specifiche Tecniche

Struttura	a portale
Tipo di Tastamento	a sensore multiplo
Corsa X	min 700 μm Max 1200 μm
Corsa Y	min 700 μm Max 2400 μm
Corsa Z	min 600 μm Max 800 μm

Il tastatore scelto per l'applicazione è: *Stylus M3 XXT Thermofit Ruby DK6 L100 2.4 g*, ovvero un tastatore con punta in rubino, diametro della testa di 6 mm, lunghezza d'asta 100 mm e peso di 2.4 g.

7.2 Misurazione

Le misurazioni tramite CMM prevedono diversi passaggi, in questo caso, al contrario di quanto avveniva nello scanner, non vi è una netta distinzione tra la fase di acquisizione e quella di misurazione poiché vengono fatte simultaneamente.

Il primo step è quello di tarare il componente tastatore, di fatto ogni applicazione richiede un tastatore differente a seconda delle strategie utilizzate e delle feature da raggiungere. Possono essere utilizzati tastatori più o meno lunghi, con un peso maggiore o con geometrie diverse per raggiungere le entità in maniera differente.

Il secondo step prevede la definizione del sistema di riferimento: l'origine macchina è impostata automaticamente nell'angolo in alto a destra di questa, di conseguenza al fine di avere coerenza nelle misure va definito il riferimento componente. Per fare ciò si identificano delle identità, tali per cui, intersecate tra di loro mi forniscono l'origine del sistema cartesiano. In questo caso è stata utilizzata l'intersezione tra il piano superiore e la superficie laterale del cilindro posto più in alto.

Una volta definiti i riferimenti si imposta il volume di sicurezza, ovvero il volume dentro il quale il tastatore deve eseguire unicamente i comandi settati dall'operatore per muoversi al fine di evitare possibili collisioni.

Il passaggio successivo richiede l'impostazione delle feature e delle caratteristiche da misurare, in questo step vanno inoltre definite le strategie di misurazione, ovvero come il tastatore deve muoversi per poi ottenere il dato in output.

La fase finale è completamente automatica, ovvero, una volta definiti sistema di riferimento, volume di sicurezza, caratteristiche e strategie di misure, la CMM provvederà in automatico a svolgere l'intera analisi; al termine di questa, il sistema fornirà all'utente il report con i dati ottenuti, i valori di tolleranza e deviazione su ciascuna misura effettuata.

Parte IV

Misure ed Elaborazioni dei Dati

8 Chiver

8.1 Quote

Le misure sono state fatte utilizzando distanze puntuali (per questo risulta fondamentale la definizione univoca del sistema di riferimento) e sfruttando la ricostruzione di feature note in entità geometriche tramite best-fit.

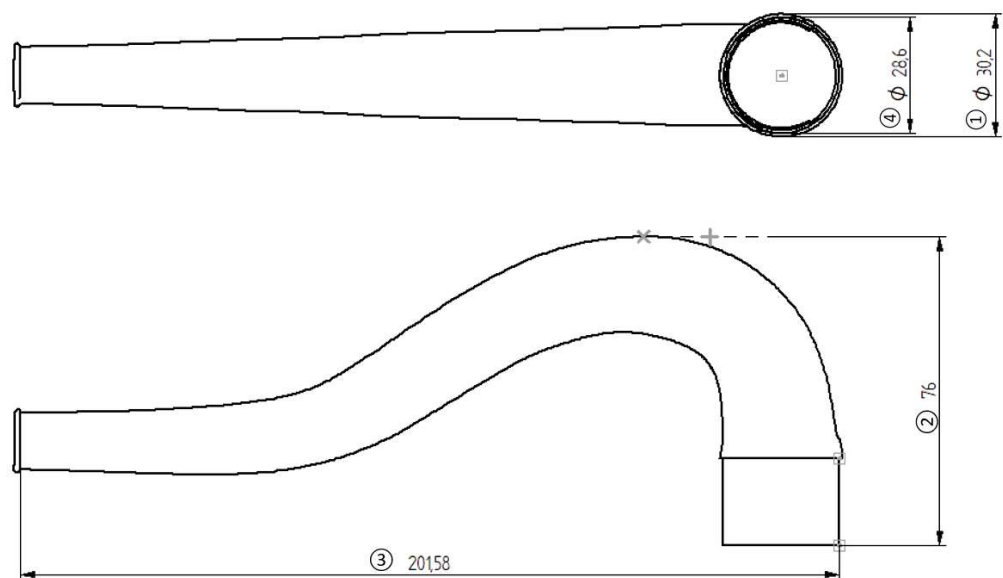


Figura 8: CAD Chiver

Feature	CAD [mm]	Post Formatura [mm]	Post Debinder [mm]	Post Sinteriz. [mm]
1	28.60	33.526	33.412	29.139
2	76.00	90.288	90.72	75.608
3	201.58	237.558	235.676	205.157
4	30.16	35.118	34.686	30.302

