

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

Valutazione della sostenibilità tecnologica e ambientale di sistemi  
di fabbricazione additiva per componenti in materiali polimerici



Relatore

Prof. Paolo Claudio Priarone

Prof. Paolo Minetola

Candidata

Caterina Balsamo

Anno Accademico 2019/2020

# Sommario

1. Introduzione.....	3
1.1. Additive Manufacturing per i materiali polimerici.....	4
1.1.1. Fused Deposition Modeling (FDM).....	6
1.1.2. Consumo energetico FDM.....	9
1.1.3. Accuratezza dimensionale delle parti prodotte dai sistemi FDM .....	13
2. Metodologia.....	17
2.1. Campioni di riferimento .....	17
2.2. Le macchine FDM .....	20
2.3. Produzione delle repliche .....	22
2.4. Sistema di acquisizione del profilo di potenza ed energia.....	23
2.5. Sistema di acquisizione delle masse .....	25
2.6. Macchina di misura a coordinate (CMM) .....	26
3. Analisi dei risultati: profili acquisizioni, energia e masse .....	28
3.1. Profilo di corrente .....	28
3.2. Dati di energia e tempo.....	33
3.3. Masse per ogni job/componente/spurgo eventuale.....	38
4. Analisi dei risultati: accuratezza dimensionale.....	45
5. Discussione risultati.....	52
6. Conclusioni.....	63
Bibliografia .....	64
Indice delle figure .....	69
Indice delle tabelle .....	72

# 1. Introduzione

Nel corso degli ultimi anni le tecnologie di Additive Manufacturing (AM) stanno assumendo un ruolo di maggior interesse e rilievo in vari ambiti produttivi. Tali tecnologie si sono sviluppate a partire dagli anni '80 nel settore della Prototipazione Rapida (PR), ovvero, l'insieme di tecniche industriali volte alla realizzazione fisica del prototipo. Ad oggi, oltre ad essere fortemente impiegate in questo ambito, si stanno velocemente inserendo anche nei settori produttivi delle maggiori imprese leader su larga scala, con particolare riferimento ai campi dell'autotrazione e dell'aeronautica. I vantaggi derivanti dall'impiego delle tecnologie di manifattura additiva sono innumerevoli e, con riferimento all'ambito produttivo industriale, rispondono perfettamente alla richiesta di continua riduzione di costi, tempi e scarti di produzione [1]. Infatti, tramite l'utilizzo dell'AM è possibile realizzare oggetti con un elevato grado di personalizzazione, passando direttamente dalla progettazione dell'oggetto al CAD (Computer-Aided Design) alla realizzazione dell'oggetto reale, evitando così i dispendiosi step di progettazione e assemblaggio propri delle tradizionali tecnologie di formatura. Inoltre, la possibilità di ottenere il prodotto in un unico step e senza la necessità di assemblaggio, da luogo all'opportunità di conseguire sensibili riduzioni di manodopera [2-3]. Nel complesso, queste caratteristiche sottolineano gli indiscutibili vantaggi economici conseguibili dall'utilizzo delle tecniche di fabbricazione additiva per la produzione di componenti speciali e in piccola serie, al contrario, le tecnologie di fabbricazione tradizionali continuano a occupare un ruolo di maggiore importanza nell'ambito della produzione in serie, per questo, i processi di manifattura additiva si stanno prepotentemente inserendo nei settori relativi la produzione di oggetti altamente personalizzati [4].

Lo scopo del presente lavoro di Tesi è la valutazione della sostenibilità tecnologica e ambientale di sistemi di fabbricazione additiva per componenti in materiali polimerici. Ovvero, definire una correlazione tra le principali variabili di processo e l'efficienza energetica nei processi di Fused Deposition Modeling (FDM) e valutare le prestazioni in termini di precisione dimensionale e geometrica delle parti fabbricate. La valutazione combinata dei due aspetti consente di poter apprezzare l'analisi del processo additivo nella sua interezza, consentendo un'osservazione del sistema da diversi punti di vista.

Le prove sperimentali sono state progettate ed eseguite per mezzo di tre macchine FDM: Makerbot Replicator, Stratasys Dimension Elite e Stratasys F370. L'approccio metodologico e la scelta dei parametri di processo sono descritti nel capitolo 2. I risultati in termini di consumi energetici, tempo di processo e flussi di materiali sono formulati in modelli nel capitolo 3. I risultati in termini di

accuratezza dimensionale sono formulati in modelli nel capitolo 4. La discussione dei risultati, ovvero, la valutazione comparativa dei tre sistemi FDM sono descritti nel capitolo 5.

Le conclusioni sono riassunte nel capitolo 6.

### 1.1. Additive Manufacturing per i materiali polimerici

La definizione di AM fa riferimento a tutte le tecnologie di formatura che si distinguono dai tradizionali processi produttivi dei materiali, quali ad esempio, metodi di manifattura sottrattiva o operazioni di deformazione plastica. Infatti, dal punto di vista operativo la famiglia dei processi additivi, in contrapposizione quella dei processi tradizionali, prevede che l'oggetto 3D venga costruito attraverso la deposizione di uno strato di materiale alla volta, partendo da un modello CAD tridimensionale.

L'AM è inizialmente emersa per la sua spiccata versatilità ed impiegabilità nel settore della PR, con la commercializzazione della stereolitografia per mano dell'azienda statunitense 3D Systems. Questa tecnologia consente, infatti, la realizzazione di oggetti dalle geometrie complesse a partire da materiali metallici, ceramici, polimerici e compositi in genere, senza l'utilizzo di stampi o operazioni di manifattura sottrattiva, che caratterizzano le tradizionali tecnologie di formatura.

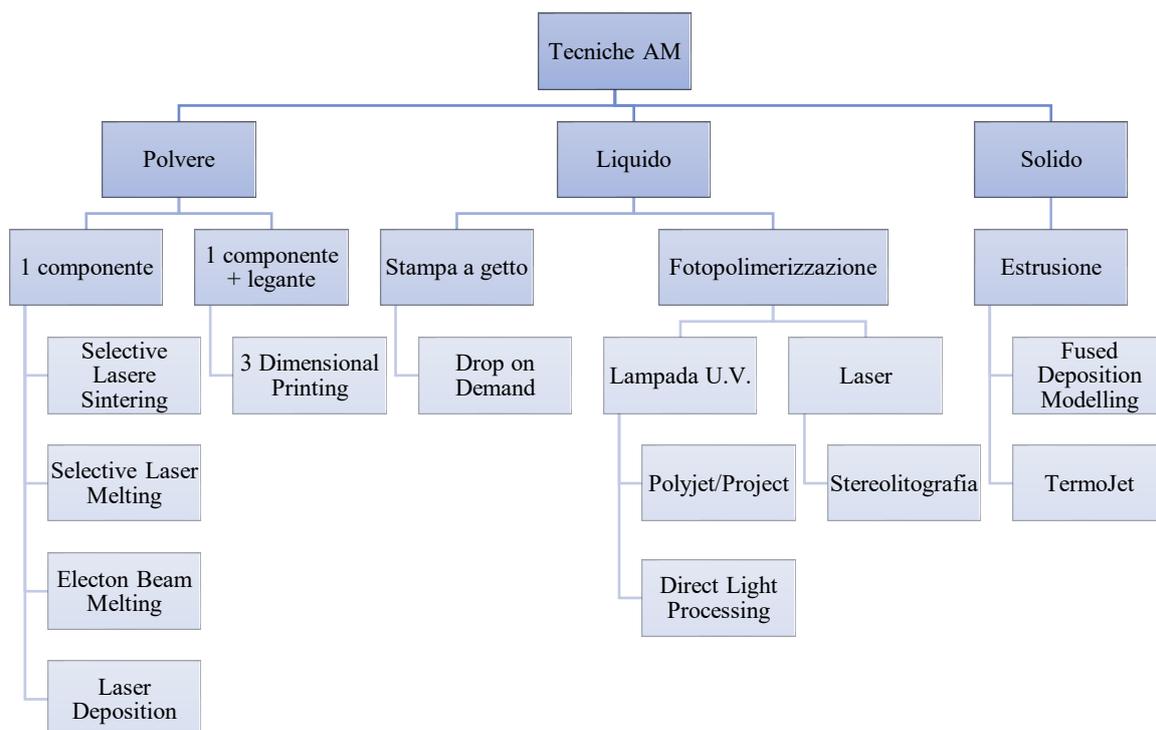


Figura 1 Schema delle principali tecniche di AM suddivise per il tipo di materiale adoperato ed in base al tipo di processo [adapted from 5]

Il rapido sviluppo delle tecnologie additive, in Figura 1, e le innumerevoli potenzialità dei processi di stampa 3D fanno trasparire l'eventualità di un ruolo rivoluzionario nel futuro: la realizzazione diretta di un qualsivoglia oggetto potrà essere raggiunta grazie alla libertà di progettazione, non vincolata dalla complessità, insieme alla possibilità di utilizzare multimateriali con proprietà multifunzionali. Nello specifico, se le tecnologie di formatura tradizionalmente continuano a detenere un'importanza di prim'ordine per quanto riguarda la produzione industriale continua e di massa, i processi innovati dell'AM risultano ineguagliabili per le produzioni a lotti e su commessa, caratterizzati da importanti livelli di personalizzazione per rispondere a esigenze specifiche ed individuali. Infatti, i processi di AM vengono applicati in diversi ambiti industriali, come quello aerospaziale, automobilistico, applicazioni biomediche, immagini digitali e progettazione architettonica.

Le principali tecniche additive che adoperano materiali di tipo polimerico, allo stato solido, tramite il processo di estrusione sono le tecnologie di FDM e TermoJet, le case produttrici sono rispettivamente la Stratasys e la 3D Systems. Dal punto di vista operativo, entrambe le tecniche prevedono l'estrusione del materiale, preventivamente fuso tramite una camera di preriscaldamento, operata tramite un ugello. Le differenze fondamentali tra le due tecnologie sono l'architettura del sistema e i materiali adoperati.

Per quanto riguarda per la tecnologia FDM, una cui rappresentazione è riportata in Figura 2, i materiali utilizzabili fanno parte dei materiali polimerici termoplastici. Mentre, per quel che concerne l'architettura del sistema, può essere presente un secondo ugello, utile alla deposizione del materiale per la costruzione dei supporti. Invece, per la tecnologia TermoJet, i materiali utilizzabili sono principalmente cere, di conseguenza questa tecnologia è poco adoperata per la realizzazione di componenti finiti. L'architettura del sistema differisce dalla precedente per la presenza di più ugelli, i quali sono disposti in serie e permettono di avere una maggior velocità di stampa.

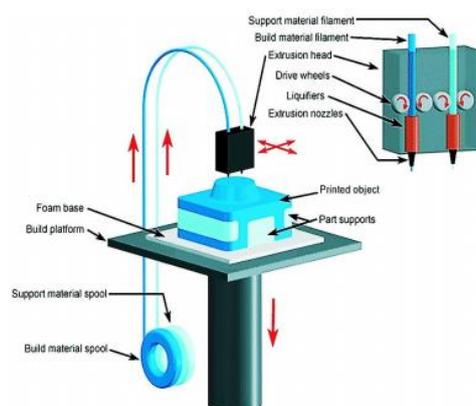


Figura 2 Schema tecnologia FDM [6]

### 1.1.1. Fused Deposition Modeling (FDM)

La tecnologia di produzione additiva FDM è stata sviluppata e distribuita da casa produttrice statunitense Stratasys e rientra a far parte della famiglia dei processi di AM basati sull'estrusione di materiale. In particolare, è proprio la Stratasys nel 1992 a brevettare la tecnologia e, il brevetto, appartiene al fondatore della casa produttrice. Ad oggi, il presente processo di deposizione ha ottenuto un'importanza tale per cui le macchine FDM risultano le più diffuse nel mondo dell'AM. Infatti, la forza del processo di FDM risiede nell'estesa gamma di materiali impiegabili, nei costi relativamente contenuti e nell'apprezzabili proprietà meccaniche ottenibili per le parti prodotte: nell'ambito della manifattura additiva, tale tecnologia risulta essere quella che permette l'ottenimento delle migliori caratteristiche prestazionali [7].

Come per tutti i processi di AM, anche nel caso del FDM il processo produttivo ha inizio con la preparazione del modello 3D del componente da stampare e la sua successiva conversione in linguaggio macchina. Più precisamente, il file CAD contenente il modello è prima convertito in formato STL (Standard Triangulation Language) e successivamente in SML (Service Modeling Language), ovvero, nel formato supportato dalla stampante e prevede la suddivisione in *layers*. Dal punto del funzionamento, il materiale, in forma di filo con un diametro comunemente pari a 1,75 mm e 3,00 mm, viene portato a temperatura di fusione in un'opportuna camera, la quale viene riscaldata tramite un sistema di resistenze ad essa annesse. Una volta raggiunta la temperatura di fusione, il materiale viene estruso tramite un ugello, il quale è costituito da un orifizio, il cui diametro determina di conseguenza la dimensione dei *roads* depositati. Gli ugelli sono interscambiabili e, in commercio, vi è una vasta gamma di dimensioni dell'orifizio: la scelta dell'ugello più appropriato è fatta in base al materiale da processare, alla finitura superficiale richiesta ed alla dimensione dell'oggetto da formare. Inoltre, come già detto, oltre l'ugello principale è spesso presente un secondo ugello, il quale viene usato per la deposizione del materiale di supporto, questo dev'essere ovviamente differente dal materiale principale, generalmente acido polilattico (PLA), in modo tale che sia di facile rimozione.

Il materiale viene depositato sulla piattaforma seguendo un percorso che è precedentemente elaborato dal software di macchina, in base al modello CAD ed ai parametri di processo scelti. In particolare, la deposizione del materiale avviene tramite l'ugello che si sposta nel piano XY, invece, la piattaforma effettua gli spostamenti in direzione verticale, permettendo la stratificazione dell'oggetto. Terminata la messa in forma dell'oggetto, quest'ultimo viene liberato dalla piattaforma e da eventuali altri componenti di supporto tramite azioni manuali, di carattere meccanico o, nel caso di materiali

idrosolubili, mediante l'utilizzo di soluzioni acquose. Il componente è, quindi, sottoposto o meno, in base alla qualità superficiale richiesta ad eventuali trattamenti di finitura.

Un fattore determinante per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche e la qualità superficiale ottenibile è l'ottimizzazione dei parametri di processo, i quali influenzano fortemente le proprietà dei componenti realizzati tramite tecnologia FDM [8]. Tali parametri (Figura 3), inoltre, hanno un'importante incidenza anche sulla velocità del processo di stampa.

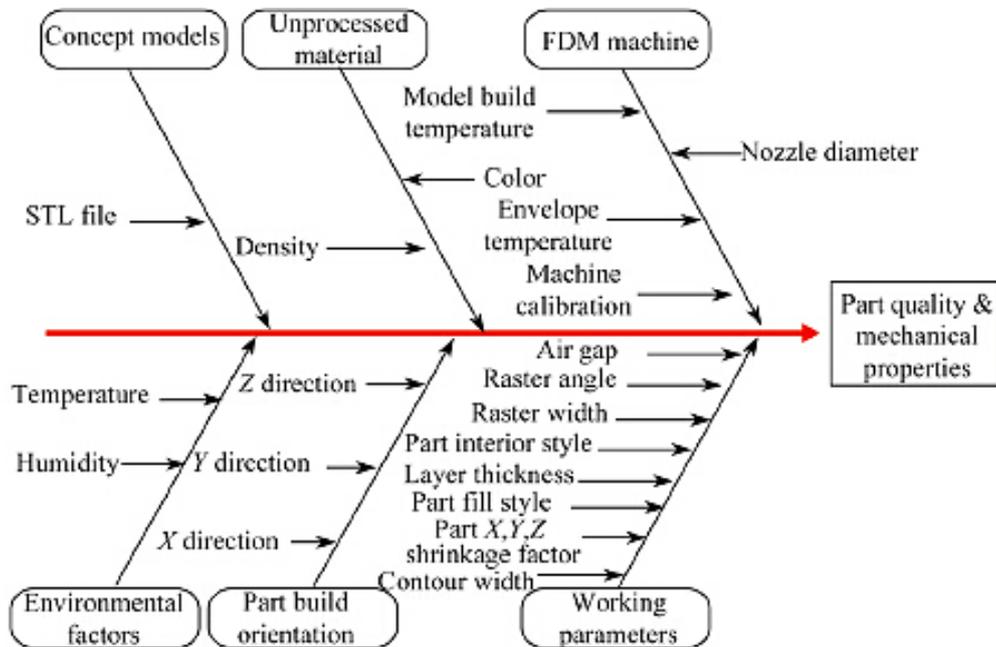


Figura 3 Diagramma Ishikawa dei parametri di processo FDM [9]

Tra le molteplici variabili indicate in figura, quelle dimostrate avere maggior incisività sul processo di stampa e sulla qualità dei prodotti sono l'air gap, il road width, il raster angle, la build orientation ed il layer thickness [9-10-11].

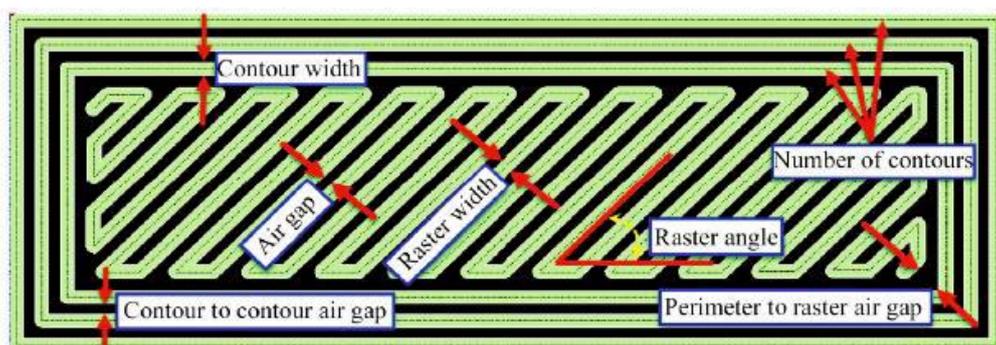


Figura 4 Principali parametri relativi alla geometria di stampa [9]

Il parametro *road width* indica la larghezza del materiale estruso ed è direttamente proporzionale alla dimensione dell'orifizio dell'ugello (Mohamed et al. [9]). Al variare del valore di *road width* si ha una sensibile variazione della velocità di stampa e, in misura minore, varia la qualità della superficie dei componenti stampati, mentre invece non variano le loro proprietà meccaniche. In particolare, se la dimensione dell'ugello è minore, aumentano il numero di *roads* per la formazione di un layer, e di conseguenza, diminuisce anche la velocità di stampa. Viceversa, se la dimensione dell'ugello aumenta, aumenta la velocità di stampa (Sun et al. [12]). Al contrario, per quanto riguarda la qualità superficiale ottenibile, al diminuire della larghezza del materiale estruso si ottiene una migliore la risoluzione di stampa.

Anche il parametro *layer thickness* è correlato alla dimensione dell'orifizio dell'ugello: all'aumentare della dimensione dell'ugello, aumenta lo spessore dei layer depositati. Analogamente al parametro precedente, non influenza le proprietà, mentre ne sono fortemente dipendenti la rugosità delle superfici stampate ed il tempo di stampa. Più precisamente, al crescere del *layer thickness* si consegue un aumento della rugosità ed un'abbreviazione dei tempi di stampa e viceversa (Grenda et al. [13]).

Il *raster angle* è l'angolo determinato dal materiale depositato con un determinato asse, ed il suo valore può variare tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$  (Mohamed et al. [9]) (Croccolo et al. [14]). L'influenza di tale parametro sulla velocità di stampa è irrilevante, mentre risulta di fondamentale importanza per le proprietà meccaniche. Nello specifico, le caratteristiche meccaniche massime si ottengono lungo la direzione parallela all'orientazione dei roads, mentre lungo la direzione ortogonale ad essa si ottengono i valori minimi (Es-Said et al. [15]).

Il parametro *air gap* misura la distanza tra due roads adiacenti ed influenza notevolmente sia i tempi di processo che le proprietà finali conseguibili (Ahn et al. [16]). Al diminuire del parametro si ha un aumento dei tempi di processo perché, a parità di area da stampare, sono necessari un numero maggiore di roads. Tuttavia, simultaneamente si ottiene un aumento della densità del materiale; viceversa, a un aumento del parametro si determina un aumento della porosità del componente stampato. Infatti, più piccola è la distanza tra i roads, migliori sono le proprietà meccaniche ed estetiche ottenibili (Too et al. [17]).

L'ultimo parametro d'interesse è la *build orientation*, ovvero l'orientazione di crescita del componente nello spazio degli assi X, Y e Z. Tale variabile ha una forte influenza sulle proprietà meccaniche degli stampati, oltre che sulla loro finitura superficiale e sui tempi di processo (Bertoldi et al. [18]) (Cantrell et al. [19]).

### 1.1.2. Consumo energetico FDM

In confronto con le tradizioni tecniche di produzione, quali i processi sottrattivi e di deformazione plastica e iniezione, due aspetti a sfavore delle tecniche di AM sono l'elevata domanda di energia e la bassa produttività. Per valutare ciò si utilizza l'indicatore del consumo specifico di energia (SEC), introdotto da Kara e Li et al. [20-21] nella caratterizzazione dei processi sottrattivi, che si è dimostrato può essere applicato anche al contesto di produzione per processi additivi al fine di quantificare l'efficienza energetica nella deposizione del materiale [22], cioè, assumendo una massa unitaria di materiale depositato come unità funzionale.