8.2 Risultati

Dalle quote precedentemente ottenute, andando ad elaborare i dati si otterranno le seguenti % di ritiro:

Feature	CAD Formatura	Formatura Debinder	Debinder Sinteriz.	CAD Finale
1	17.22%	0.34%	12.79%	-1.88%
2	18.80%	-0.48%	16.66%	0.52%
3	17.85%	0.79%	12.95%	-1.77%
4	16.44%	1.23%	12.64%	-0.47%
Media	17.58%	0.47%	13.76%	-0.90%

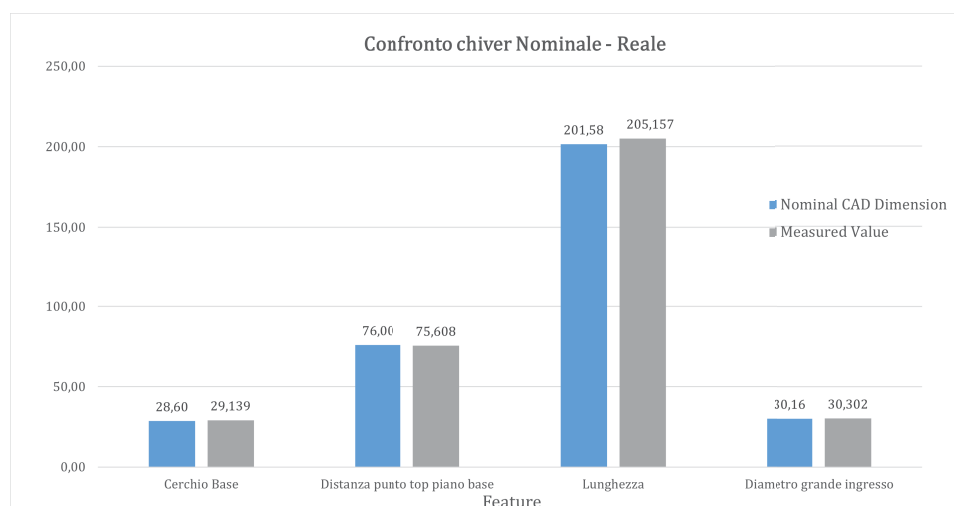


Figura 9: Confronto CAD nominali e misure effettive

Si osserva che il componente mandato in stampa viene automaticamente sovradimensionato dal software *Fabricate* di circa il 18% delle dimensioni nominali. Durante la fase di lavaggio, nel debinder, le dimensioni del componente non variano significativamente. Il ritiro del pezzo, come previsto, avviene in gran parte durante la fase di sinterizzazione, dove le alte temperature e i gradienti termici determinano un restringimento percentuale di circa il 14% delle dimensioni in input.

A concludere si nota che la parte, alla fine delle 3 fasi, risulta essere mediamente più grande di quella nominale di circa lo 0.90%, *ciò a significare che il sovradimensionamento automatico iniziale, compensa più di quanto la parte stessa si restringe*. Lo SCF quindi in questo caso avrebbe il compito di sottodimensionare il componente nominale dello 0.90%.

Il fatto che sia necessario un sottodimensionamento piuttosto che un sovradimensionamento è plausibile, va però precisato che tale valore dello SCF è dovuto ad una condizione in cui solo la feature 2, ovvero l'altezza base-testa, è effettivamente è più piccola rispetto la dimensione nominale.

Va quindi valutato se tale situazione è dovuta ad una non corretta conservazione o sinterizzazione del pezzo, ad errori nel processo di Reverse Engineering o ad un effettiva condizione dovuta alla stampante.

Nel successivo grafico si evidenzia l'andamento delle dimensioni di ciascuna caratteristica durante il processo di stampa. Partendo dalla dimensione nominale vi sarà un primo sovradimensionamento, nella fase di debinding le dimensioni rimarranno pressoché invariate per poi avere un elevato ritiro di circa il 14% durante la sinterizzazione.