Gutowski et al. [23] propongono una classificazione di vari processi tradizionali in termini di consumo energetico assorbito in funzione del tasso di materiale processato. Questo studio permette di comprendere l'ordine di grandezza del consumo energetico dei processi tradizionali consentendone la comparazione con i processi AM oggetto di questa tesi.

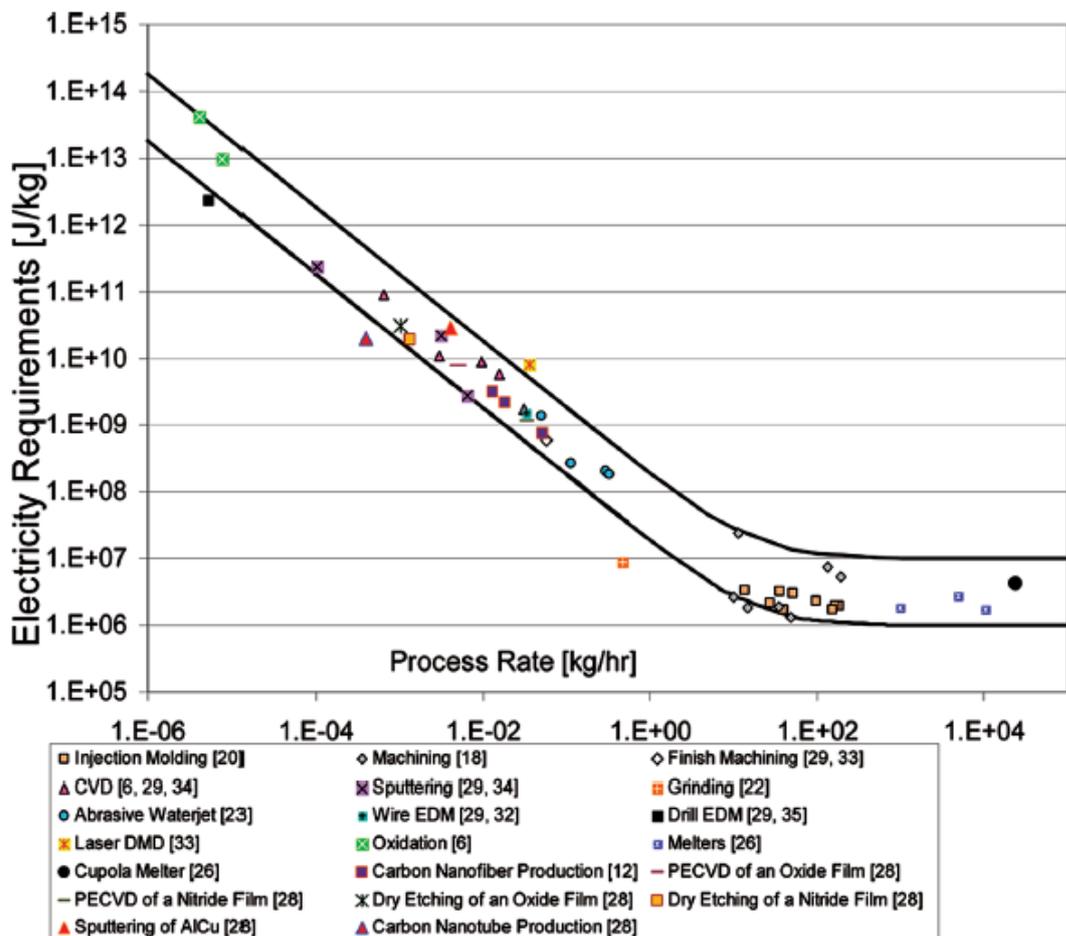


Figura 5 Consumo energetico in funzione del tasso di materiale processato per diverse tecnologie tradizionali [23]

Di seguito, invece, è fornita una panoramica dei valori di SEC rintracciata in letteratura per le principali tecnologie AM (Figura 6): i valori sono riportati in MJ/kg e sono relativi alla domanda di energia.

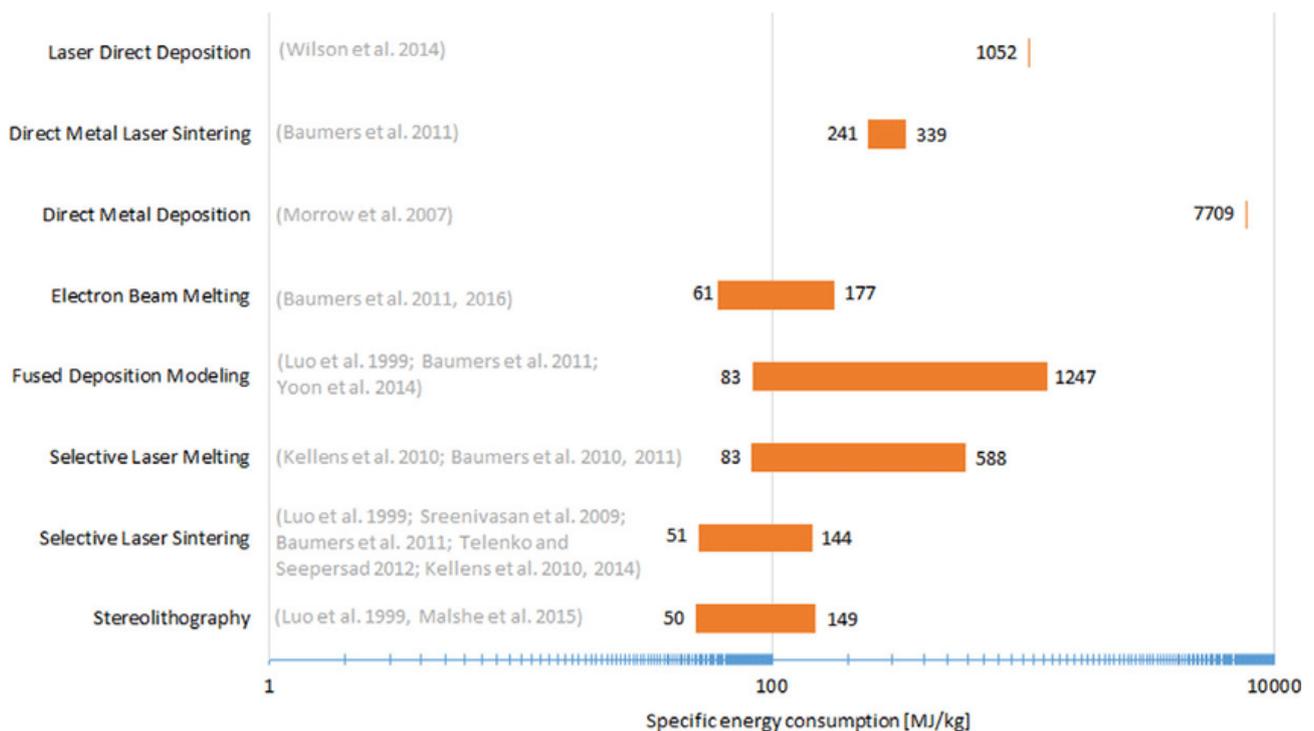


Figura 6 SEC in letteratura [24]

Dal grafico, si evince che i processi AM per i metalli sono divisi in processi direct (Laser Direct Deposition, Direct Metal Laser Sinteting e Direct Metal Deposition) e processi a letto di polvere (Eletronic Beam Melting e Selective Laser Melting). I primi sono caratterizzati da valori di SEC alti rispetto ai valori di SEC riscontrati nei diversi processi AM, rispettivamente 1052 MJ/kg, 241-339 MJ/kg e 7709 MJ/kg. Per l'Electron Beam Melting il SEC presenta un valore inferiore di (61-177 MJ/kg), questo range di valori è molto basso tanto da essere comparabile ai valori del SEC dei processi AM dei polimeri. Per il Selective Laser Melting il range di variazione presente in letteratura è 83-588 MJ/kg. I processi AM per i polimeri (Selective Laser Sintering e Stereolithography) sono caratterizzati da valori di SEC bassi rispetto ai valori di SEC riscontrati nei diversi processi AM, rispettivamente 51-144 MJ/kg e 50-149 MJ/kg. Invece, il processo FDM ha un vasto range di variazione (83-1247 MJ/kg), in particolare, con riferimento alla letteratura state-of-art, sono disponibili un'ampia variabilità di dati relativi al SEC per i processi FDM.

Luo et al. [22], nel loro studio, presentano un metodo per analizzare la sostenibilità ambientale dei processi SFF (Solid Freeform Fabrication). In particolare, a tale scopo, analizzano e mettono a confronto tre processi di fabbricazione additiva tra i quali la tecnologia FDM. Nel loro caso di studio, gli autori prendono in esame quattro modelli della stessa casa costruttrice Stratasys (FDM1650, FDM2000, FDM8000 e FDM Quantum) utilizzando l'ABS come materiale di processo per tutte le macchine. Come si evince dai risultati sintetizzati in Figura 7, i valori di SEC, per le quattro stampanti FDM sono rispettivamente 1247 MJ/kg, 415 MJ/kg, 83 MJ/kg e 589 MJ/kg.

	FDM 1650	FDM 2000	FDM 8000	FDM Quantum
V (mm/sec)	2	10	50	200
W (mm)	1.4	1.4	1.4	0.4
T (mm)	0.4	0.4	0.4	0.2
Specific gravity	1.05	1.05	1.05	1.05
k	0.9	0.9	0.9	0.9
P (kW)	1.32	2.2	2.2	11
Process Productivity (kg/h)	0.00381	0.0191	0.0953	0.0672
Energy Consumed Rate (kWh/kg)	346.4	115.2	23.08	163.69
Eco-indicator for Energy (per kWh) <sup>[8]</sup>	0.57	0.57	0.57	0.57
Total indicator	197.45	65.66	13.15	93.30

Figura 7 Risultati Luo et al. [22]

Mognol et al. [25] hanno analizzato la variazione conseguibile nel consumo energetico modificando il parametro di *build orientation* del componente all'interno della camera di costruzione di una macchina FDM, la Stratasys FDM 3000: hanno proposto 18 posizioni per la parte di riferimento, in particolare, l'oggetto dalla posizione n°10 alla n°18 ha la necessità di più supporti.

	During time of the job (min)	Vol d'ABS (cm <sup>3</sup> )	Vol of support (cm <sup>3</sup> )	% (time)	% of ABS	% of support	Electrical energy consumption kWh
POSITION 1	56	7	0,59	3,70	92,23	7,77	0,5
POSITION 2	54	6,72	0,59	0,00	91,93	8,07	0,48
POSITION 3	56	7	0,59	3,70	92,23	7,77	0,5
POSITION 4	61	7,14	0,49	12,96	93,58	6,42	0,57
POSITION 5	60	6,9	0,49	11,11	93,37	6,63	0,56
POSITION 6	61	7,14	0,49	12,96	93,58	6,42	0,57
POSITION 7	65	7,05	0,41	20,37	94,50	5,50	0,6
POSITION 8	63	6,75	0,41	16,67	94,27	5,73	0,58
POSITION 9	65	7,05	0,41	20,37	94,50	5,50	0,6
POSITION 10	84	7,13	1,97	55,56	78,35	21,65	0,8
POSITION 11	82	6,93	1,93	51,85	78,22	21,78	0,78
POSITION 12	84	7,13	1,97	55,56	78,35	21,65	0,8
POSITION 13	111	7,14	2,61	105,56	73,23	26,77	1,05
POSITION 14	107	6,82	2,46	98,15	73,49	26,51	1,01
POSITION 15	109	7,14	2,41	101,85	74,76	25,24	1,03
POSITION 16	133	7,13	2,69	146,30	72,61	27,39	1,25
POSITION 17	130	6,85	2,62	140,74	72,33	27,67	1,22
POSITION 18	133	7,13	2,7	146,30	72,53	27,47	1,25

Figura 8 Risultati Mognol et al. [25]

Dai risultati ottenuti (Figura 8) gli autori affermano che la presenza di supporto è il parametro principale: i tempi di produzione e il consumo di energia elettrica aumentano oltre il 100%. Mentre, l'altezza lungo l'asse Z risulta un parametro secondario in termini di consumo di energia elettrica (aumento del 20%).

Baumers et al. [26] hanno studiato l'efficienza del funzionamento dei processi di produzione additiva al variare della saturazione del volume della macchina. Questo è stato fatto registrando il consumo di energia durante due esperimenti di costruzione appositamente progettati: nel primo viene saturata la capacità del volume di costruzione, nel secondo si produce una singola parte di prova situata al centro del piano di base del volume di costruzione. I risultati, in Figura 9, mostrano che, per la macchina FDM (Stratasys FDM 400 mc) il valore del SEC tra i due esperimenti ha una piccola variazione pari a 17 MJ/kg (-3,16%), questa è dovuta alla esigua richiesta di potenza delle fasi di warm-up e di cool-down.

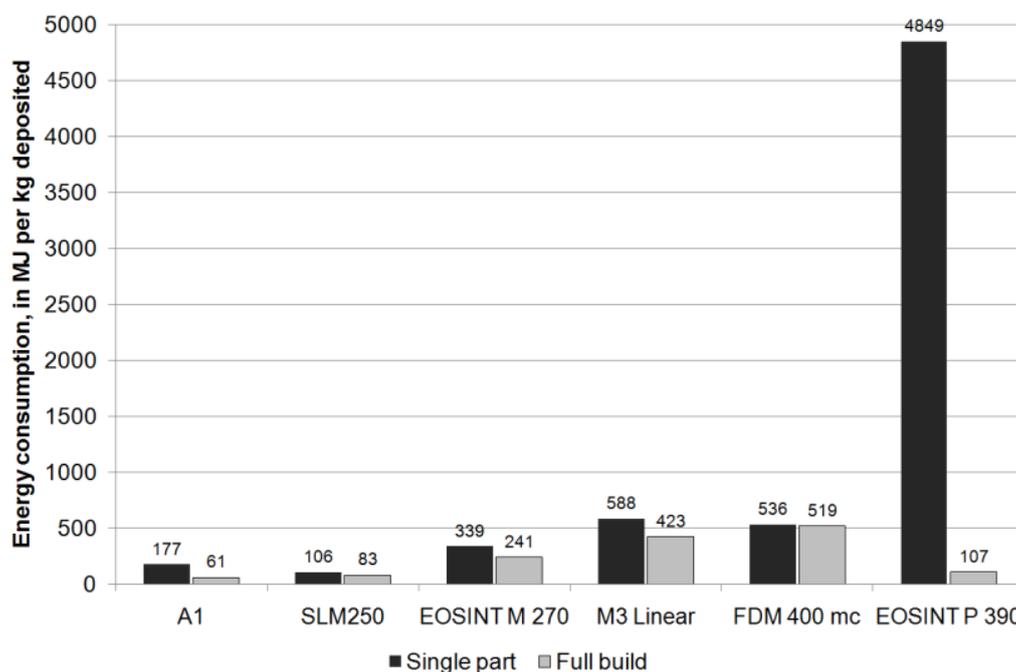


Figura 9 Risultati Baumers et al. [26]

Si riscontra una grande variabilità nella caratterizzazione delle prestazioni di efficienza energetica dei diversi sistemi di FDM, infatti, i valori differiscono di uno, o anche due, ordini di grandezza, per questo motivo è necessario un più attento studio, come quello proposto nel seguente lavoro di tesi.

### 1.1.3. Accuratezza dimensionale delle parti prodotte dai sistemi FDM

Un aspetto da valutare dei sistemi di fabbricazione additiva, dal punto di vista tecnologico, sono le prestazioni ottenibili in termini di precisione dimensionale e geometrica delle parti fabbricate. L'accuratezza dimensionale è una specifica che si deve rispettare per far sì che i componenti fabbricati siano conformi all'utilizzo e alle funzionalità per cui sono stati progettati.

Ad oggi il panorama dei sistemi di produzione additiva FDM è vastissimo: dopo la scadenza dei brevetti di modellazione a deposizione fusa, detenuti dall'azienda statunitense 3D Systems, si è assistito alla diffusione di un gran numero di macchine FDM, definite stampanti 3D.

I sistemi più elementari sono definiti stampanti 3D entry-level, ovvero, un kit da auto assemblare che viene venduto a partire da centinaia di euro. Dal punto di vista operativo il sistema è molto semplice: un'architettura a tre assi, un estrusore unico, la tavola e la camera di lavoro sono a temperatura ambiente. Il costo aumenta quando la stampante 3D è dotata di più estrusori, la tavola e la camera di lavoro riscaldate.

Al contrario, i sistemi FDM industriali hanno un prezzo che parte da oltre 15.000 euro, sono dotati di almeno due estrusori, una per il deposito del materiale da costruzione e l'altra per il materiale di supporto, di una camera di lavoro riscaldata chiusa e di soluzioni meccaniche avanzate per migliorare la precisione e la velocità di posizionamento.

Anche se la diffusione dei primi sistemi di RP è avvenuta alla fine degli anni '80, vi è ancora ad oggi la mancanza di una linea guida standard internazionale per la valutazione quantitativa delle prestazioni e dell'accuratezza delle macchine di AM. Moylan et al. [33] afferma che vi sono due metodologie primarie per valutare le prestazioni di una macchina e/o di un processo: (1) attraverso una serie di misurazioni dirette delle caratteristiche della macchina e del processo e (2) attraverso misurazioni di manufatti di prova fabbricati. In quest'ambito, la caratterizzazione geometrica e dimensionale accurata di oggetti fisici costituisce uno degli aspetti di maggior interesse e in rapida evoluzione. Pertanto, l'uso di tecnologie d'ispezione avanzate e rapide per il controllo di qualità in tutte le fasi di sviluppo di un componente è di fondamentale importanza.

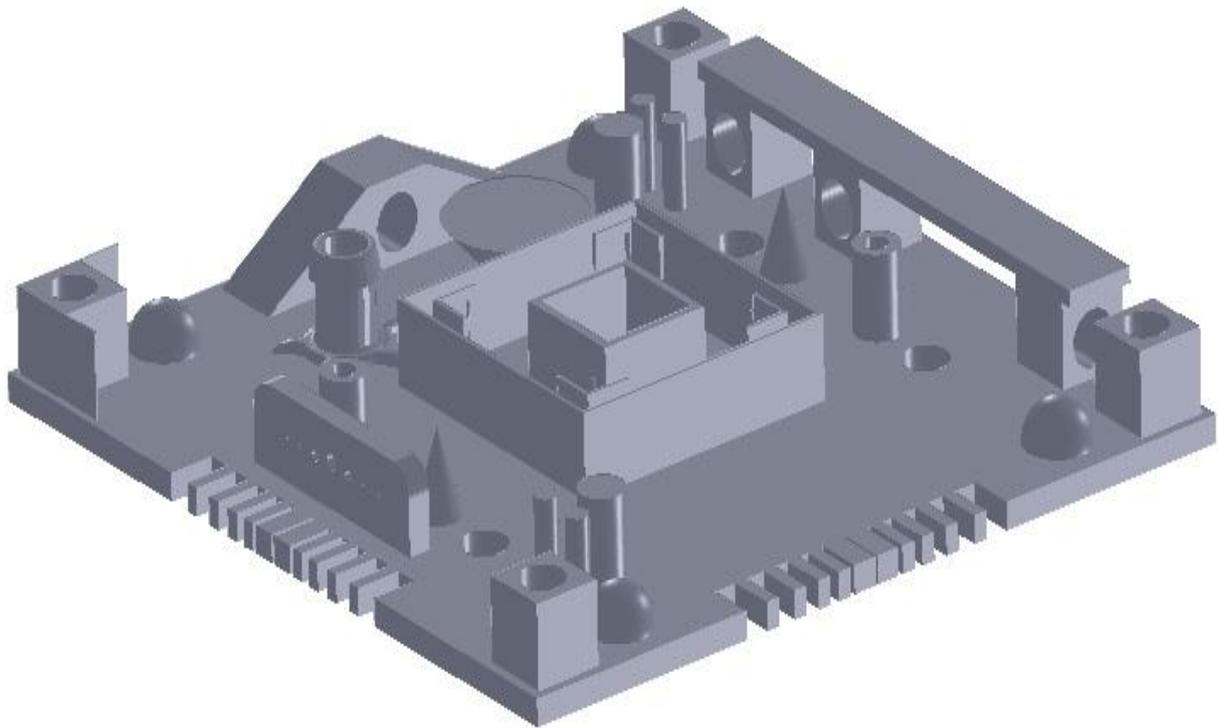
Per questo scopo negli ultimi anni si sono sviluppati strumenti di misura impiegati per l'acquisizione di dati tridimensionali per il Reverse Engineering (RE), ovvero, il processo di scansione tridimensionale dell'oggetto avviene tramite l'utilizzo di dispositivi meccanici per misure dimensionali, la cui tecnologia può essere costituita da un tastatore (sistemi a contatto) o da una sonda ottica (sistemi senza contatto) che determina le coordinate di posizione su uno spazio di lavoro. Tramite i dati rilevati da questi strumenti si determinano gli scostamenti dimensionali, ovvero,

le differenze tra le dimensioni “nominali” di progettazione e le dimensioni “reali” del componente realizzato.

Per confrontare l’accuratezza geometrica dei diversi sistemi di produzione additiva è particolarmente opportuno fare riferimento ai gradi IT standard ISO [27-28] che ci consentono di confrontare l’accuratezza geometrica di diversi processi di produzione.

In letteratura sono presenti molti studi che propongono differenti oggetti standardizzati per testare le performance delle macchine ed i processi additivi. Ad esempio, in Figura 10 si riporta il modello CAD dell’oggetto standard proposto da Mahesh et al. [29] all’interno del suo studio per dimostrare alcuni vantaggi dei processi additivi.