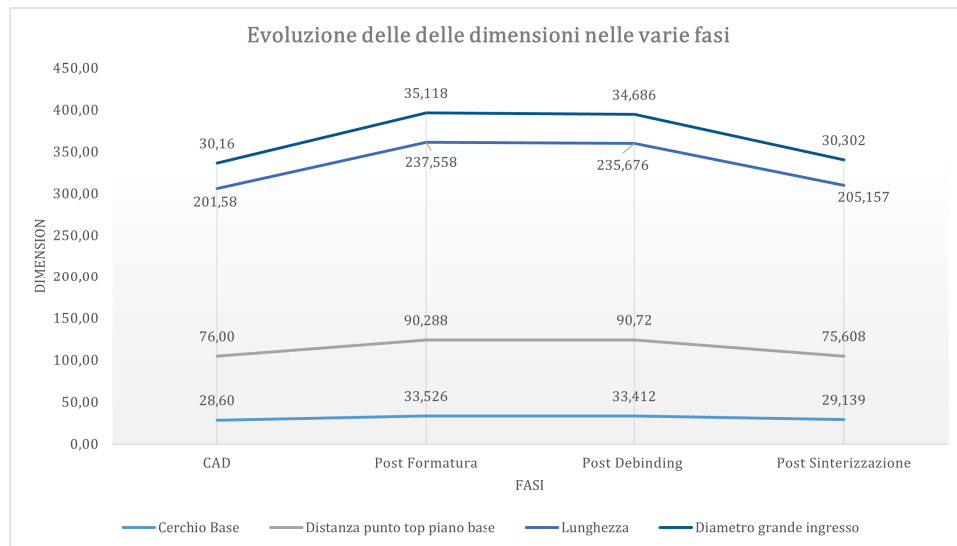


Figura 10: Evoluzione delle dimensioni nelle varie fasi

9 Componente dalla Geometria Semplice

9.1 Quote

Le misure sono state fatte sfruttando le entità ricostruite, quindi ottimizzando il diametro di un cilindro o la distanza tra piani etc. Il tastatore andando in contatto con i punti e campionando le coordinate riesce a riconoscere la feature, e all'aumentare del numero di campioni migliorerà il fit dell'entità ricostruita.

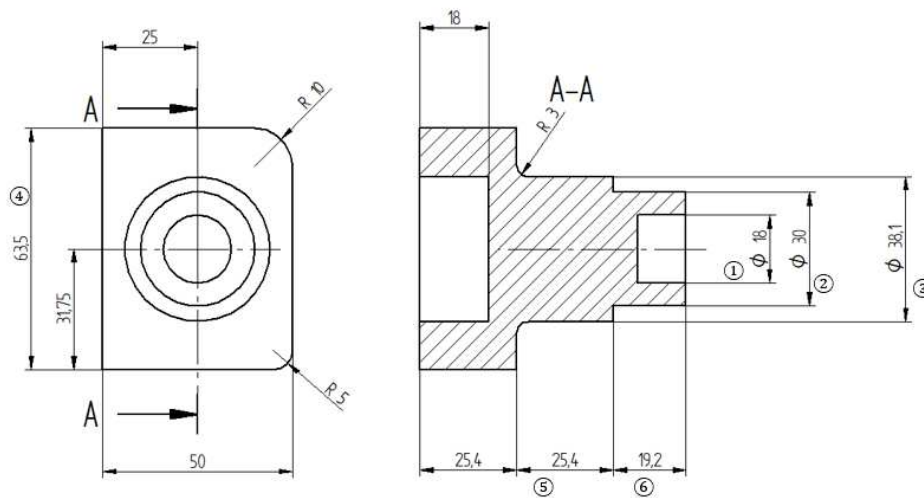


Figura 11: CAD Componente 1

Feature	Direzione	CAD [mm]	Post Formatura [mm]
1	<i>xy</i>	∅ 18	∅ 21.2169
2	<i>xy</i>	∅ 30	∅ 35.5941
3	<i>xy</i>	∅ 38.1	∅ 45.1102
4	<i>xy</i>	63.5	74.8087
5	<i>z</i>	25.4	30.0722
6	<i>z</i>	19.2	22.7566

9.2 Risultati

Tramite il report ottenuto grazie alla CMM si ottengono i seguenti dati:

Feature	Direzione	Sovradimensionamento Software
1	<i>xy</i>	17.8717 %
2	<i>xy</i>	18.6470 %
3	<i>xy</i>	18.3995 %
4	<i>xy</i>	17.8090 %
5	<i>z</i>	18.3945 %
6	<i>z</i>	18.5240 %