Nonostante i molteplici studi presenti in letteratura, solo pochi autori si soffermano sull’analisi dei gradi IT per valutare l’accuratezza dimensionale e geometrica del processo o della macchina utilizzati. Inoltre, la maggior parte dei manufatti proposti presenta geometrie con dimensioni simili, quindi è impossibile coprire un ampio range dimensionale nello standard ISO [30].

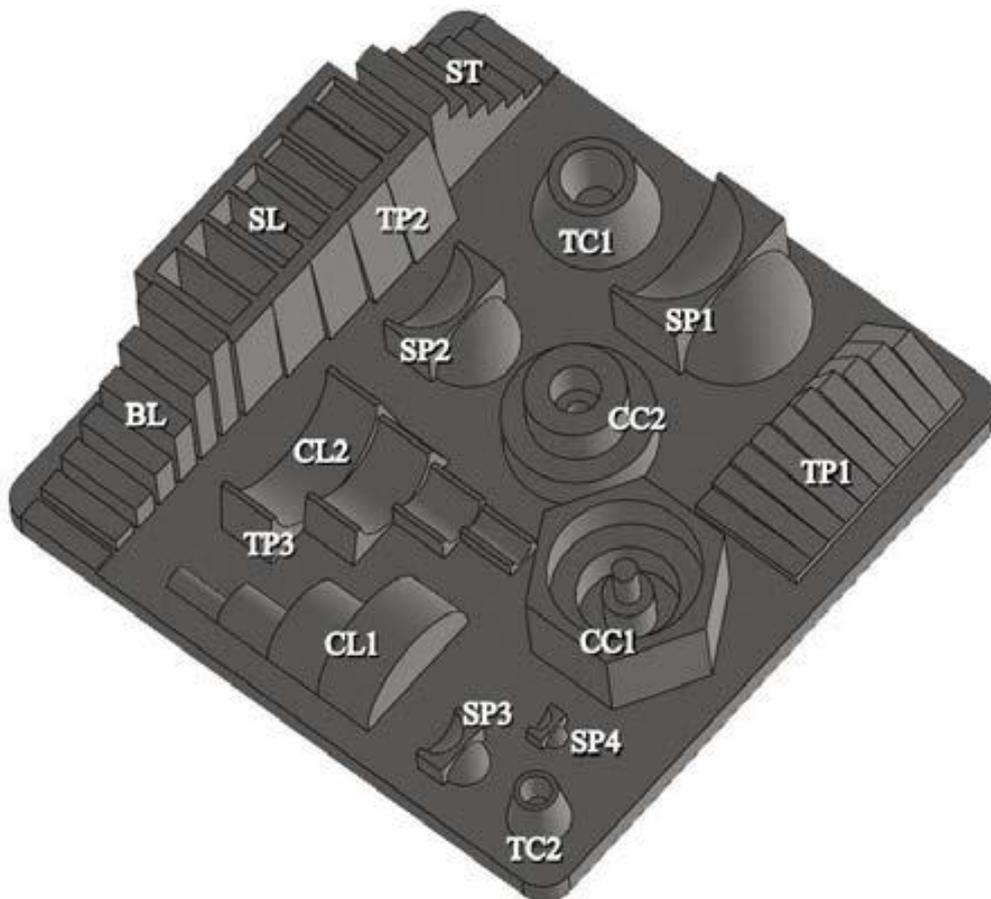


*Figura 10 Modello CAD e geometrie del manufatto proposto da Mahesh et al. [29]*

Con riferimento ai processi FDM per materiali polimerici, Minetola et al. [30] hanno confrontato l’accuratezza dimensionale di due sistemi additivi, la stampante entry-level 3D Touch™ della 3D

System e il sistema FDM industriale Dimension Elite™ della Stratasys, tramite l'uso dei gradi IT proponendo l'oggetto di riferimento in Figura 11. Gli autori evidenziano una maggiore precisione geometrica della Dimension Elite™ rispetto alla 3D Touch™ da attribuire ai seguenti fattori:

- soluzioni meccaniche avanzate;
- diametro ridotto del filamento estruso, che garantisce una maggiore precisione e dettaglio per le caratteristiche di dimensioni minori;
- camera di lavoro a temperatura controllata che consente di ridurre il restringimento degli strati di materiale depositato prevenendo la deformazione del pezzo durante la fabbricazione.



*Figura 11 Modello CAD e geometrie del manufatto proposto da Minetola et. al [30]*

Per la progettazione dei campioni di riferimento del seguente lavoro di tesi sono state tenute in considerazione le seguenti indicazioni, proposte da Moylan et al. [31], Richter e Jacobs et al. [32] e Scaravetti et al.[33]. Il campione di riferimento deve:

- essere abbastanza grande da testare le prestazioni della macchina sia vicino ai bordi che al centro della piattaforma;

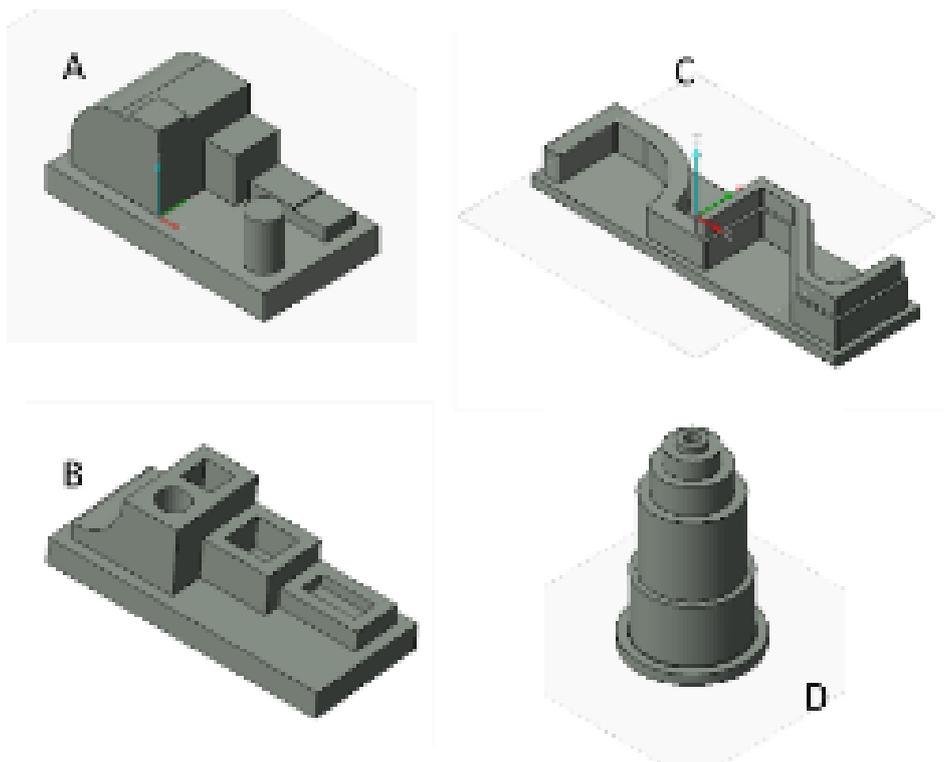
- avere un numero considerevole di caratteristiche piccole, medie e grandi;
- avere sia fori che sporgenze per facilitare la verifica della compensazione della larghezza del raggio;
- avere tempi di fabbricazione brevi;
- richiedere una esigua quantità di materiale per la sua realizzazione;
- essere facile da misurare;
- avere molte caratteristiche di una parte "reale" (ad esempio pareti sottili, superfici piane, fori, ecc.);
- avere forme geometriche semplici, che consentano una definizione perfetta e un facile controllo della geometria;
- non richiedere alcun post-trattamento o intervento manuale (nessuna struttura di supporto);
- consentire misure di ripetibilità.

## 2. Metodologia

Nel seguente capitolo viene illustrata la metodologia seguita nel presente lavoro di tesi. Dapprima, una descrizione dei campioni di riferimento adoperati per effettuare la valutazione dei sistemi FDM, a cui segue una descrizione degli stessi. Di seguito, si espone la programmazione delle repliche da effettuare, divise all'intero dei job. Infine, viene descritto il sistema di acquisizione del profilo di potenza ed energia, il misuratore di potenza, il sistema di acquisizione del valore delle masse, la bilancia, e inoltre, la macchina a misura di coordinate per l'acquisizione dei valori dimensionali.

### 2.1. Campioni di riferimento

I campioni di riferimento proposti sono progettati al fine di valutare le prestazioni dei sistemi di fabbricazione additiva secondo gli standard utilizzati nell'ambito della meccanica in termini di accuratezza dimensionale (ISO 286), geometrica (ISO 1101 – GD&T) e di rugosità superficiale. Tuttavia, nel seguente lavoro si è stabilito di analizzare nel dettaglio solo l'accuratezza dimensionale. Sono stati selezionati quattro campioni, identificati con le lettere A, B, C, D (Figura 12).



*Figura 12 Modello CAD 3D dei campioni di riferimento*

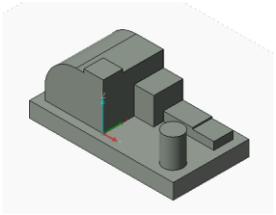
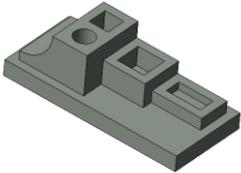
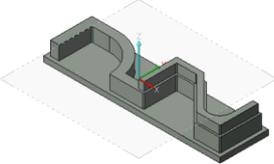
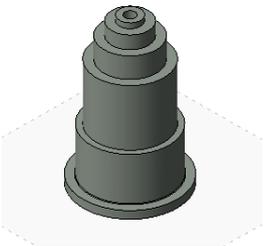
Inoltre, i campioni non richiedono strutture di supporto per la loro produzione, consentendo la produzione su stampanti 3D fornite con un estrusore unico. Tuttavia, le macchine Stratasys, Dimension Elite e F370, sono fornite di un secondo estrusore per il materiale di supporto, quindi, il software ha previsto dei supporti interni per il componente D.

Per quanto riguarda l'ispezione dimensionale, la presenza di semplici geometrie classiche è indispensabile, poiché su di esse sono definiti errori di forma e tolleranze geometriche. Le geometrie classiche semplici (piani, cilindri, sfere e coni) sono rappresentate nei quattro campioni in entrambe le forme concave e convesse, tenendo conto delle diverse opportunità di progettazione.

La modifica delle dimensioni di geometrie simili viene introdotta affinché le misure si adattino ai diversi range ISO per le dimensioni base da 1 a 3 mm, da 3 a 6 mm, da 6 a 10 mm, da 10 a 18 mm, da 18 a 30 mm, da 30 a 50 mm, da 50 a 80 mm, da 80 a 120 mm.

Le seguenti caratteristiche appaiono su una piastra di base rettangolare (A, B, C) e su una piastra di base circolare (D) spessa 5 mm, il cui spessore viene utilizzato per prevenire la deformazione del pezzo durante la fabbricazione e agevolare la separazione dalla piattaforma di costruzione della macchina FDM.

Le caratteristiche geometriche, in Tabella 1, sono state organizzate, localizzate e orientate razionalmente per essere rappresentative per la valutazione delle tolleranze geometriche durante la fase di ispezione. L'effetto scala, tipico dei processi di produzione strato per strato, può anche essere valutato su diverse superfici con curvatura diversa.

Campione	Caratteristiche geometriche
<p>A</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• set di due gradini rettangolari</li> <li>• un parallelepipedo</li> <li>• un cilindro</li> <li>• solido complesso composto da superfici curve e superfici piane</li> </ul>
<p>B</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• set di due slot rettangolari</li> <li>• solido complesso composto da: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ slot rettangolare</li> <li>○ slot cilindrico</li> <li>○ superfici curve e superfici piane</li> </ul> </li> </ul>
<p>C</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• solido complesso composto da pareti sottili con superfici piane e curve</li> </ul>
<p>D</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• set di sei cilindri coassiali</li> </ul>

*Tabella 1 Descrizione delle caratteristiche geometriche*

## 2.2. Le macchine FDM

Le tre macchine di FDM sono disponibili presso il Rapid Manufacturing Laboratory (RMLab) del Dipartimento di Ingegneria gestionale e della produzione del Politecnico di Torino.

La prima macchina [34] è un sistema entry-level 3D Makerbot Replicator (Figura 13a), infatti, è ora disponibile sul mercato a circa 3.000 euro. Gli estrusori possono essere alimentati con filamenti da 3 mm, per la deposizione attraverso un ugello da 0,5 mm in un volume di lavoro di 295 x 195 x 165 mm, con uno spessore dello strato di 0,125 mm, 0,25 mm o 0,50 mm.

La seconda macchina [35] è la Dimension Elite™ (Figura 13b) di Stratasys. Questo sistema di FDM industriale ha due estrusori alimentati rispettivamente con il filamento di costruzione ABS da 1,75 mm e il materiale di supporto solubile. Il volume di lavoro è di 200 x 200 x 250 mm, lo spessore dello strato può essere impostato su 0,178 mm o 0,254 mm e il sistema costa circa 10.000 euro.

La terza macchina [35] è la Stratasys F370 (Figura 13c) di Stratasys. È anche questo un sistema di FDM industriale, ha due estrusori alimentati rispettivamente con il filamento di costruzione ABS da 1,75 mm e il materiale di supporto solubile. Il volume di lavoro è di 355 x 254 x 355 mm, lo spessore dello strato può essere impostato su 0,127 mm, 0,178 mm, 0,254 mm o 0,330 mm e il sistema costa circa 20.000 euro.



Figura 13 Macchine FDM: Makerbot Replicator(a), Stratasys Dimension Elite (b), Stratasys F370 (c) [34-35]

Le 3 macchine FDM presentate producono ogni componente su una base che può essere dello stesso materiale di quello del componente (Makerbot Replicator) o in un altro materiale supporto (Stratasys Dimension Elite e F370) al fine di aiutare l'aderenza del componente alla tavola di costruzione.

La scelta dei parametri di processo, in Tabella 2, è stata effettuata per tutte e tre le macchine FDM in modo analogo, così da poter comparare i diversi campioni:

	Materiale del modello	Strategia di riempimento	Altezza slicing (mm)
Makerbot Replicator	PLA	Standard (50%)	0.20
Stratasys Dimension Elite	ABS	High density	0.18
Stratasys F370	ABS	High density	0.18

*Tabella 2 Parametri di processo*

### 2.3. Produzione delle repliche

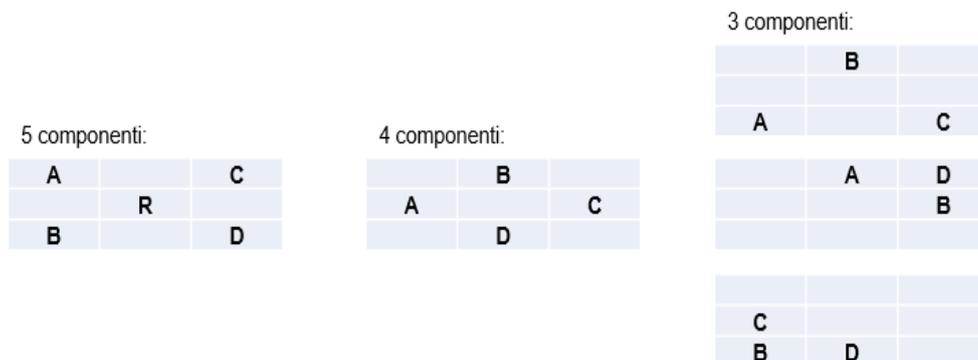
I 4 componenti (A, B, C, D) sono stati prodotti su ciascuna macchina sulla base del seguente piano sperimentale, in Tabella 3:

- n° 3 job contenenti 5 pezzi ciascuno
- n° 3 job contenenti 4 pezzi ciascuno
- n° 3 job contenenti 3 pezzi ciascuno

Job nr.	Nr. di pezzi	Tipologia di pezzi				
1	3	A	B	C		
2	3	A	B	D		
3	3	B	C	D		
4	4	A	B	C	D	
5	4	A	B	C	D	
6	4	A	B	C	D	
7	5	A	B	C	D	A
8	5	A	B	C	D	C
9	5	A	B	C	D	D

*Tabella 3 Configurazione dei job di produzione*

Per un totale di 36 pezzi, con 9 replicazioni per componente. Da notare che le configurazioni (Figura 14) che tendono a massimizzare lo sfruttamento del volume di lavoro della macchina (Job nr. 7/8/9) approssimano la comune pratica industriale.



*Figura 14 Configurazione dei layout di stampa dei job*

## 2.4. Sistema di acquisizione del profilo di potenza ed energia

Gli input di energia utilizzati dal processo AM sono stati misurati e registrati utilizzando il misuratore di potenza Fluke 435 serie II, come si può vedere in Figura 15. Il modello 435 serie II è un misuratore di potenza digitale che è configurabile per vari tipi di alimentatori. Il misuratore impiega sonde di tensione in combinazione con pinze amperometriche, ciò consente il calcolo del grado di sovrapposizione tra le curve sinusoidali di tensione e corrente e quindi consente la determinazione del fattore di potenza della fase, questo è fondamentale per la misurazione accurata della potenza reale, che è il fattore determinante del consumo di energia elettrica.



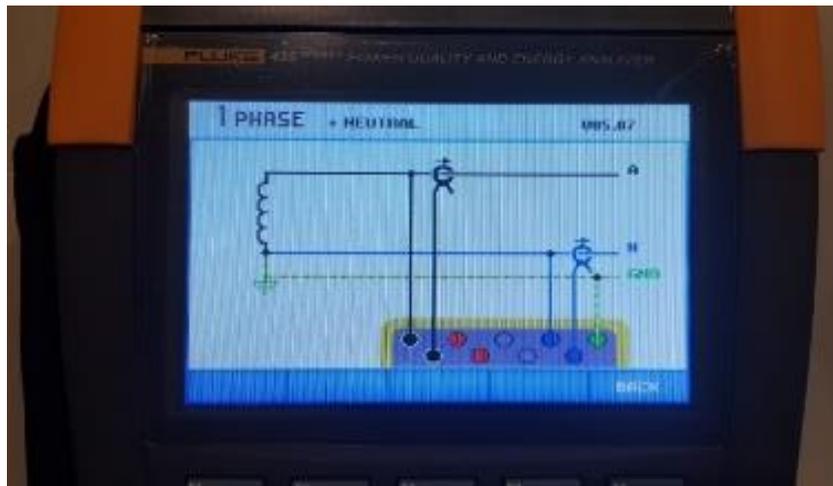
*Figura 15 Misuratore di potenza Fluke 435 serie II in funzione su Stratasys F370*

Oltre ad essere riconfigurabile per diversi collegamenti elettrici, il Fluke 435 serie II consente di regolare la risoluzione temporale dei dati aggregati in uscita che è stato impostato pari a 1 s.

L'analisi numerica e grafica di base dei dati di consumo energetico è stata eseguita con il pacchetto di fogli di calcolo standard Microsoft Excel. Mentre, per consultare i file di output in formato di dati

binario \*.fpqo è stato utilizzato il software proprietario di analisi di potenza PowerLog 430-II (fornito dal produttore del misuratore) per esportare i dati nel comune formato foglio \*.xls.

Il Fluke 435 serie II è in grado di raccogliere dati utilizzando otto sonde, quattro sonde di tensione e quattro pinze amperometriche, ma negli esperimenti di monitoraggio della potenza la connessione utilizzata in ciascun esperimento è monofase con neutro e messa a terra, in Figura 16. La misurazione di potenza è stata effettuata dall'alimentazione principale del sistema AM, tramite due sonde di tensione e tre pinze di corrente.



*Figura 16 Configurazione circuito monofase con neutro e messa a terra*

La principale variabile di interesse nei dati di monitoraggio della potenza è il consumo di energia reale. Oltre a fornire informazioni sui livelli assoluti di consumo energetico, i dati possono essere utilizzati per valutare la distribuzione del consumo energetico reale in tutte le build, ovvero, identificare le principali fasi del processo.

Per determinare il profilo energetico, quindi, si è proceduto come segue. Si è calcolato l'integrale della Potenza Attiva Totale Media (W) ottenendo il valore dell'Energia Istantanea (J) per ogni intervallo di tempo di 1 sec. Sommando i singoli contributi di energia istantanea nell'intero periodo di osservazione si è ottenuta l'Energia Totale Assorbita (J).

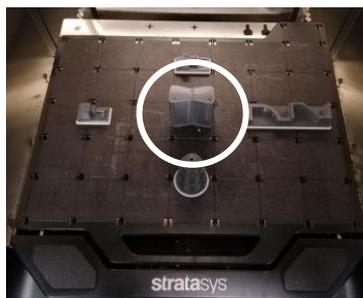
## 2.5. Sistema di acquisizione delle masse

Per l'acquisizione dei valori delle masse dei campioni è stata utilizzata una bilancia Gibertini 1000HR-CM con risoluzione 0,01 g, in Figura 17. Ogni campione è stato separato dalla propria base di supporto, una piastra di base rettangolare per i campioni A, B e C e una piastra di base circolare per il campione D. In seguito, di ogni singolo pezzo, componente e relativa base, è stata misurata la massa. Tale operazione è stata ripetuta per tre volte, una per ogni orientamento nello spazio tridimensionale, al fine di includere la variabilità intrinseca dello strumento di misura.