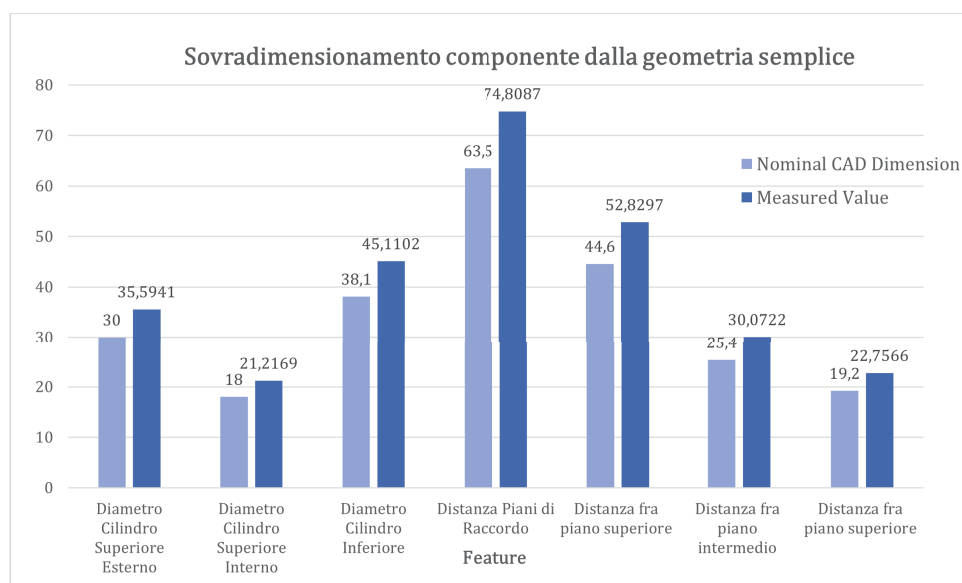


Figura 12: Sovradimensionamento

I risultati evidenziano un sovradimensionamento omogeneo di circa il 18 % nella direzione del piano e quella perpendicolare ad esso. In particolare, viene confermato quanto visto con il chiver, quindi con lo scanner; di conseguenza si può affermare che quanto visto con la geometria generica è applicabile anche in casi più comuni e articolati.

Al contrario di quanto previsto, il sovradimensionamento in *z* non è maggiore rispetto il piano, ciò a significare che la stampante prevede un ritiro omogeneo lungo le 3 direzioni.

10 Incertezza

Nell'analisi dei risultati ottenuti vanno considerate quelle che sono le possibili cause di incertezza delle misure effettuate. Nel caso di stampante, scanner 3D e CMM sono state considerate le incertezze semplici di categoria B di ciascuna macchina.

Per quanto riguarda il sistema di stampa la casa produttrice considera un dato medio di incertezza sui risultati di circa $\pm 110 \mu\text{m}$, tale dato comprende gli errori del posizionamento dell'estrusore, variazioni ambientali significative che possono influenzare il comportamento del materiale e l'altezza minima di un layer.

Nel caso dello scanner 3D le possibili cause di incertezza sono legate alla luminosità dell'ambiente in cui ci si trova e in al materiale del pezzo posto sotto scansione, infatti superfici non cooperative potrebbero portare al non corretto campionamento della nuvola di punti. La Creaform considera un'incertezza di $\pm 0.050 \text{ mm}$ per le misure effettuate tramite software e di $\pm 0.100 \text{ mm}$ per la precisione nella ricostruzione della mesh.

L'incertezza della CMM viene fornita dal report di taratura iniziale, questo valore comprende quelle che sono le condizioni ambiente, le vibrazioni macchina, la rigidità del tastatore e la forza con cui questo tasta il componente. Il valore di incertezza sui risultati ottenuti tramite CMM è di $\pm 0.0001 \text{ mm}$.

L'insieme di queste incertezze portano ad una variabilità dei risultati finali. Per questa ragione nelle valutazioni successive si considereranno valori mediati, tenendo conto di un certo intervallo di variazione. Per lo scopo del lavoro la valutazione dei risultati con eccessiva accuratezza non è necessaria. Data l'elevata risoluzione degli strumenti utilizzati ci si può permettere di arrotondare i risultati al centesimo e allo stesso tempo mantenere un'elevata precisione nelle considerazioni finali.

Conclusioni

In questa dissertazione è stata analizzata l'accuratezza del processo di Additive Manufacturing tramite un sistema FDM e le variazioni dimensionali durante le fasi di produzione del sistema di stampa "Studio System 1".

I dati rilevati mostrano un sovradimensionamento iniziale di circa il 18%. Quanto visto per il componente dalla geometria semplice viene anche confermato dalle misure fatte sul sassofono. Nonostante si presupponesse un ritiro maggiore lungo la direzione perpendicolare al piano, dai dati ricavati si evince che il sovradimensionamento è omogeneo in tutte e 3 le direzioni, di conseguenza anche il ritiro sarà più o meno simile.