*Figura 17 Bilancia Gibertini 1000HR-CM*

Il valore di massa finale per ogni componente è stato calcolato come media aritmetica dei valori acquisiti per ogni orientamento. Si ottengono così i valori delle tre masse per ogni singolo pezzo ( $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$ ), il valore medio ( $\bar{m}$ ) e in fine il valore della massa della massa totale dell'intero job ( $\bar{m}_{TOT}$ ). Per quanto riguarda il campione di D, nel peso è compresa la massa dei supporti per la Stratasys Dimension Elite e la Stratasys F370. Inoltre, quest'ultima rispetto alle altre due stampanti FDM durante la produzione dei campioni, effettua lo spurgo ( $m_S$ ), ovvero, per ogni layer stampato effettua una pulizia dell'estrusore, creando così il perimetro di un componente che si sviluppa in altezza per tutti i layers del job, in Figura 18.



*Figura 18 Spurgo realizzato dalla Stratasys F370 (Job 4)*

## 2.6. Macchina di misura a coordinate (CMM)

Per ottenere i valori delle dimensioni principali dei campioni di riferimento è stata utilizzata una macchina di misura a coordinate (CMM), la DEA IOTA 0101 presente presso il laboratorio Integrated Additive Manufacturing (IAM) del Politecnico di Torino, in Figura 19.



*Figura 19 Macchina di misura a coordinate (Hexagon DEA IOTA 0101)*

I campioni di riferimento non sono stati sottoposti a nessuna operazione di post-trattamento, per evitare di alterare le superfici o le dimensioni, così da poter valutare con la macchina CMM le reali condizioni di fabbricazione e determinare l'entità dello scostamento tra le dimensioni reali dei campioni e quelle nominali.

La macchina di misura a coordinate ha una struttura verticale a portale mobile ed è dotata all'estremità di un sensore d'ispezione, ovvero, un tastatore da contatto costituito da una punta sferica in rubino che è collegato da uno stilo tramite un meccanismo al corpo fissato sulla testa della macchina. L'operatore è in grado di movimentare la macchina lungo l'asse xyz tramite una periferica di controllo, un joystick. Infatti, l'accensione della macchina l'operatore deve effettuare la calibrazione del tastatore, possibile grazie alla presenza di un oggetto di riferimento, una sfera.

Per effettuare l'ispezione dei campioni è sufficiente una configurazione unica della sonda CMM, con il tastatore in posizione ortogonale al piano di base, solo per il campione D sono necessarie le altre configurazioni della sonda: l'asse del tastatore ruota di 90° e si posiziona parallelamente al piano di lavoro.

Prima di procedere alla fase dell'allineamento del sistema, l'oggetto deve essere opportunamente fermato con l'ausilio di una staffa, onde evitare movimenti che compromettano i risultati dell'analisi dimensionale. Si procede con l'allineamento del sistema di riferimento della macchina con quello dell'oggetto, utilizzando il “Sistema 3,2,1 – piano, linea, punto”, ovvero l'operatore tramite il joystick, sposta il tastatore sul pezzo, individuando minimo 3 punti sul piano xy, ovvero su un piano normale all'asse z, 2 punti lungo l'asse y e 1 punto lungo l'asse x.

A questo punto, terminato l'allineamento, la macchina, precedentemente programmata, procede con le effettive misurazioni dei punti lungo il pezzo, ottenendo le misure delle coordinate e il software della macchina valuta le deviazioni tra le posizioni misurate e quelle teoriche per le coordinate X, Y, Z.

Per ogni campione sono state eseguite tre repliche d'ispezione, di seguito, nell'analisi dei risultati per la valutazione dei gradi IT si tiene in considerazione il valore medio delle tre repliche per ciascun componente.

### 3. Analisi dei risultati: profili acquisizioni, energia e masse

Nel seguente capitolo vengono illustrati i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati di input acquisiti dalle misurazioni effettuate con il misuratore di potenza e la bilancia. Per ogni macchina FDM viene presentato il profilo di corrente di un job esemplificativo, posto come modello schematico per la singola macchina. Successivamente, si presentano i valori di consumo energetico e di tempo di processo, suddivisi nelle principali sottofasi di lavorazione identificate, e infine, vengono riportati i valori delle masse acquisite.

#### 3.1. Profilo di corrente

Per analizzare la fase di costruzione è stato utilizzato l'andamento della Corrente Attiva Media (A), in Figura 20 la Makerbot Replicator, in Figura 21 la Stratasys Dimension Elite e in Figura 22 la Stratasys F370.

Il profilo di corrente è stato suddiviso in cinque fasi: quattro fasi di settaggio e la fase di realizzazione del processo di stampa vero e proprio. Gli intervalli individuati equivalgono a:

- $t_1$ , accensione della macchina
- $t_2$ , fase inattiva #1
- $t_3$ , riscaldamento della camera di lavoro e calibrazione degli assi
- $t_4$ , fase di stampa
- $t_5$ , fase inattiva #2

La fase (2) della Stratasys Dimension Elite non è nel profilo di corrente riportato, perché nelle misurazioni non è mai presente, dato che, non vi è mai stata attesa dopo l'accensione per l'avvio dello start job.

La fase (3) della Stratasys F370 presenta un tempo di processo differente per ogni job, poiché la stampante FDM effettua dei processi di calibrazione ogni volta diversi e dipendenti dal livello di manutenzione della macchina nel momento di avvio di un job: dai dati raccolti si è rilevato  $t_{3, \min}$  pari a 45.0 min e  $t_{3, \max}$  pari a 133.0 min. Poiché si è riscontrato questo problema in alcuni job, dovuto appunto alle manutenzioni della macchina, si utilizza come valori di riferimento, per tutti i job, un tempo di processo  $t_3$  pari a 23.0 min e un consumo energetico  $E_3$  pari a 319.1 Wh, relativi ad uno stato di manutenzione della macchina ottimale.

Per tutte le fasi di inattività, di tutte le macchine FDM, è stato scelto un tempo di processo standard di 1.5 min, questo in modo cautelativo, poiché le fasi di inattività sono fasi di durata breve in cui la

macchina è in stand-by e attende l'operatore che dia l'input per l'avvio della stampa (fase inattiva #1) e per lo spegnimento della macchina (fase inattiva #2).

Dato che, il profilo di corrente della fase (5) delle due macchine Stratasys non è costante, è stato necessario ricavare il valore della potenza media integrale, considerando un intervallo di dati significativi, e questa moltiplicata per il tempo di 1.5 min ha restituito il valore di riferimento dell'energia.

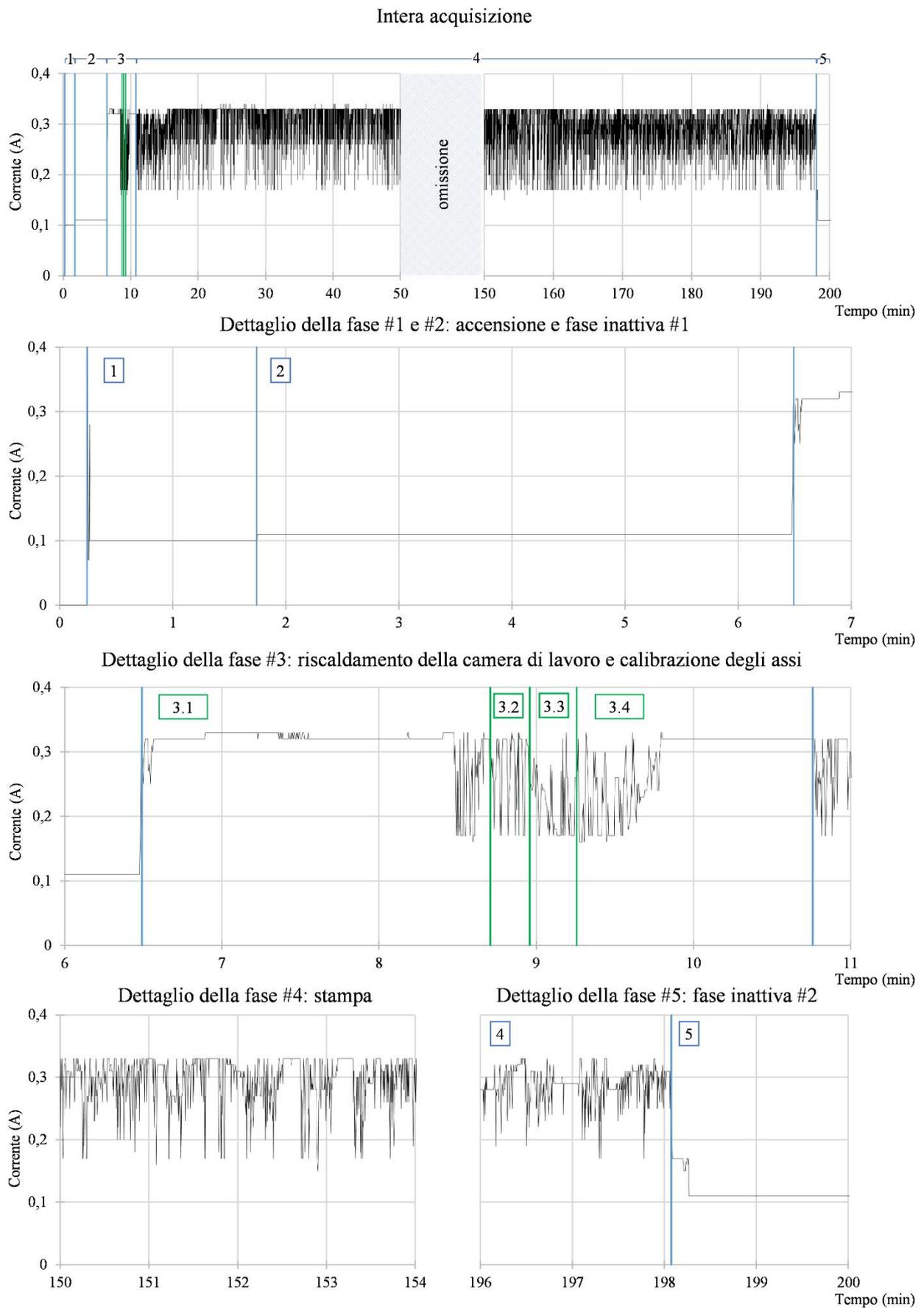


Figura 20 Acquisizione dati e identificazione delle principali fasi del processo (Makerbot Replicator Job 1)

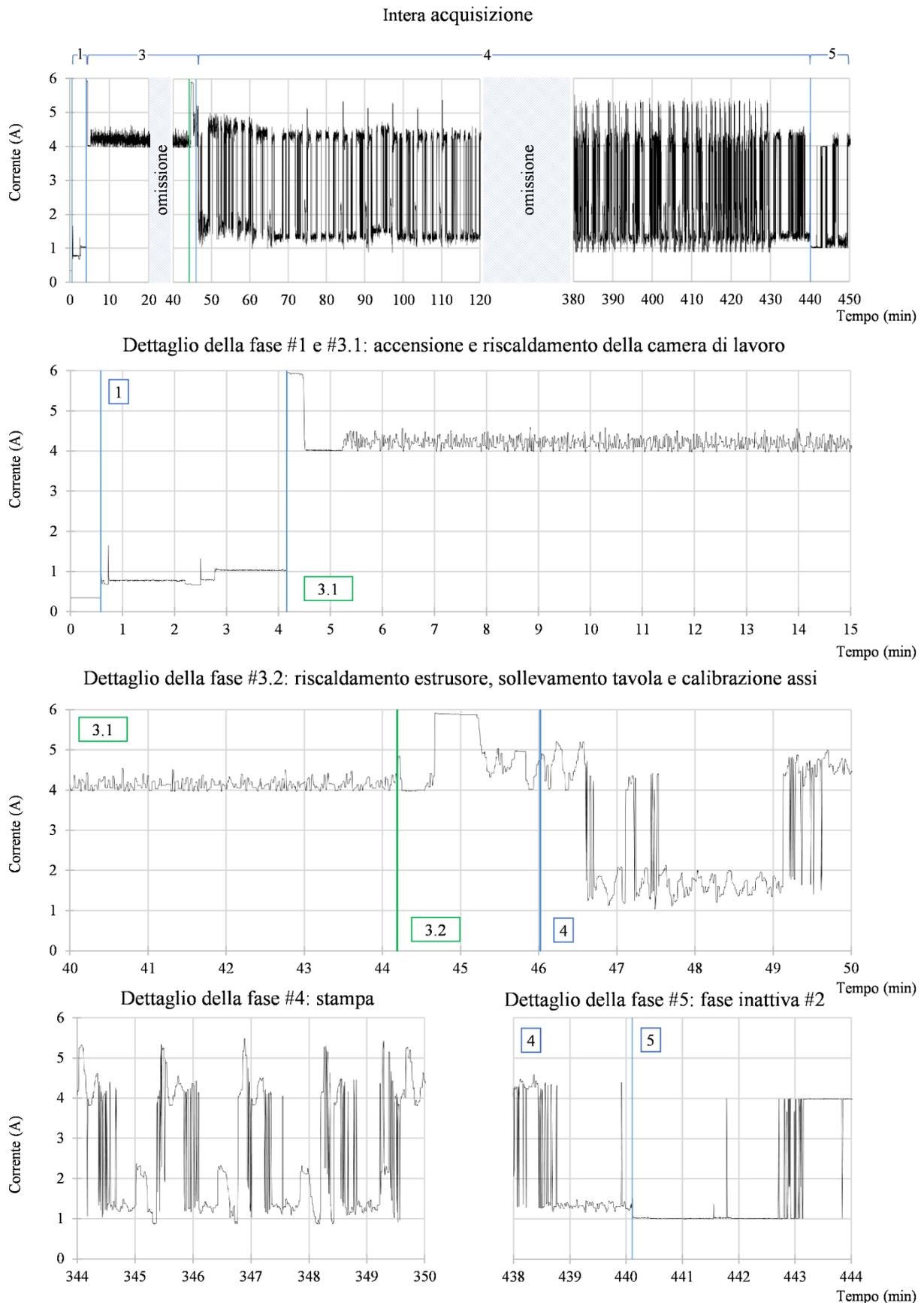


Figura 21 Acquisizione dati e identificazione delle principali fasi del processo (Stratasys Dimension Elite Job 3)

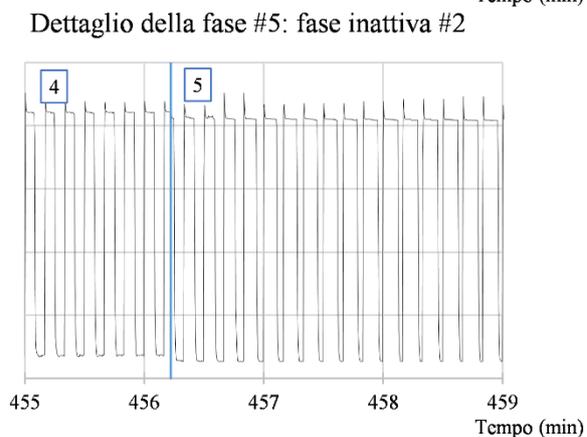
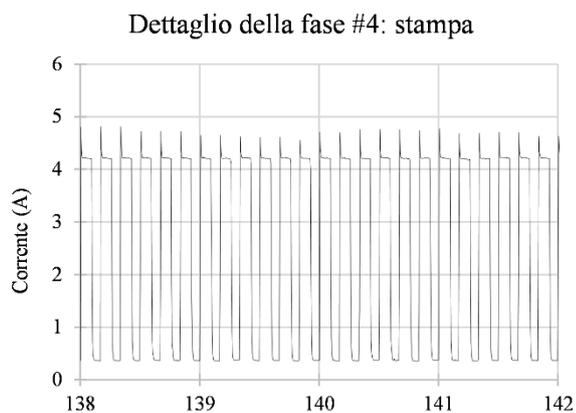
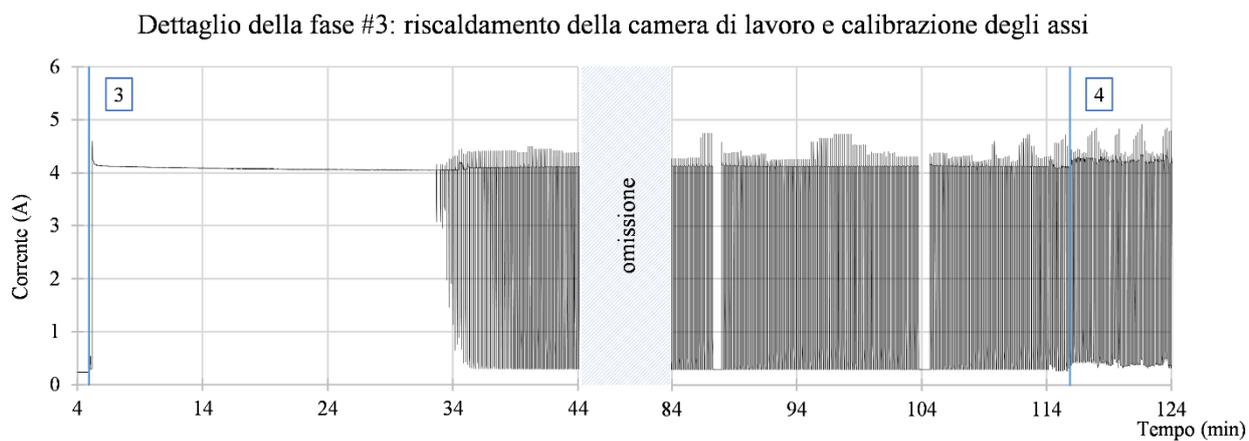
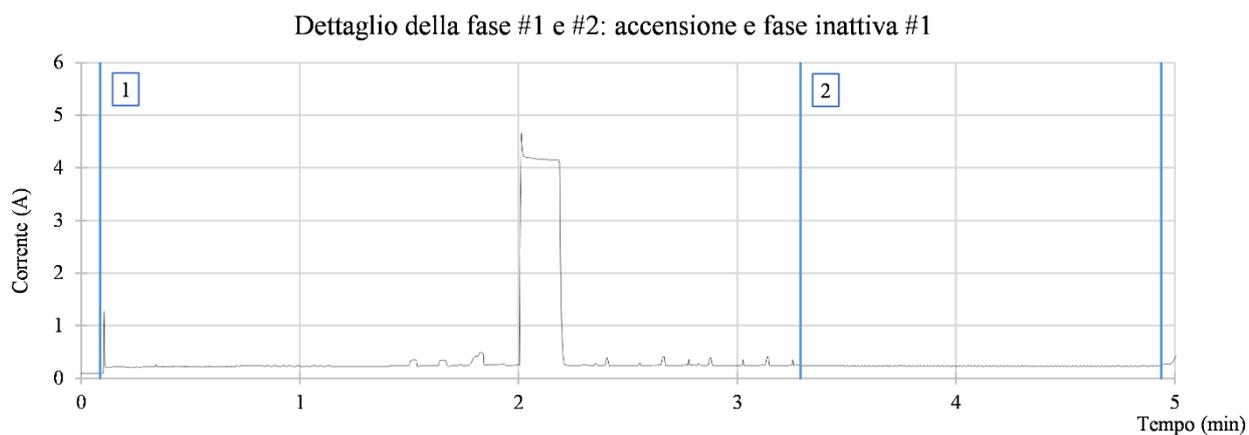
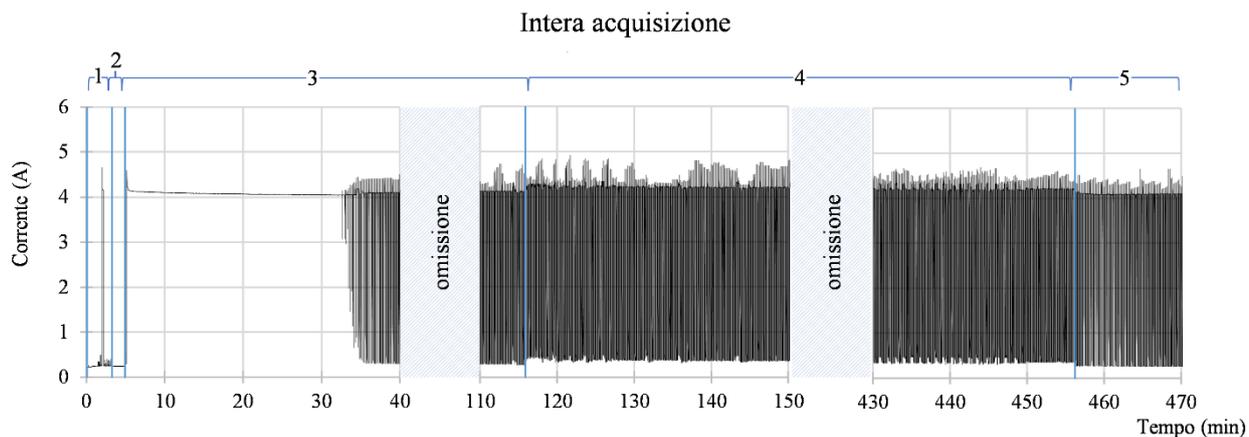


Figura 22 Acquisizione dati e identificazione delle principali fasi del processo (Stratasys F370 Job 7)

### 3.2.Dati di energia e tempo

In Tabella 5 sono riportati i valori medi di Energia Cumulata (Wh) per le fasi di non deposizione, suddivisa per intervalli di tempo di lavorazione:

- Makerbot Replicator

È possibile suddividere la fase (3) in ulteriori quattro sottofasi:

Fase	Tempo di processo (min)	Consumo energetico (Wh)
(1) accensione della macchina	1.5	0.0
(2) inattiva #1	1.5	0.3
(3) riscaldamento della camera di lavoro e calibrazione degli assi	3.9 [3.2-4.6]	3.4 [2.3-4.4]
(3.1) riscaldamento fino a 180°	1.8 [1.1-2.5]	1.7 [1.1-2.4]
(3.2) movimentazione assi	0.3	0.2
(3.3) movimentazione tavola	0.3	0.2
(3.4) riscaldamento fino a 225° e fase di spurgo	1.5	1.2 [0.8-1.6]
(5) inattiva #2	1.5	0.3

- Stratasys Dimension Elite

È possibile suddividere la fase (3) in ulteriori due sottofasi:

Fase	Tempo di lavorazione (min)	Consumo energetico (Wh)
(1) accensione della macchina	3.6	8.4
(2) inattiva #1	1.5	12.0
(3) riscaldamento della camera di lavoro e calibrazione degli assi	41.9	662.0 [656.8-667.3]
(3.1) riscaldamento della camera di lavoro	40.0	628.2
(3.2) riscaldamento estrusore, sollevamento tavola e calibrazione assi	1.8	33.78 [28.6-39.0]
(5) inattiva #2	1.5	12.0

- Stratasys F370

Fase	Tempo di lavorazione (min)	Consumo energetico (Wh)
(1) accensione della macchina	3.3	4.3
(2) inattiva #1	1.5	0.9
(3) riscaldamento della camera di lavoro e calibrazione degli assi	23.0 [20.9-24.4]	319.1 [287.8-340.2]
(5) inattiva #2	1.5	11.9

*Tabella 4 Contributi del tempo di processo e del consumo energetico dovuti alle fasi di non deposizione*

Per quanto riguarda la fase di stampa, in Tabella 5 vengono riportati i valori del tempo di processo (min) e del consumo energetico (Wh) per ogni job di ogni macchina:

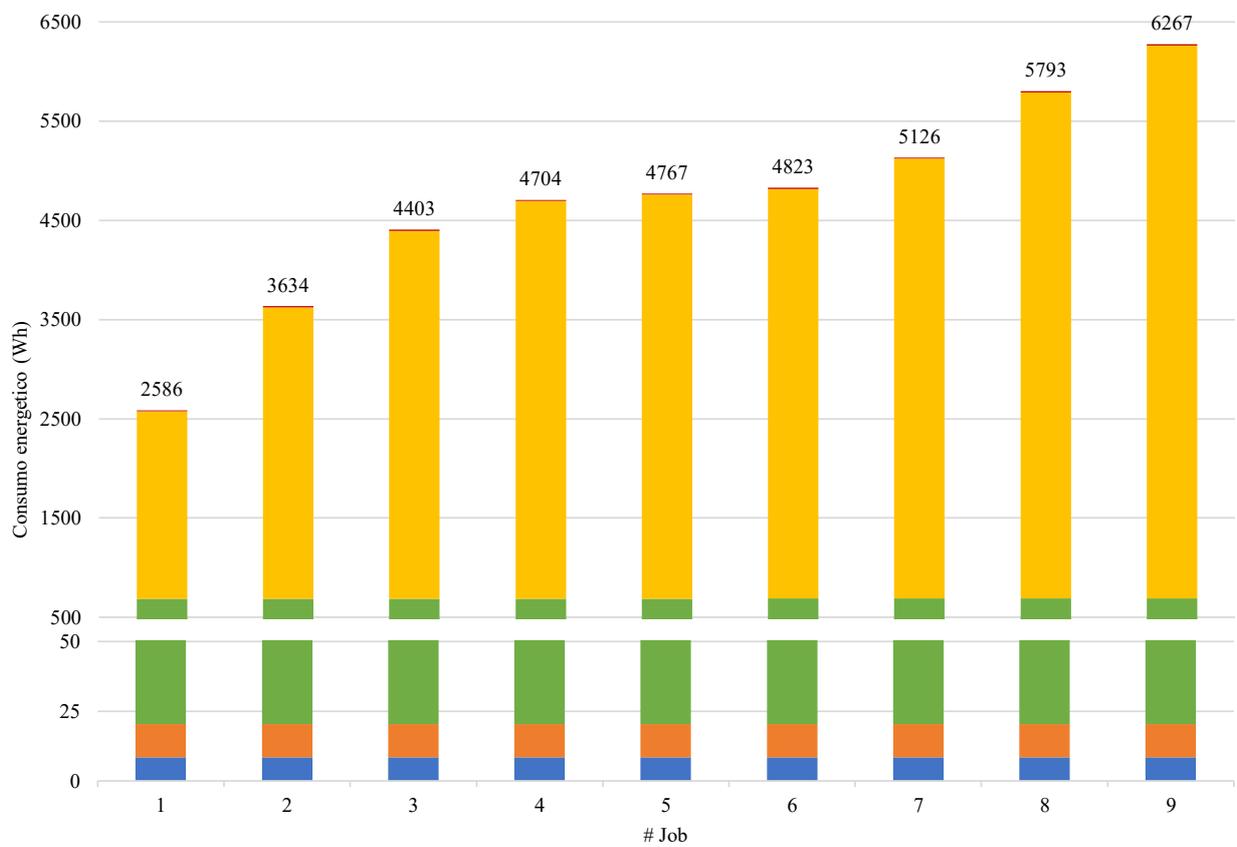
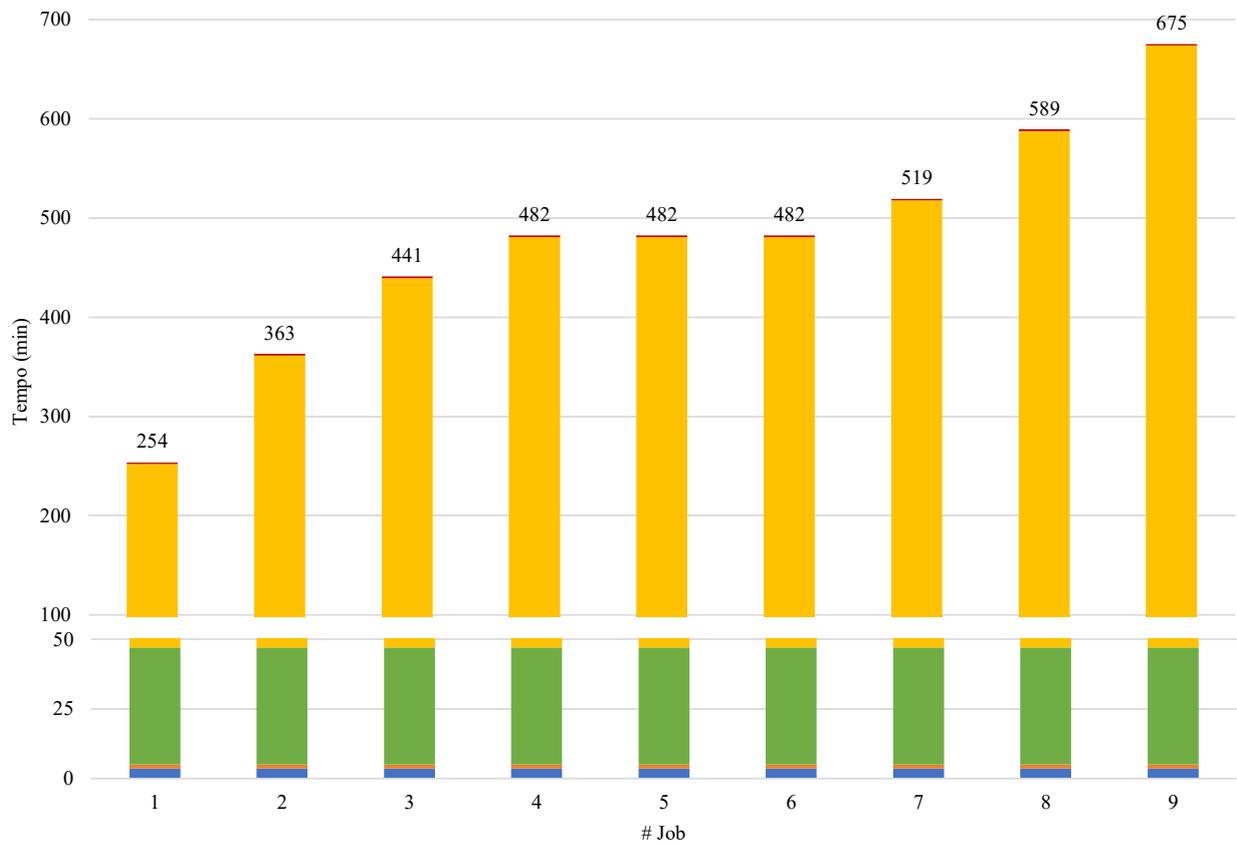
Macchina	Job	Tempo di lavorazione (min)	Consumo energetico (Wh)
Makerbot Replicator	1	186.6	182.2
	2	233.4	228.2
	3	308.4	300.4
	4	344.9	337.7
	5	344.9	337.1
	6	344.9	336.8
	7	380.6	372.4
	8	455.3	444.5
	9	505.2	493.6
Stratasys Dimension Elite	1	206.6	1891.3
	2	316.1	2939.4
	3	394.1	3708.8
	4	435.4	4009.2
	5	435.3	4072.7
	6	435.3	4128.7
	7	472.3	4431.9
	8	542.2	5098.3
	9	628.3	5572.2
Stratasys F370	1	131.6	1120.7
	2	241.9	1987.7
	3	280.5	2150.7
	4	307.3	2523.2
	5	306.9	2424.7
	6	306.8	2422.8
	7	340.3	2858.8
	8	382.5	3223.7
	9	421.5	3602.6

*Tabella 5 Contributi del tempo di lavorazione e del consumo di energia elettrica relativi alle fasi di stampa*

Di seguito, le Figure 17-18-19 presentano i contributi fissi e relativi alla fase 4 per ogni job e per ogni macchina. In questa rappresentazione vengono raffigurati i contributi del tempo di lavorazione e del consumo di energia elettrica relativi alle fasi di non deposizione (Tabella 4) e alle fasi di stampa (Tabella 5).



Figura 23 Risultati Makerbot Replicator: tempo di processo (in alto) e consumo energetico (in basso)



Leggenda: ■  $t_1, E_1$  ■  $t_2, E_2$  ■  $t_3, E_3$  ■  $t_4, E_4$  ■  $t_5, E_5$

Figura 24 Risultati Stratasys Dimension Elite: tempo di processo (in alto) e consumo energetico (in basso)



Figura 25 Risultati Stratasys F370: tempo di processo (in alto) e consumo energetico (in basso)

### 3.3.Masse per ogni job/componente/spurgo eventuale

Nel seguente paragrafo vengono illustrati i valori delle masse delle parti fabbricate con le tre macchine FDM: Makerbot Replicator, Stratasys Dimension Elite e Stratasys F370, rispettivamente in Tabella 6, Tabella 7 e Tabella 8.

Per ogni singolo pezzo, viene suddiviso il componente dalla relativa base, e vengono riportati i valori ottenuti dalle tre misurazioni di pesatura ( $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$ ), il valore medio ( $\bar{m}$ ) e in fine il valore della massa della massa totale dell'intero job ( $\bar{m}_{TOT}$ ). Per quanto riguarda il campione di D, nel peso è compresa la massa dei supporti per la Stratasys Dimension Elite e la Stratasys F370. Inoltre, per quest'ultima è riportato il valore della massa dello spurgo ( $m_S$ ).

- Makerbot Replicator

<i>Job</i>	<i>Tipo pezzo</i>	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$\bar{m}$	$\bar{m}_{TOT}$
1	componente A	5.01	5.01	5.01	5.01	35.88
	base A	1.42	1.43	1.43	1.43	
	componente B	5.64	5.64	5.64	5.64	
	base B	1.78	1.78	1.78	1.78	
	componente C	17.17	17.17	17.17	17.17	
	base C	4.86	4.85	4.85	4.85	
2	componente A	5.06	5.05	5.06	5.06	34.88
	base A	1.48	1.48	1.48	1.48	
	componente B	5.66	5.66	5.66	5.66	
	base B	1.78	1.78	1.78	1.78	
	componente D	19.13	19.13	19.12	19.13	
	base D	1.78	1.78	1.78	1.78	
3	componente B	5.68	5.68	5.68	5.68	50.34
	base B	1.77	1.78	1.77	1.77	
	componente C	17.14	17.14	17.14	17.14	
	base C	4.84	4.83	4.83	4.83	
	componente D	19.17	19.16	19.16	19.16	
	base D	1.75	1.75	1.75	1.75	
4	componente A	5.07	5.07	5.06	5.07	57.18
	base A	1.49	1.49	1.49	1.49	
	componente B	5.68	5.68	5.68	5.68	
	base B	1.77	1.77	1.77	1.77	
	componente C	17.25	17.24	17.25	17.25	
	base C	4.88	4.88	4.88	4.88	
	componente D	19.23	19.22	19.22	19.22	
	base D	1.82	1.82	1.82	1.82	
5	componente A	5.05	5.05	5.05	5.05	56.84
	base A	1.49	1.49	1.49	1.49	
	componente B	5.65	5.64	5.64	5.64	
	base B	1.76	1.76	1.76	1.76	

<i>Job</i>	<i>Tipo pezzo</i>	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$\bar{m}$	$\bar{m}_{TOT}$
5	componente C	17.12	17.12	17.13	17.12	56.84
	base C	4.85	4.84	4.85	4.85	
	componente D	19.11	19.11	19.11	19.11	
	base D	1.82	1.81	1.81	1.81	
6	componente A	5.04	5.05	5.05	5.05	56.88
	base A	1.50	1.50	1.50	1.50	
	componente B	5.64	5.65	5.65	5.65	
	base B	1.78	1.78	1.78	1.78	
	componente C	17.15	17.14	17.15	17.15	
	base C	4.84	4.84	4.84	4.84	
	componente D	19.12	19.12	19.12	19.12	
base D	1.80	1.80	1.81	1.80		
7	componente A	5.07	5.07	5.07	5.07	56.88
	base A	1.47	1.47	1.47	1.47	
	componente B	5.71	5.71	5.71	5.71	
	base B	1.80	1.79	1.79	1.79	
	componente C	17.21	17.20	17.21	17.21	
	base C	4.90	4.89	4.90	4.90	
	componente D	19.19	19.19	19.19	19.19	
	base D	1.81	1.80	1.80	1.80	
	componente replica A	5.04	5.04	5.04	5.04	
base replica A	1.43	1.43	1.44	1.43		
8	componente A	5.04	5.05	5.05	5.05	79.27
	base A	1.46	1.46	1.46	1.46	
	componente B	5.70	5.70	5.71	5.70	
	base B	1.79	1.80	1.79	1.79	
	componente C	17.20	17.21	17.21	17.21	
	base C	4.88	4.88	4.88	4.88	
	componente D	19.24	19.24	19.23	19.24	
	base D	1.81	1.81	1.81	1.81	
	componente replica C	17.25	17.25	17.25	17.25	
base replica C	4.88	4.88	4.88	4.88		
9	componente A	5.06	5.06	5.06	5.06	78.11
	base A	1.45	1.45	1.45	1.45	
	componente B	5.69	5.70	5.70	5.70	
	base B	1.80	1.80	1.80	1.80	
	componente C	17.26	17.26	17.26	17.26	
	base C	4.89	4.90	4.89	4.89	
	componente D	19.15	19.15	19.15	19.15	
	base D	1.81	1.81	1.81	1.81	
	componente replica D	19.19	19.19	19.19	19.19	
base replica D	1.79	1.80	1.80	1.80		

*Tabella 6 Masse Makerbot Replicator*

- Stratasys Dimension Elite

<i>Job</i>	<i>Tipo pezzo</i>	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$\bar{m}$	$\bar{m}_{TOT}$
1	componente A	4.42	4.42	4.42	4.42	28.66
	base A	1.12	1.12	1.12	1.12	
	componente B	4.78	4.78	4.78	4.78	
	base B	1.35	1.35	1.35	1.35	
	componente C	13.25	13.24	13.25	13.24	
	base C	3.76	3.76	3.76	3.76	
2	componente A	4.36	4.36	4.36	4.36	29.55
	base A	1.12	1.12	1.12	1.12	
	componente B	4.71	4.71	4.71	4.71	
	base B	1.35	1.35	1.35	1.35	
	componente D	16.57	16.57	16.57	16.64	
	base D	1.38	1.38	1.38	1.38	
3	componente B	4.71	4.71	4.71	4.71	40.90
	base B	1.35	1.35	1.35	1.35	
	componente C	13.11	13.11	13.11	13.11	
	base C	3.76	3.76	3.76	3.76	
	componente D	16.60	16.60	16.60	16.60	
	base D	1.38	1.38	1.38	1.38	
4	componente A	4.38	4.38	4.38	4.38	46.78
	base A	1.12	1.12	1.12	1.12	
	componente B	4.74	4.74	4.74	4.74	
	base B	1.35	1.35	1.35	1.35	
	componente C	13.16	13.16	13.16	13.16	
	base C	3.76	3.76	3.76	3.76	
	componente D	16.90	16.90	16.90	16.90	
base D	1.38	1.38	1.38	1.38		
5	componente A	4.39	4.39	4.39	4.39	46.73
	base A	1.12	1.12	1.12	1.12	
	componente B	4.76	4.76	4.76	4.76	
	base B	1.35	1.35	1.35	1.35	
	componente C	13.21	13.21	13.21	13.21	
	base C	3.76	3.76	3.76	3.76	
	componente D	16.70	16.70	16.70	16.77	
	base D	1.38	1.38	1.38	1.38	

<i>Job</i>	<i>Tipo pezzo</i>	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$\bar{m}$	$\bar{m}_{TOT}$
6	componente A	4.35	4.35	4.35	4.35	46.44
	base A	1.12	1.12	1.12	1.12	
	componente B	4.72	4.72	4.72	4.72	
	base B	1.35	1.35	1.35	1.35	
	componente C	13.10	13.10	13.10	13.10	
	base C	3.76	3.76	3.76	3.76	
	componente D	16.59	16.59	16.59	16.66	
	base D	1.38	1.38	1.38	1.38	
7	componente A	4.36	4.36	4.36	4.36	51.95
	base A	1.12	1.12	1.12	1.12	
	componente B	4.73	4.73	4.73	4.73	
	base B	1.35	1.35	1.35	1.35	
	componente C	13.14	13.14	13.14	13.14	
	base C	3.76	3.76	3.76	3.76	
	componente D	16.56	16.56	16.56	16.63	
	base D	1.38	1.38	1.38	1.38	
	componente replica A	4.37	4.37	4.37	4.37	
	base replica A	1.12	1.12	1.12	1.12	
8	componente A	4.36	4.36	4.36	4.36	63.32
	base A	1.12	1.12	1.12	1.12	
	componente B	4.72	4.72	4.72	4.72	
	base B	1.35	1.35	1.35	1.35	
	componente C	13.12	13.12	13.12	13.12	
	base C	3.76	3.76	3.76	3.76	
	componente D	16.58	16.58	16.58	16.65	
	base D	1.38	1.38	1.38	1.38	
	componente replica C	13.11	13.11	13.11	13.11	
	base replica C	3.76	3.76	3.76	3.76	
9	componente A	4.39	4.39	4.39	4.39	64.97
	base A	1.12	1.12	1.12	1.12	
	componente B	4.75	4.75	4.75	4.75	
	base B	1.35	1.35	1.35	1.35	
	componente C	13.22	13.22	13.22	13.22	
	base C	3.76	3.76	3.76	3.76	
	componente D	16.84	16.84	16.84	16.84	
	base D	1.38	1.38	1.38	1.38	
	componente replica D	16.79	16.79	16.79	16.79	
	base replica D	1.38	1.38	1.38	1.38	

*Tabella 7 Masse Stratasys Dimension Elite*

- Stratasys F370

<i>Job</i>	<i>Tipo pezzo</i>	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$\bar{m}$	$\bar{m}_{TOT}$	$m_S$
1	componente A	4.78	4.78	4.79	4.78	31.20	0.63
	base A	1.14	1.14	1.14	1.14		
	componente B	5.22	5.22	5.22	5.22		
	base B	1.38	1.38	1.38	1.38		
	componente C	14.19	14.19	14.19	14.19		
	base C	3.86	3.86	3.86	3.86		
2	componente A	4.82	4.83	4.82	4.82	39.78	5.89
	base A	1.14	1.14	1.14	1.14		
	componente B	5.22	5.22	5.22	5.22		
	base B	1.38	1.38	1.38	1.38		
	componente D	19.87	19.87	19.87	19.87		
	base D	1.45	1.45	1.45	1.45		
3	componente B	5.28	5.28	5.28	5.28	51.93	5.89
	base B	1.38	1.38	1.38	1.38		
	componente C	14.22	14.22	14.22	14.22		
	base C	3.86	3.86	3.86	3.86		
	componente D	19.85	19.85	19.85	19.85		
	base D	1.45	1.45	1.45	1.45		
4	componente A	4.81	4.81	4.81	4.81	57.74	5.89
	base A	1.14	1.14	1.14	1.14		
	componente B	5.21	5.21	5.21	5.21		
	base B	1.38	1.38	1.38	1.38		
	componente C	14.13	14.13	14.13	14.13		
	base C	3.86	3.86	3.86	3.86		
	componente D	19.87	19.86	19.86	19.86		
base D	1.45	1.45	1.45	1.45			
5	componente A	4.85	4.85	4.85	4.85	57.97	5.89
	base A	1.14	1.14	1.14	1.14		
	componente B	5.25	5.25	5.25	5.25		
	base B	1.38	1.38	1.38	1.38		
	componente C	14.26	14.26	14.26	14.26		
	base C	3.86	3.86	3.86	3.86		
	componente D	19.89	19.89	19.89	19.89		
	base D	1.45	1.45	1.45	1.45		