Nella fase di lavaggio non si notano significative variazioni dimensionali. La parte corposa del ritiro la si ha in presenza dell'ultimo stadio, dove il componente uscito dal debinder e mandato nel sintetizzatore perderà circa i 12/13% delle dimensioni con le quali è entrato nel forno sinterizzatore.

Nel complesso, al contrario delle aspettative iniziali, la parte finale ottenuta avrà mediamente una dimensione maggiore rispetto quella nominale di circa lo 0.90%; ciò a significare che in fase di progettazione per migliorare l'accuratezza il componente andrebbe sottodimensionato, questo poiché il software dimensiona maggiormente rispetto il ritiro effettivo durante la produzione.

Tale condizione è plausibile, ma osservando i dati si nota che un unico valore è sovradimensionato rispetto le dimensioni iniziali e tale dato va ad influenzare la media complessiva. Va quindi verificato se tale condizione creatasi è dovuta ad un eccessivo sovradimensionamento iniziale oppure ad errori nella misurazione o alla non corretta conservazione del componente nelle fasi di stampa.

I risultati ottenuti evidenziano una buona precisione complessiva nella produzione tramite Metal Additive Manufacturing, la parte finale si discosterà di poco rispetto il CAD nominale. Nel caso si volesse aumentare ancora di più l'accuratezza del processo si può considerare lo SCF di circa lo 0.90%, che sottodimensionando il CAD permetterà poi a seguito del sovradimensionamento da parte del software, di avvicinarsi molto di più alle dimensioni nominali.

Data l'analisi svolta si può affermare che qualora si volesse migliorare il processo di compensazione dell'errore si potrebbe effettuare uno studio più dettagliato partendo da diverse geometrie semplici, alle quali andranno cambiate condizioni come materiale, geometria e disposizione. Tale passaggio serve per ricavare una legge generale che poi andrà applicata a componenti complessi. La ripetibilità delle prove aiuterà a considerare più variabili in gioco e a leggere il ritiro dimensionale in funzione di vari parametri.

Non vanno però esclusi quei possibili fattori ambientali e di sistema che non consentono di essere valutati matematicamente con casistiche generali, di conseguenza non si potrà ridurre unicamente con una legge la loro correlazione con il ritiro; tali fattori di influenza, nel caso in cui si volesse aumentare ancora maggiormente l'accuratezza del processo, potranno essere compensati grazie allo sviluppo della taratura del sistema di produzione additiva.

Gli sviluppi futuri di questo lavoro sono molto ampi, di fatto, la Metal Additive Manufacturing sta prendendo nel tempo sempre più piede nel campo delle tecniche che di produzione. Aumentando l'accuratezza del processo tramite compensazione dell'errore, si potrà pensare di applicare la MAM anche a condizioni specifiche richiedenti elevata precisione, integrando quindi tolleranze dimensionali strette, geometrie non ricavabili con altre tecniche di produzione, velocità di realizzazione e buone proprietà meccaniche.

Riferimenti bibliografici

- [1] Rajesh Ranganathan, T. Ravi, Arivazhagan Pugalendhi - *Analysis of Shrinkage Compensation Factor (SCF) of FDM uPrint SE for Accuracy Enhancement*.
- [2] MA. Gregorian, B. Elliott, R. Navarro, F. Ochoa, H. Singh, E. Mong* J. Foyos, R. Noorani, B. Fritz1, and S. Jayanthi - *Accuracy Improvement in Rapid Prototyping Machine (FDM-1650)*.
- [3] Quang Dao, Jane C. Frimodig, Hung N. Le, Xiao-Zhe Li, S. Brook Putnam, Kelly Golda, Joe Foyos, Rafiq Noorani, Boris Fritz - *Calculation of Shrinkage Compensation Factors for Rapid Prototyping (FDM 1650)*.
- [4] Haijun Gong, Cameron Crater, Ana Ordonez, Craig Ward, Madison Waller, and Charles Ginn - *Material Properties and Shrinkage of 3D Printing Parts using Ultrafuse Stainless Steel 316LX Filament*
- [5] Ilies Ait-Mansour, Niklas Kretzschmar, Sergei Chekurov, Mika Salmi and Joel Rech - *Design-dependent shrinkage compensation modeling and mechanical property targeting of metal FFF*
- [6] Ugur M Dilberoglua, Bahar Gharehpapagha, Ulas Yamana and Melik Dolena - *The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0*.
- [7] Y. Kok, X.P. Tana, P.Wang, M.L.S. Nai, N.H. Lohb, E. Liua and S.B. Tor - *Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review*
- [8] Ben Redwood, Filemon Schöffner, Brian Garret - *The 3D Printing Handbook - Technologies, design and applications-3D Hubs (2017)*