<i>Job</i>	<i>Tipo pezzo</i>	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$\bar{m}$	$\bar{m}_{TOT}$	$m_S$
6	componente A	4.83	4.83	4.83	4.83	57.75	5.89
	base A	1.14	1.14	1.14	1.14		
	componente B	5.20	5.20	5.20	5.20		
	base B	1.38	1.38	1.38	1.38		
	componente C	14.15	14.14	14.15	14.15		
	base C	3.86	3.86	3.86	3.86		
	componente D	19.85	19.86	19.85	19.85		
	base D	1.45	1.45	1.45	1.45		
7	componente A	4.81	4.81	4.81	4.81	63.59	5.89
	base A	1.14	1.14	1.14	1.14		
	componente B	5.21	5.20	5.21	5.21		
	base B	1.38	1.38	1.38	1.38		
	componente C	14.17	14.17	14.16	14.17		
	base C	3.86	3.86	3.86	3.86		
	componente D	19.78	19.78	19.78	19.78		
	base D	1.45	1.45	1.45	1.45		
	componente replica A	4.76	4.76	4.76	4.76		
	base replica A	1.14	1.14	1.14	1.14		
8	componente A	4.84	4.84	4.84	4.84	75.91	5.89
	base A	1.14	1.14	1.14	1.14		
	componente B	5.23	5.23	5.23	5.23		
	base B	1.38	1.38	1.38	1.38		
	componente C	14.22	14.22	14.22	14.22		
	base C	3.86	3.86	3.86	3.86		
	componente D	19.84	19.85	19.85	19.85		
	base D	1.45	1.45	1.45	1.45		
	componente replica C	14.19	14.19	14.19	14.19		
base replica C	3.86	3.86	3.86	3.86			
9	componente A	4.80	4.80	4.80	4.80	78.52	5.89
	base A	1.14	1.14	1.14	1.14		
	componente B	5.18	5.17	5.17	5.17		
	base B	1.38	1.38	1.38	1.38		
	componente C	14.07	14.07	14.07	14.07		
	base C	3.86	3.86	3.86	3.86		
	componente D	19.81	19.81	19.81	19.81		
	base D	1.45	1.45	1.45	1.45		
	componente replica D	19.49	19.49	19.49	19.49		
base replica D	1.45	1.45	1.45	1.45			

Tabella 8 Masse Stratasys F370

Di seguito, in Tabella 9, un'analisi puntuale sulla variabilità del valore delle masse prodotte per singolo componente e per singola macchina:

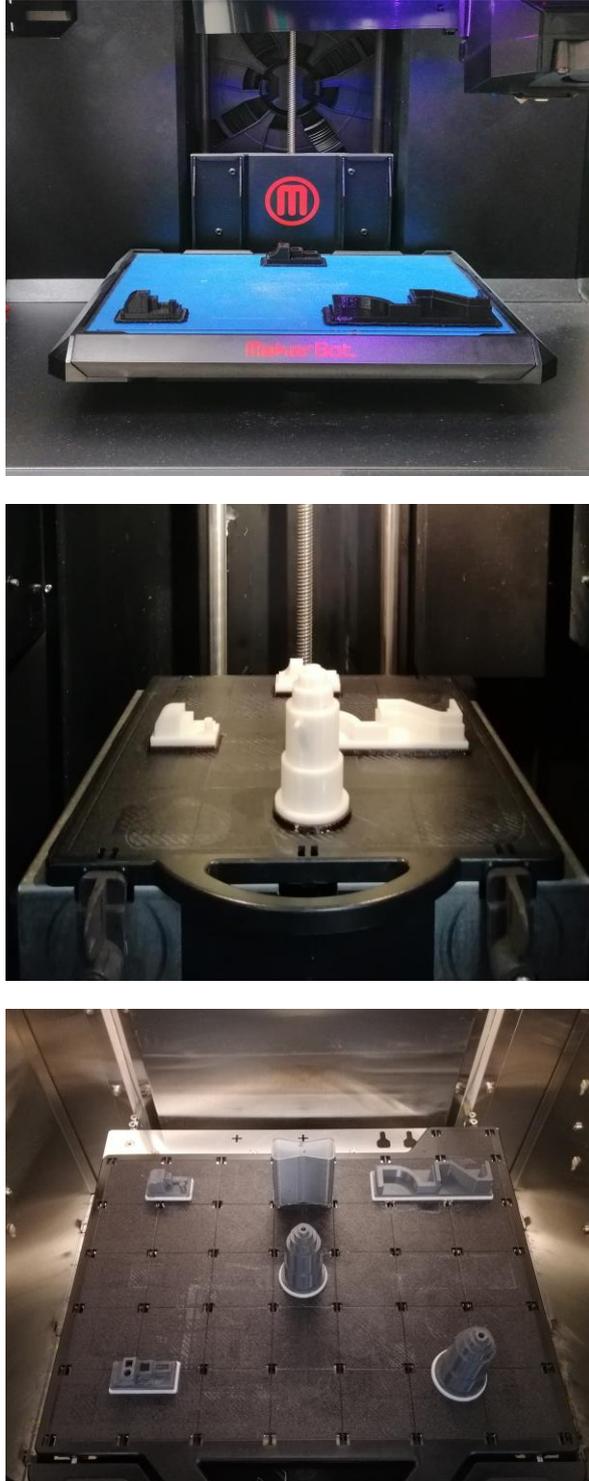
	Makerbot Replicator				Stratasys Dimension Elite				Stratasys F370			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	5.01	4.42	17.17	19.13	4.42	4.78	13.24	16.64	4.78	5.22	14.19	19.87
	5.06	4.36	17.14	19.16	4.36	4.71	13.11	16.60	4.82	5.22	14.22	19.85
	5.07	4.38	17.25	19.22	4.38	4.71	13.16	16.90	4.81	5.28	14.13	19.86
	5.05	4.39	17.12	19.11	4.39	4.74	13.21	16.77	4.85	5.21	14.26	19.89
	5.05	4.35	17.15	19.12	4.35	4.76	13.10	16.66	4.83	5.25	14.15	19.85
	5.07	4.36	17.21	19.19	4.36	4.72	13.14	16.63	4.81	5.20	14.17	19.78
	5.04	4.37	17.21	19.24	4.37	4.73	13.12	16.65	4.76	5.21	14.22	19.85
	5.05	4.36	17.25	19.15	4.36	4.72	13.11	16.84	4.84	5.23	14.19	19.81
	5.06	4.39	17.26	19.19	4.39	4.75	13.22	16.79	4.80	5.17	14.07	19.49
Media	5.05	4.38	17.19	19.17	4.38	4.73	13.16	16.72	4.81	5.22	14.18	19.81
Dev	0.02	0.02	0.05	0.05	0.02	0.03	0.05	0.11	0.03	0.03	0.06	0.12

*Tabella 9 Deviazione standard dei valori delle masse per singolo componente*

I dati mostrano una variabilità minima, infatti, i valori di deviazione standard nella maggior parte dei casi è dell'ordine di grandezza di  $10^{-2}$ . Di conseguenza, non vi sono variazioni in termini di massa prodotta al variare del Job.

#### 4. Analisi dei risultati: accuratezza dimensionale

In questo capitolo si elaborano i dati dei valori dimensionali dei 36 campioni prodotti con ciascuna macchina FDM, di cui in Figura 26 alcuni esempi, ottenuti tramite le macchine di misura a coordinate.



*Figura 26 Campioni prodotti (dall'alto verso il basso): Job#1 Makertbot Replicator, Job#5 Stratasys Dimension Elite e Job#9 Stratasys F370*

I risultati delle misurazioni delle caratteristiche geometriche delle repliche vengono utilizzati per valutare l'accuratezza dimensionale delle macchine confrontate in termini di gradi IT ISO: le tabelle UNI ISO 286-1 (Figura 27) prevedono 20 diverse posizioni delle tolleranze detti “gradi di tolleranze”, designati con la sigla IT e seguiti da un numero.

Nominal size mm		Standard tolerance grades																			
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Above	Up to and including	Standard tolerance values																			
		µm										mm									
—	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7

Figura 27 Valori dei gradi di tolleranza standard per dimensioni nominali fino a 500 mm [27]

I valori delle tolleranze standard corrispondenti ai gradi IT 5 - IT 18 per dimensioni nominali fino a 500 mm sono valutati attraverso il fattore di tolleranza standard  $i$  che è espresso in micrometri con la seguente formula:

$$i = 0.45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0.001 \cdot D$$

dove  $D$  è la media geometrica dell'intervallo di dimensioni nominali in millimetri:

$$D = \sqrt{D_1 \cdot D_2}$$

I gradi IT per il numero  $n$  di volte in cui il fattore di tolleranza  $i$  si adatta alla deviazione dimensionale. Ad esempio, il grado IT 10 corrisponde ad un minimo di  $160i$  con  $n = 64$ . Per una dimensione nominale generica  $D_{jn}$ , il numero  $n_j$  di unità di tolleranza viene calcolato come segue:

$$n_j = \frac{1000 \cdot |D_{jn} - D_{jm}|}{i}$$

dove  $D_{jm}$  è la dimensione misurata corrispondente.

Per ogni dimensione o distanza tra le caratteristiche, il valore  $n_j$  viene calcolato e attribuito all'intervallo di dimensioni di base ISO a cui appartiene la dimensione o la distanza. Si ottiene così una certa distribuzione di numeri di unità per ciascun intervallo ISO per le tre repliche. All'interno di ciascun intervallo il valore  $n$  corrispondente al 95° percentile della distribuzione è assunto come errore dimensionale massimo della macchina FDM per valutare l'accuratezza attraverso i gradi IT coerentemente con studi precedenti in letteratura [30].

I risultati sono riassunti in Figura 28 per il componente A, in Figura 29 il componente B, in Figura 30 il componente C, e infine, in Figura 31 il componente D.

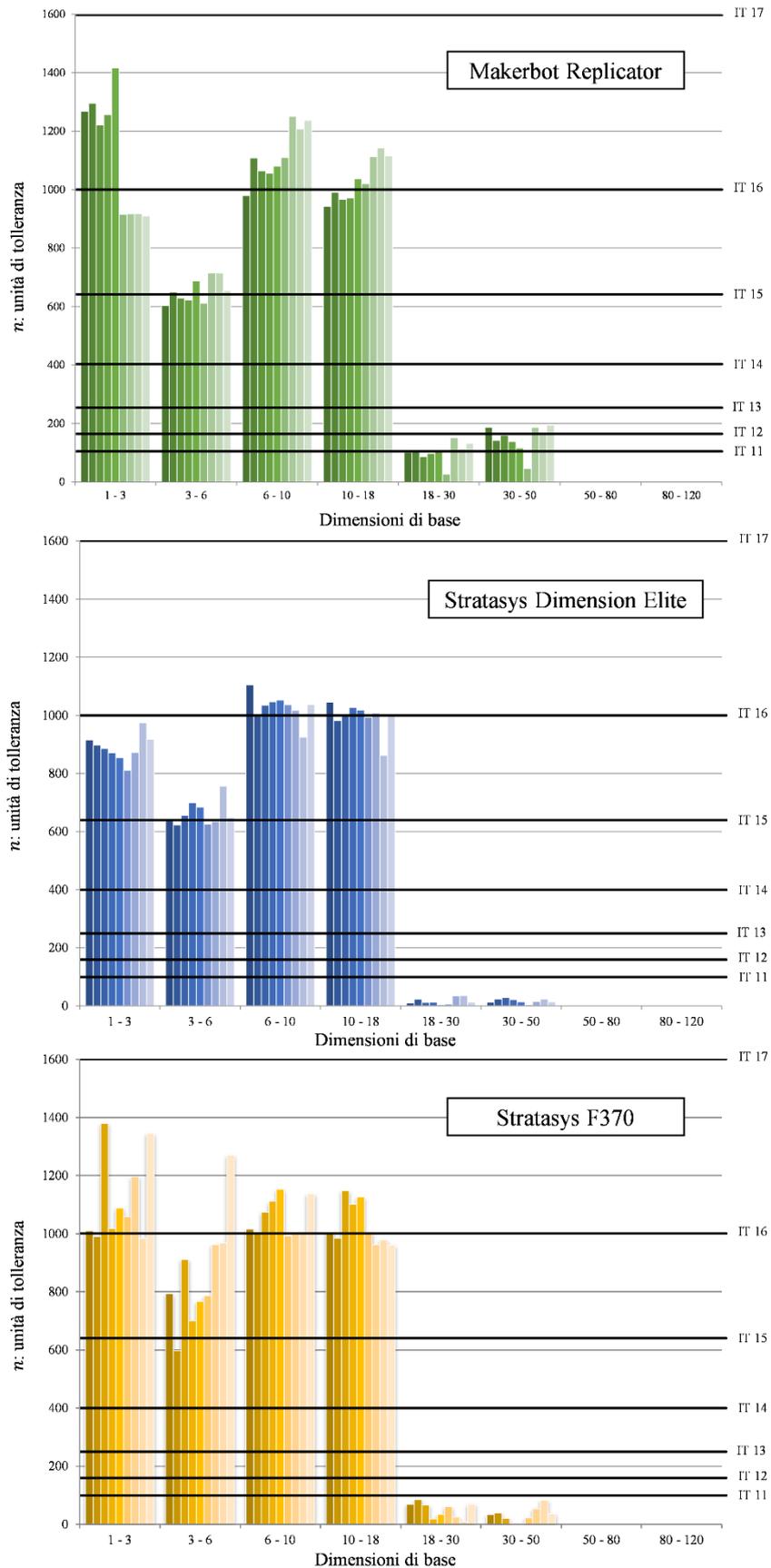


Figura 28 Precisione dimensionale (95° percentile) del campione di riferimento A confrontate in termini di gradi IT per diverse gamme di dimensioni di base ISO

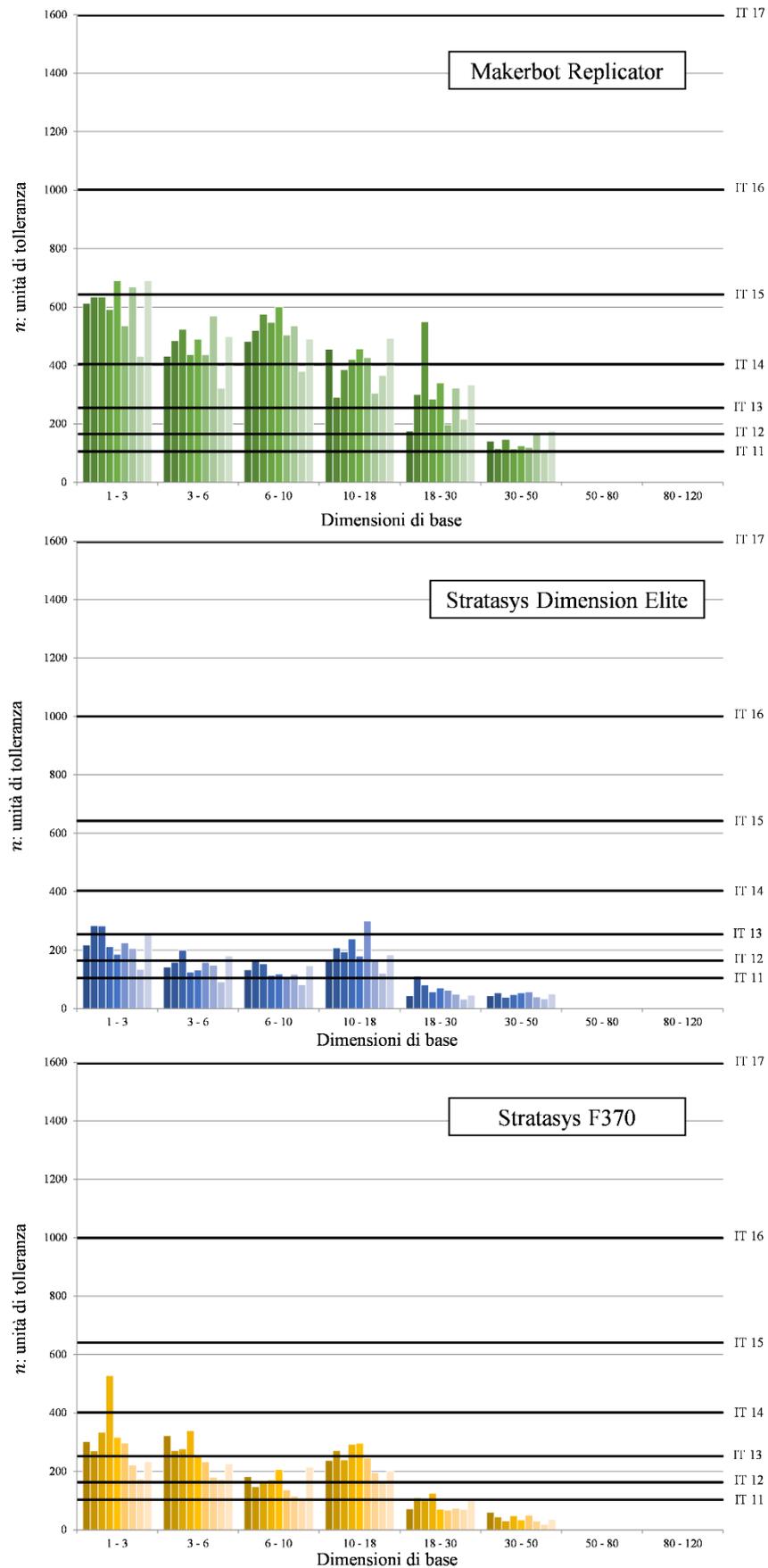


Figura 29 Precisione dimensionale (95° percentile) del campione di riferimento B confrontate in termini di gradi IT per diverse gamme di dimensioni di base ISO

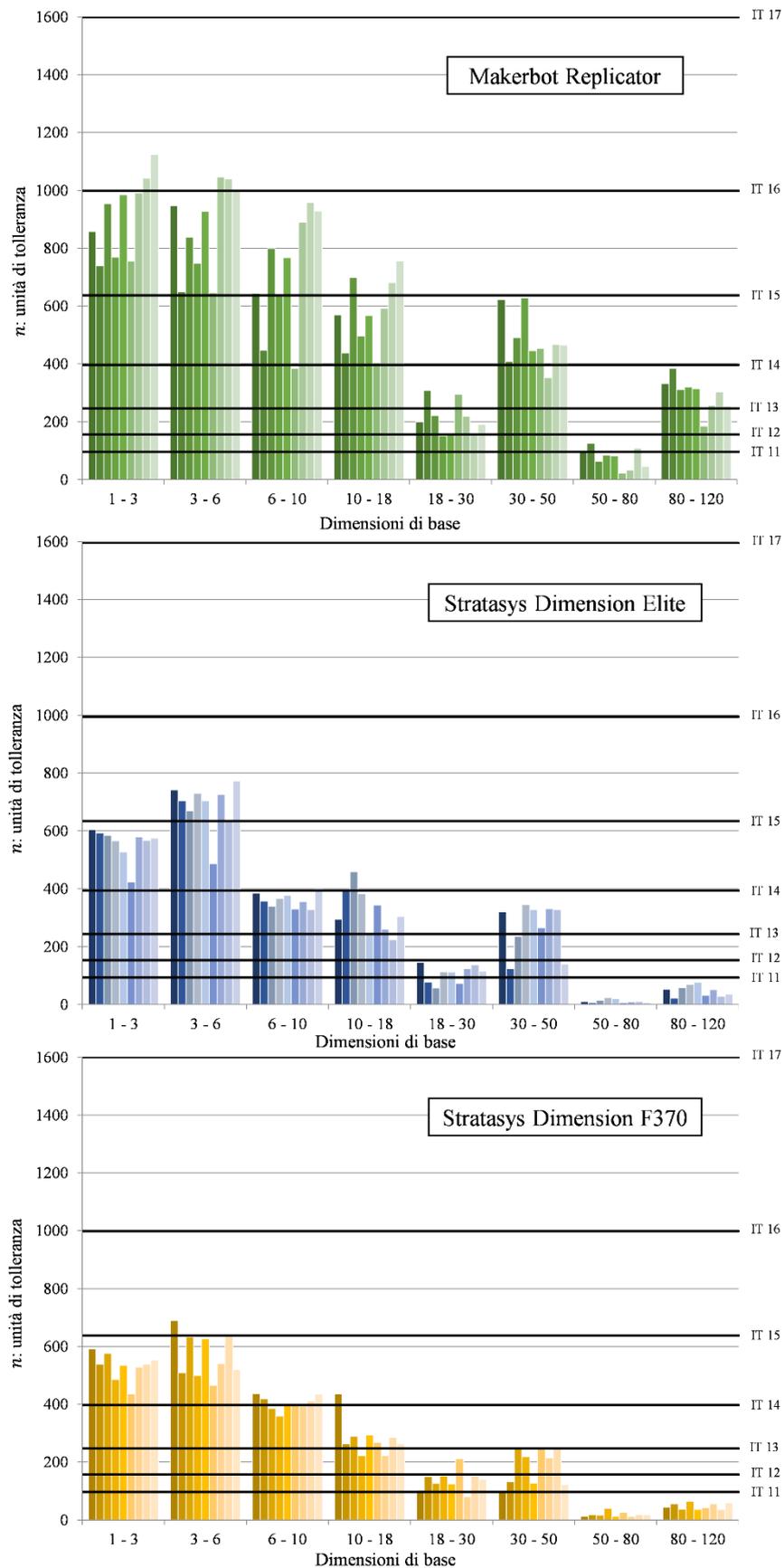


Figura 30 Precisione dimensionale (95° percentile) del campione di riferimento C confrontate in termini di gradi IT per diverse gamme di dimensioni di base ISO

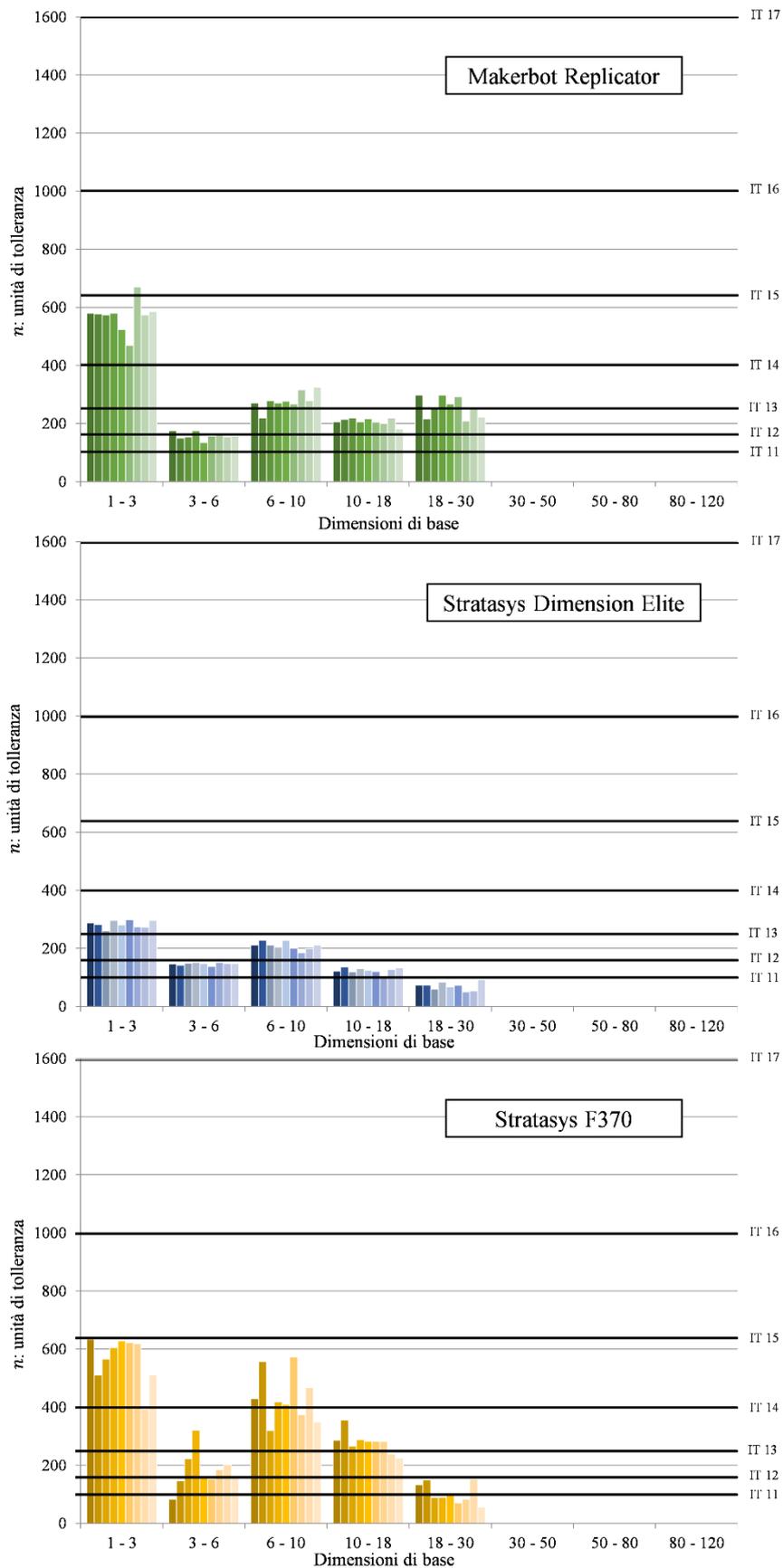


Figura 31 Precisione dimensionale (95° percentile) del campione di riferimento D confrontate in termini di gradi IT per diverse gamme di dimensioni di base ISO

## 5. Discussione risultati

In questo paragrafo si pone l'attenzione sulle caratteristiche dei tre sistemi additivi di FDM utilizzati, al fine di comprendere i vantaggi e svantaggi d'utilizzo di ogni sistema. Quest'analisi parte da un attento studio e interpretazione dei dati illustrati nei capitoli 3 e 4, e ne valuta i seguenti aspetti per ogni job:

- la durata e il consumo relativo di tutte le fasi
- l'incidenza dei parametri di processo sul complessivo consumo energetico e temporale
- la relazione tra consumo energetico e massa depositata
- l'accuratezza dimensionale

Per poter valutare l'importanza di una fase in termini di consumo relativo rispetto alle altre, si prende in considerazione la potenza media integrale ( $W$ ), che si ottiene dividendo il consumo energetico della fase ( $J$ ) per il relativo tempo di processo (min).

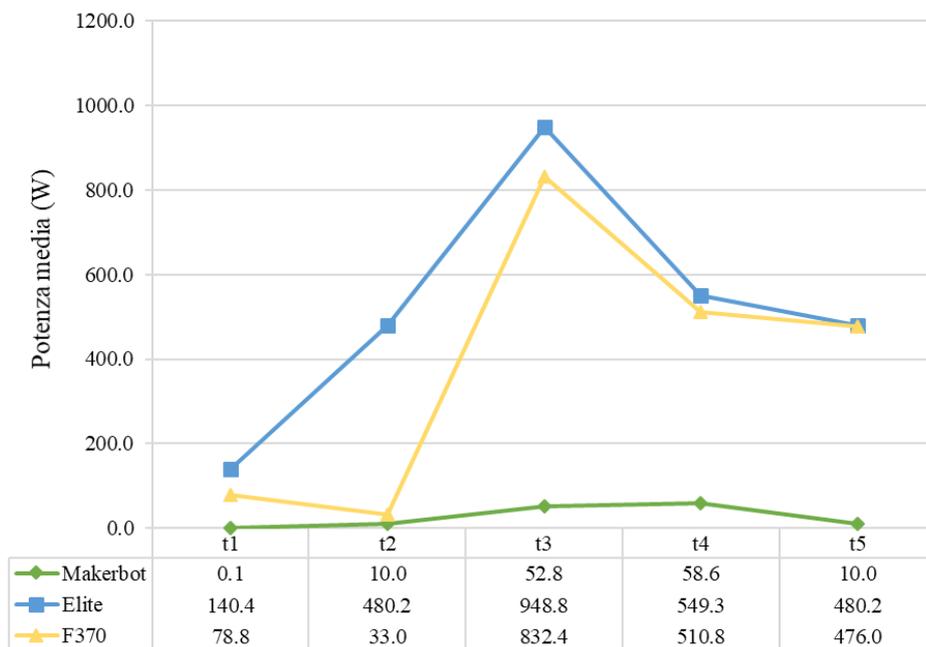


Figura 32 Potenza media delle fasi di un job (Job n°1)

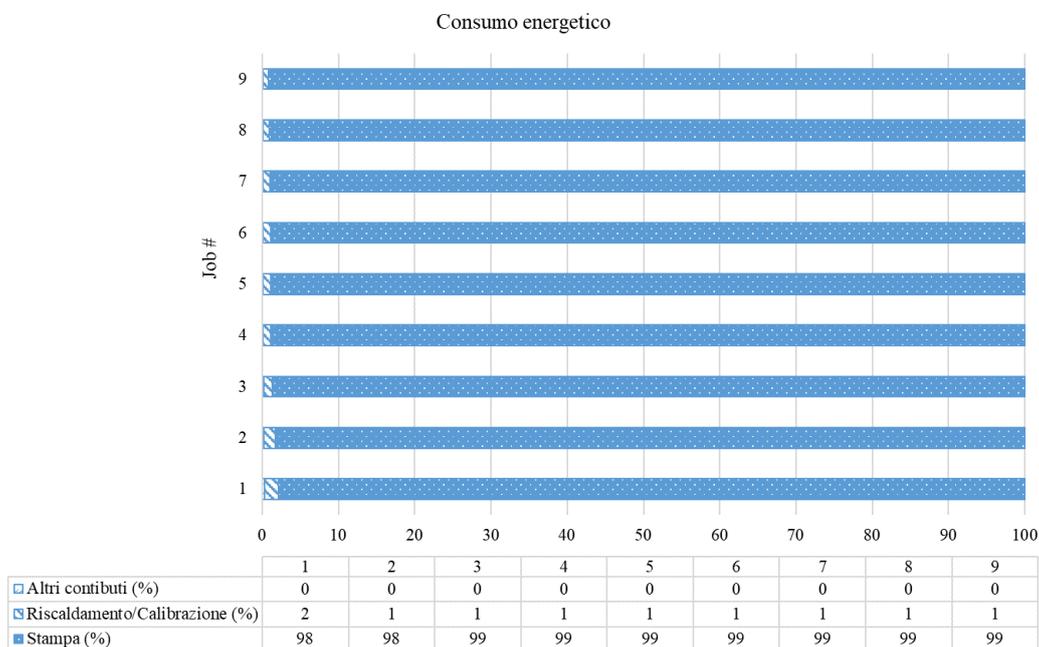
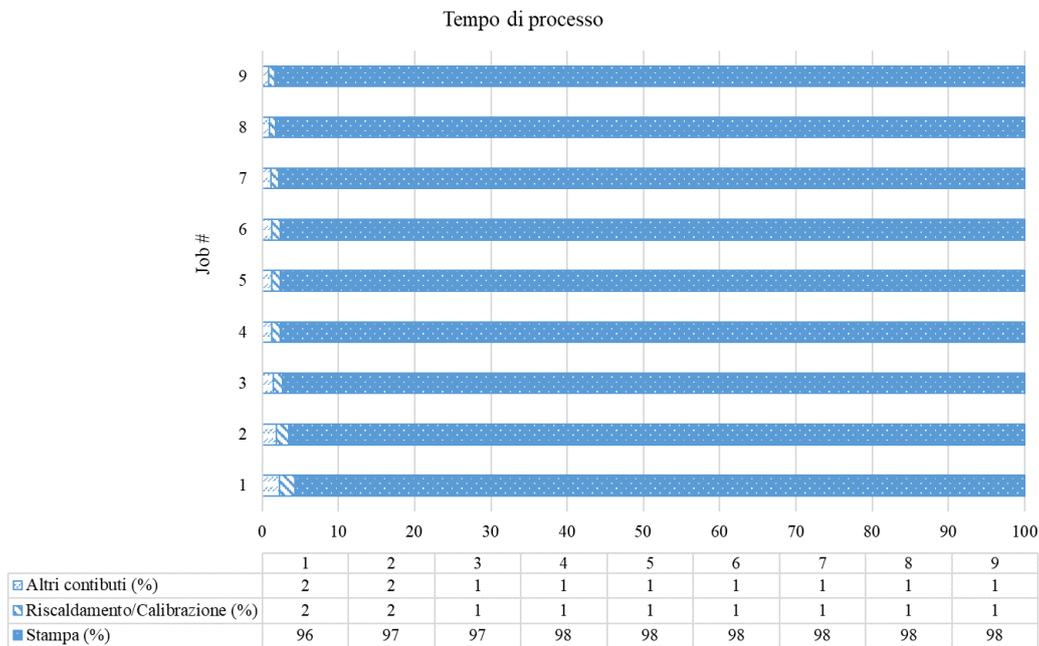
Ottenendo così il valore medio di potenza di ogni fase di un job, dato che i valori delle fasi di non stampa sono costanti per ogni job si prende in considerazione in Figura 32 i valori del job n°1 per i tre sistemi additivi.

Partendo con la Makerbot Replicator, la fase (4) di stampa è la fase che richiede più potenza ma, il valore è molto prossimo alla potenza media della fase (3) di riscaldamento della camera di lavoro e calibrazione degli assi. Se si considera il tempo di processo, 187 min per la prima e 4 min per la seconda, si nota un piccolo aumento di potenza media a parità di un notevole aumento di tempo di processo, questo perché la macchina assorbe molta energia per potere riscaldare gli estrusori fino a 225°C nella fase. Per quanto riguarda, invece, le fasi (2 e 5) di inattività la richiesta di potenza è molto bassa (10W) poiché la macchina è accesa ma, rimane in stand-by e non effettua nessuna operazione. Passando alle due Stratasys in discorso cambia nettamente poiché sono macchine industriali. Innanzitutto, si ha un ordine di grandezza della potenza media superiore perché le macchine sono dotate di camera di lavoro chiusa da mantenere sempre ad una temperatura costante.

La fase di riscaldamento della camera di lavoro e calibrazione degli assi, fase (3), richiede una potenza superiore in un tempo di processo molto inferiore rispetto alla fase (4) di stampa questo perché assorbe molta energia per poter portare a temperatura i due estrusori e la camera di lavoro. Mentre, la fase (5) di inattività la richiesta di potenza diminuisce rispetto alla fase di stampa ma non di molto poiché la macchina è accesa in stand-by e continua a mantenersi la temperatura, viene a mancare il contributo del movimento della tavola e degli estrusori. Questo è molto evidente soprattutto nella Stratasys F370, se si paragonano le due fasi (2-5) di inattività dove a parità di tempo di processo l'assorbimento di potenza è più di dieci volte quello iniziale, nel quale la macchina non ha iniziato ancora nessuna operazione di settaggio.

Di seguito, vengono mostrati i valori dei tempi di processo e di consumo di energia delle diverse fasi come quota percentuale dei rispettivi valori totali. Ciò evidenzia un problema che riguarda tutti i sistemi AM: l'effetto della saturazione dello spazio di costruzione sulla complessiva domanda energetica e di tempo, quindi, anche monetaria. Pertanto, per un accurato confronto empirico dell'efficienza dell'ingresso AM, le informazioni sull'utilizzo della capacità sono fondamentali.

Si analizza per primo il sistema FDM più elementare, la Makerbot Replicator. Come mostrato in Figura 33, la macchina presenta dei valori di tempi e consumi di settaggio quasi ininfluenti sui valori totali dei job: incidono per un valore massimo dello 4% (Job 1) fino a un valore minimo dello 2% (Job 9) del tempo totale di stampa, mentre, per quanto riguarda i consumi energetici, si parte da un valore massimo d'incidenza sul consumo totale di energia del 2% (Job 1) fino a un valore minimo del 1% (Job 9). Quindi, per i valori di massa depositate in questa sperimentazione, i valori delle fasi di settaggio sono trascurabili rispetto ai valori della fase di stampa, di conseguenza la saturazione dell'area di stampa non porta a vantaggi significativi.



*Figura 33 Makerbot Replicator: pesi percentuali del tempo di processo (alto) e del consumo energetico (basso)*

Segue il primo sistema FDM industriale, la Stratasys Dimension Elite. Come mostrato in Figura 34, la macchina presenta dei tempi di settaggio decisamente più importanti della prima, infatti, incidono per un valore massimo dello 19% (Job 1) fino a un valore minimo dello 7% (Job 9) del tempo totale di stampa, mentre, per quanto riguarda i consumi energetici, si parte da un valore massimo

d'incidenza sul consumo totale di energia del 27% (Job 1) fino a un valore minimo del 11% (Job 9). In questo caso, è evidente il beneficio che si può ottenere con la saturazione dell'area di stampa.

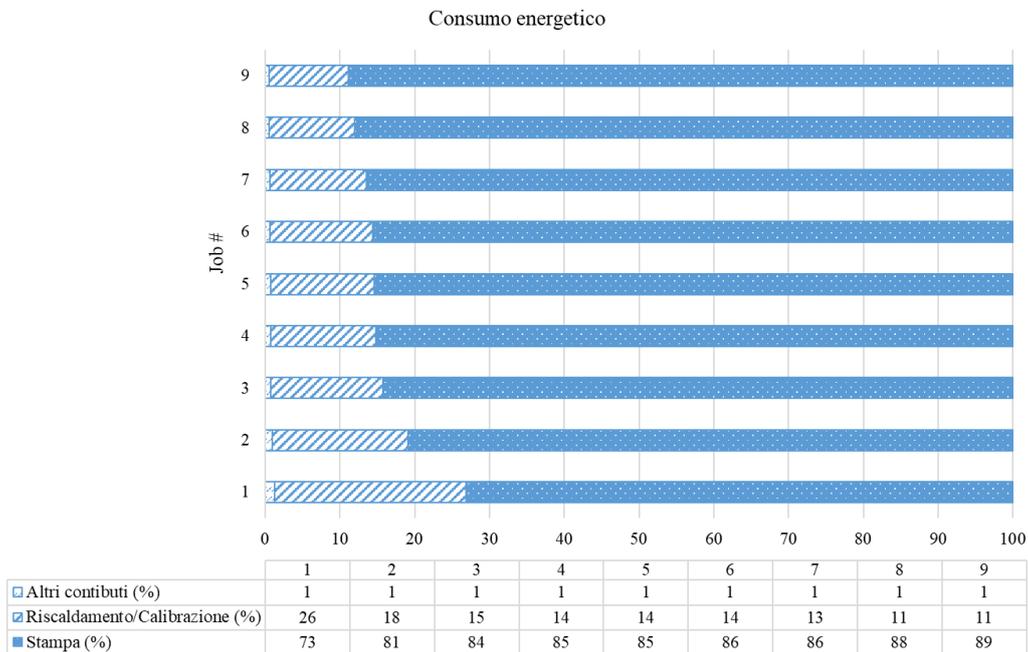
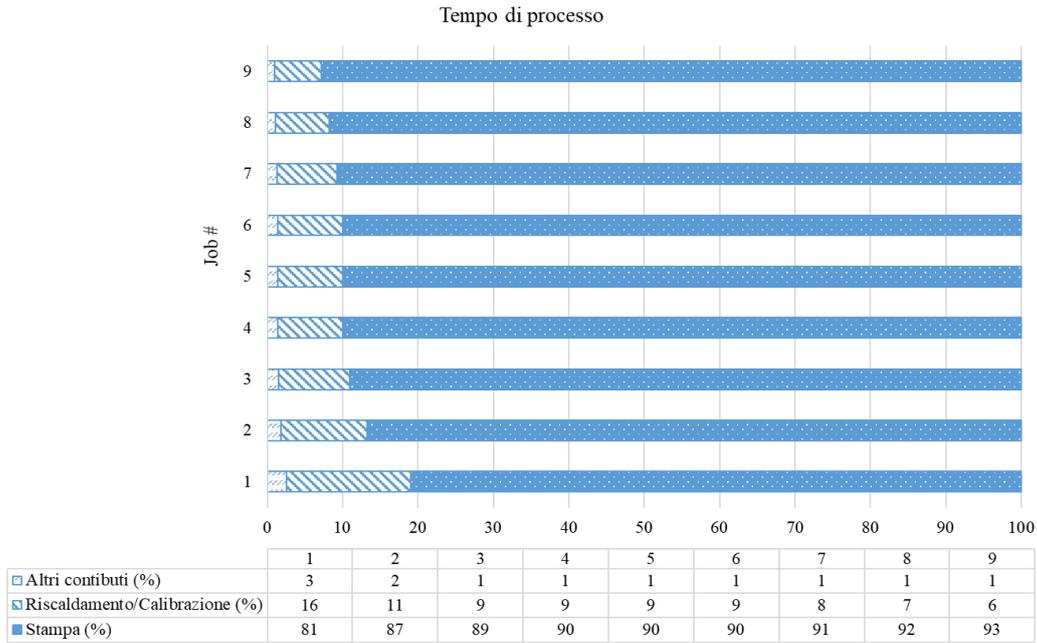


Figura 34 Stratasys Dimension Elite: pesi percentuali del tempo di processo (alto) e del consumo energetico (basso)

Infine, il secondo sistema FDM industriale, La Stratasys F370. Come mostrato in Figura 35, la macchina presenta dei tempi di settaggio decisamente più importanti della prima ma inferiori alla seconda. Infatti, incidono per un valore massimo dello 18% (Job 1) fino a un valore minimo dello 7%

(Job 9) del tempo totale di stampa, mentre, per quanto riguarda i consumi energetici, si parte da un valore massimo d'incidenza sul consumo totale di energia del 23% (Job 1) fino a un valore minimo del 9% (Job 9). Anche in questo caso, è evidente il beneficio che si può ottenere con la saturazione dell'area di stampa.

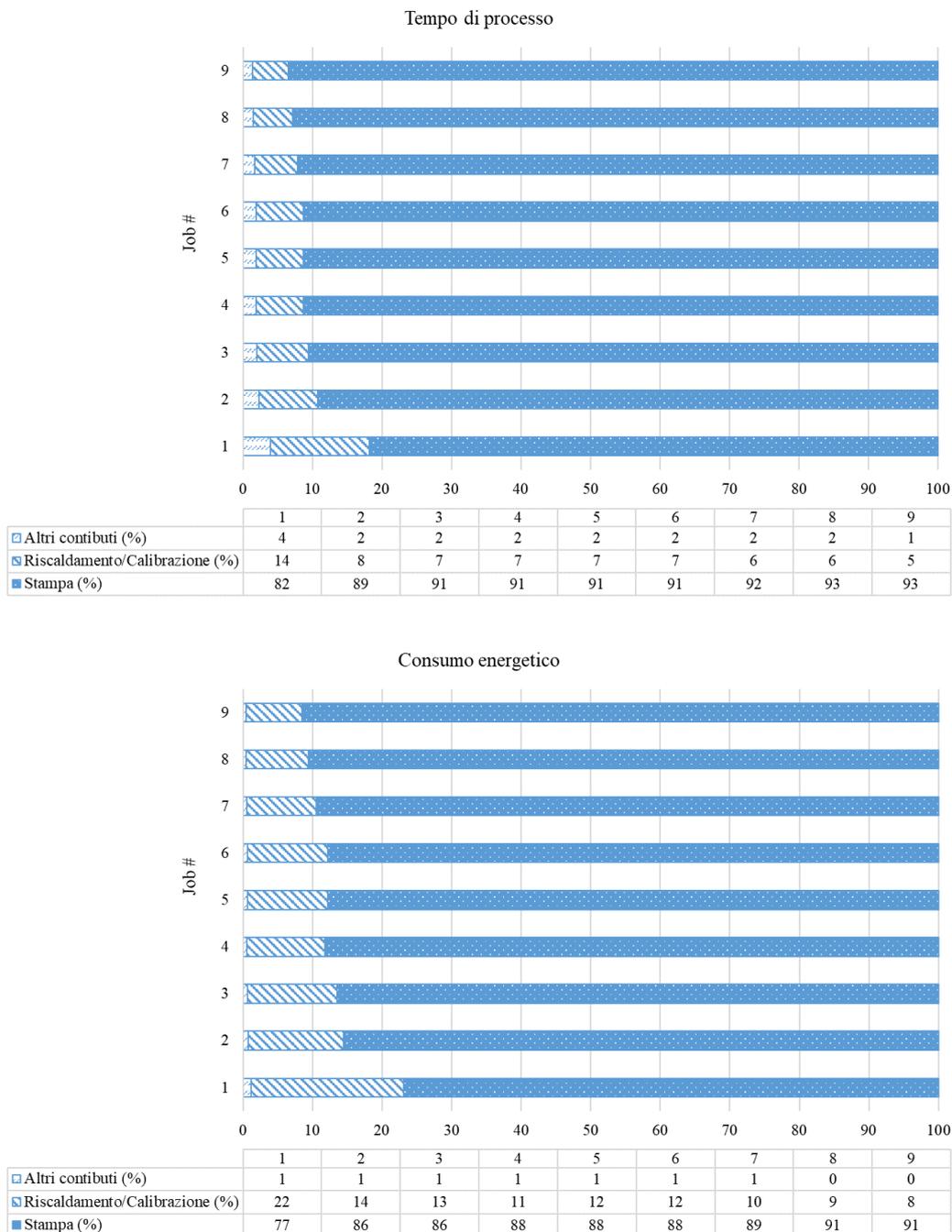


Figura 35 Stratasy F370: pesi percentuali del tempo di processo (alto) e del consumo energetico (basso)

Un'altra valutazione importante da effettuare è sulla correlazione che può esserci tra la quantità di massa stampata e il consumo energetico di ogni job. In un primo momento, si considera la variabile del tempo di processo, anch'essa fondamentale, infatti, come mostrato in Figura 36, i tempi di processo e i consumi di energia aumentano entrambi man mano che si va dal Job 1 al Job 9, ma se si valuta la correlazione  $R^2$  tra le due variabili, si ottiene che per le tre macchine è pari a:  $R_M^2 = 1.00$ ,  $R_{SE}^2 = 0.99$  e  $R_{SF370}^2 = 0.98$ .

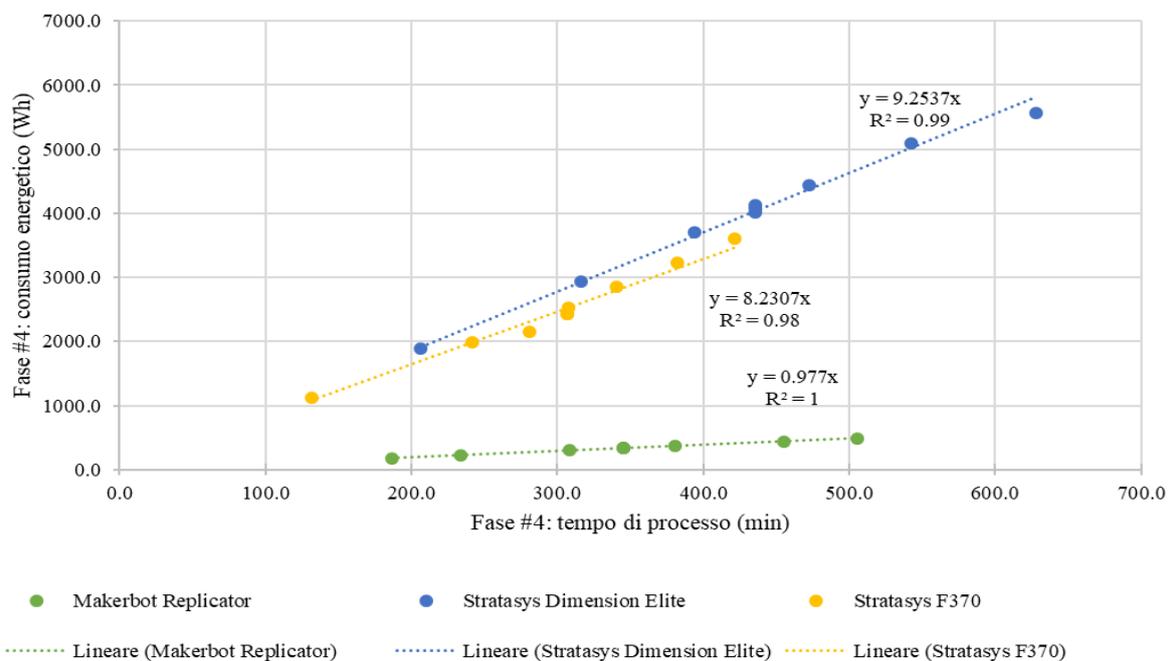


Figura 36 Correllazione consumo energetico-tempo di processo della fase di stampa

Quindi, dato che il grado di correlazione tra tempo di processo e consumo di energia è diretto, si analizza per semplicità solo la correlazione tra massa prodotta e consumo di energia per ogni job. Pertanto, in Figura 37, si prende in considerazione la correlazione tra il consumo energetico e la massa prodotta dei job della fase di stampa.

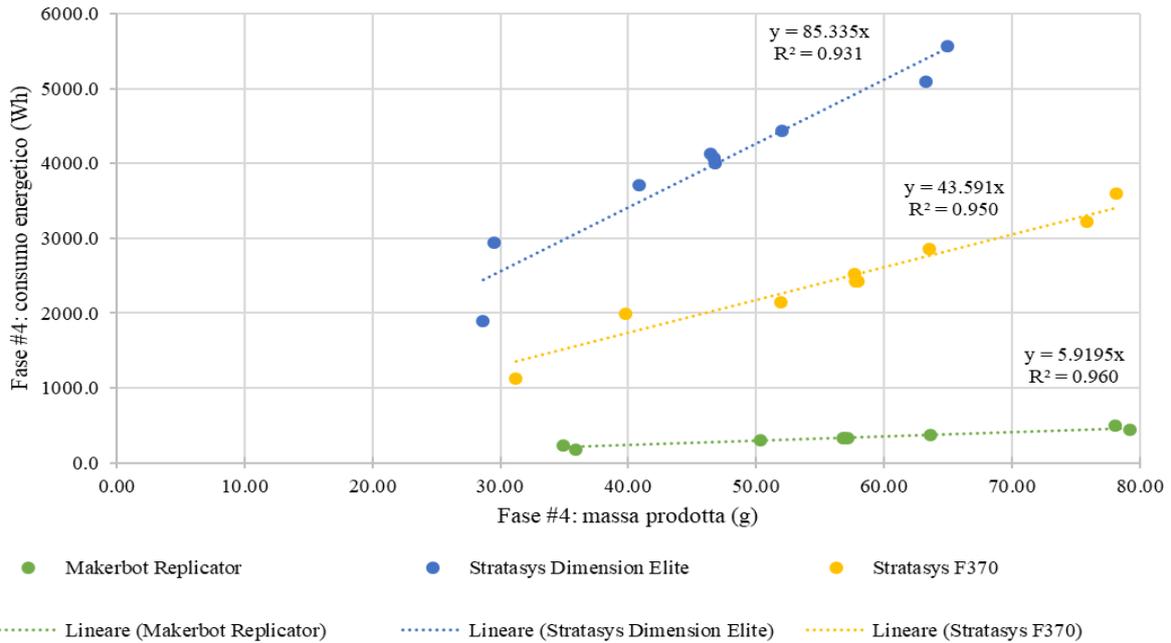


Figura 37 Correllazione consumo energetico-massa prodotta della fase di stampa

Dai risultati si evince che la correlazione tra massa prodotta e consumo energetico della fase di stampa per tutte e tre le macchine FDM tende a 1, quindi, si può affermare che esiste una correlazione statisticamente significativa tra le due variabili in esame.

Inoltre, al fine di ottenere una valutazione complessiva dei sistemi analizzati, si utilizzano degli indicatori sintetici che includono i parametri di tempo di processo, consumo energetico ed accuratezza dimensionale.

Il primo indicatore è il consumo specifico di energia per unità di massa (SEC) e si calcola con la formula seguente:

$$SEC = \frac{\text{consumo energetico}}{\text{massa prodotta}} \left[ \frac{MJ}{kg} \right]$$

Il secondo indicatore è il tasso di deposizione (DR) e si calcola con la formula seguente:

$$DR = \frac{\text{massa prodotta}}{\text{tempo di processo}} \left[ \frac{kg}{min} \right]$$

Entrambi gli indicatori sono stati calcolati per tutti i Job realizzati durante la fase sperimentale. I valori, in seguito, sono stati inseriti in un grafico a dispersione (Figura 38) per visualizzarne il grado di correlazione e comparare i due set di dati.

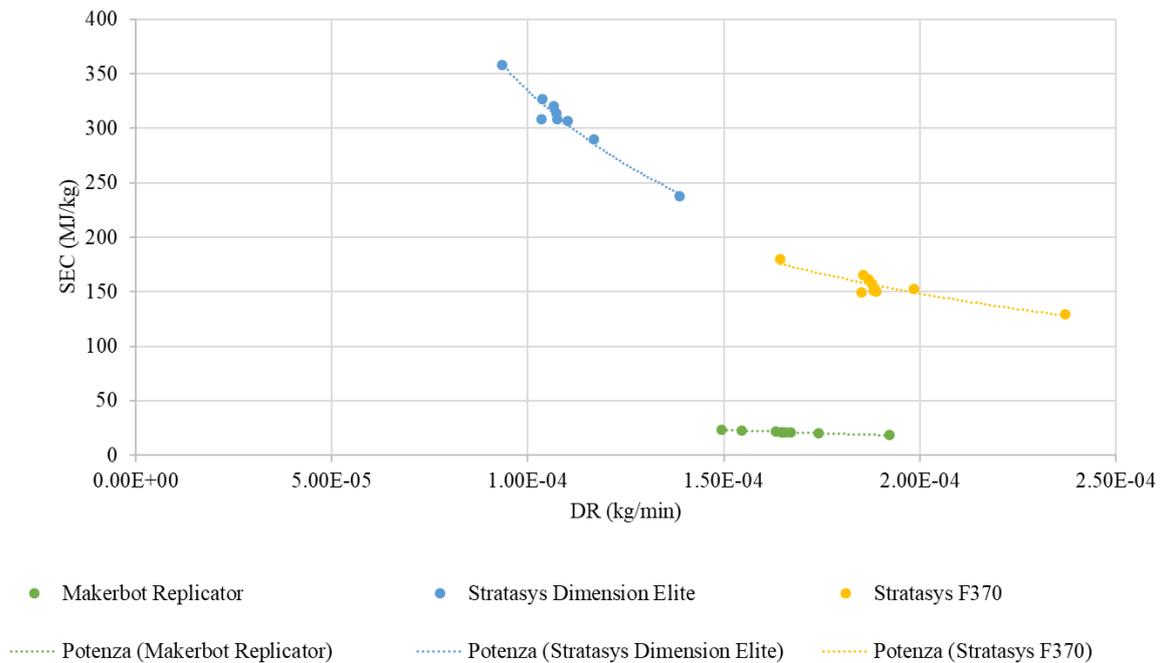


Figura 38 SEC vs DR: macchine FDM

Dal grafico sopra descritto si evincono le seguenti considerazioni:

- I due indicatori a confronto sono inversamente proporzionali, quindi, per tutti i Job, all'aumentare del DR diminuisce il SEC.
- Tra le tre macchine a confronto la Makerbot Replicator presenta sempre valori di SEC inferiori alle altre due, anche a parità di DR.
- Nonostante il DR sempre inferiore, la Dimension Elite presenta i consumi specifici SEC maggiori rispetto alle altre due macchine.
- Il coefficiente angolare delle rette di regressione è differente per i tre sistemi. In particolare, la F370 presenta un valore superiore alla Dimension Elite, ed entrambe presentano un valore superiore di un ordine di grandezza rispetto alla Makerbot Replicator. Tale risultato evidenzia che a parità di variazione dell'indicatore DR la corrispondente variazione dell'indicatore SEC per le due Stratasys è significativa, mentre invece per la Makerbot Replicator tale variazione non risulta apprezzabile.

Per valutare l'accuratezza dimensionale dei tre sistemi FDM, si analizza il valore medio di ogni campione di riferimento per ciascuna macchina. Risulta che, per la maggior parte delle gamme di dimensioni standard ISO, in termini di accuratezza dimensionale, la Stratasys Dimension Elite è il sistema migliore per i quattro campioni di riferimento analizzati e la Makerbot Replicator è il sistema peggiore. Di seguito un'analisi puntuale per ogni campione:

- Campione A

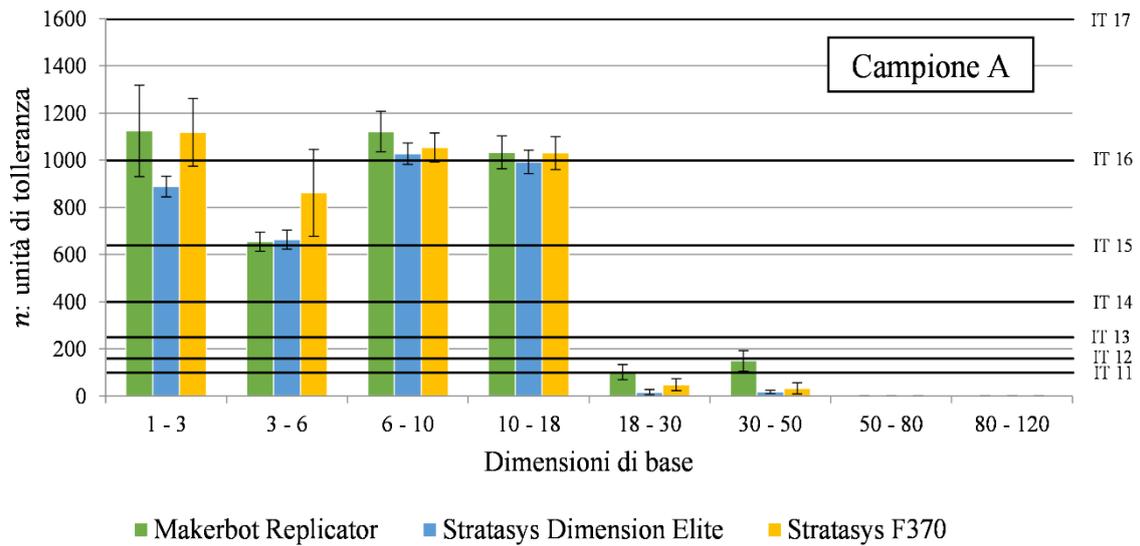


Figura 39 Gradi IT valutati sulla media del campione A

Il grado IT varia tra 17 e 16 per i formati aventi dimensione base inferiori a 18 mm, mentre invece è uguale o inferiore a 12 per i formati più grandi. La differenza non è significativa per dimensioni base inferiori a 18 mm, mentre invece per dimensioni maggiori l'accuratezza delle macchine confrontate è nettamente migliore per le due macchine Stratasys, Dimension Elite e F370.

- Campione B

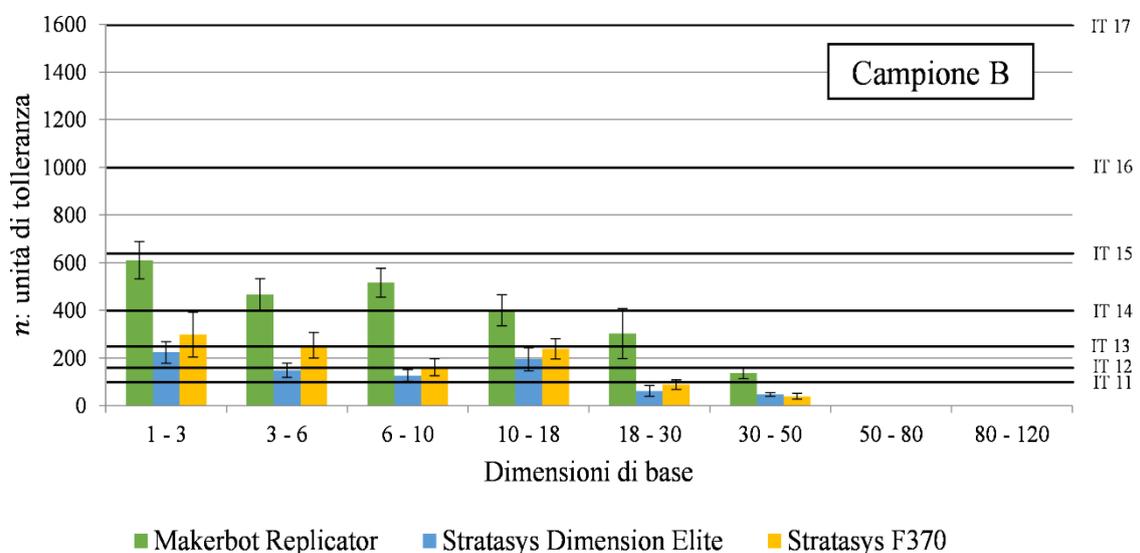


Figura 40 Gradi IT valutati sulla media del campione B

Contrariamente al campione precedente, la differenza tra l'accuratezza della Makerbot Replicator e dei sistemi Stratasys è significativa per tutte le dimensioni base, mentre l'accuratezza tra le due Stratasys è simile. Il grado IT per le Stratasys, Dimension Elite e F370, varia rispettivamente da 13-14 per formati più piccoli a 10-11 per formati più grandi ed è sempre migliore della stampante Makerbot Replicator per la stessa gamma di formati base ISO. Infatti, il grado IT della Makerbot Replicator peggiora da 12 a 15 al diminuire delle dimensioni base.

- Campione C

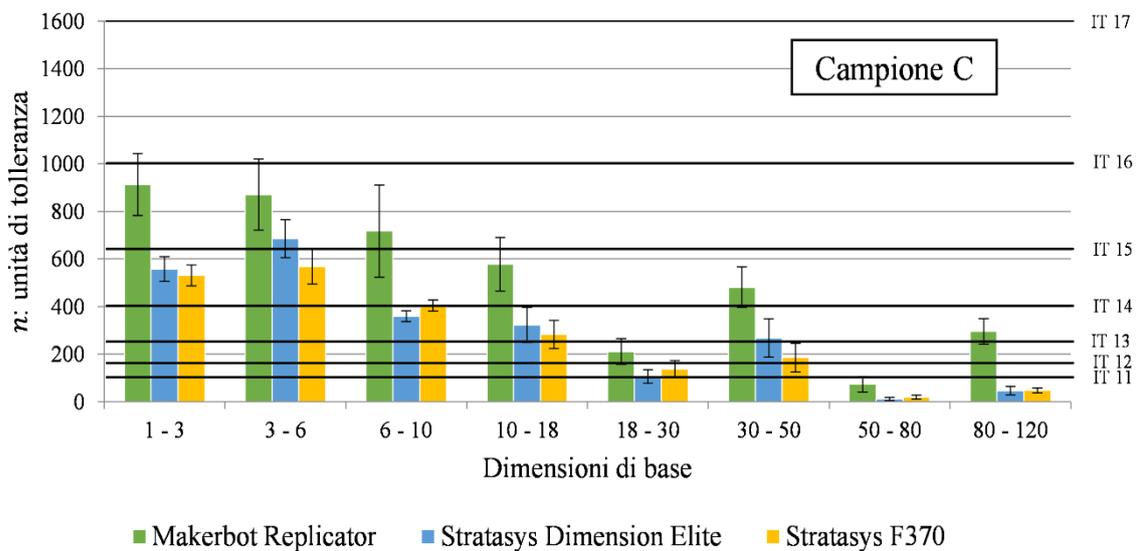


Figura 41 Gradi IT valutati sulla media del campione C

Anche per questo campione di riferimento, come per il campione B, la differenza tra l'accuratezza della Makerbot Replicator e dei sistemi Stratasys è significativa per tutte le dimensioni base, mentre l'accuratezza tra le due Stratasys è simile. Il grado IT per le Stratasys è molto basso per le dimensioni base superiori a 50 mm, mentre peggiora per le dimensioni base inferiori fino a 16 per la Stratasys F370 e a 15 per la Stratasys Dimension Elite ma, è sempre migliore della stampante Makerbot Replicator per la stessa gamma di formati base ISO. Infatti, il grado IT della Makerbot Replicator peggiora da 14 a 16 al diminuire delle dimensioni base, con eccezione della gamma base 18-30 mm.

- Campione D

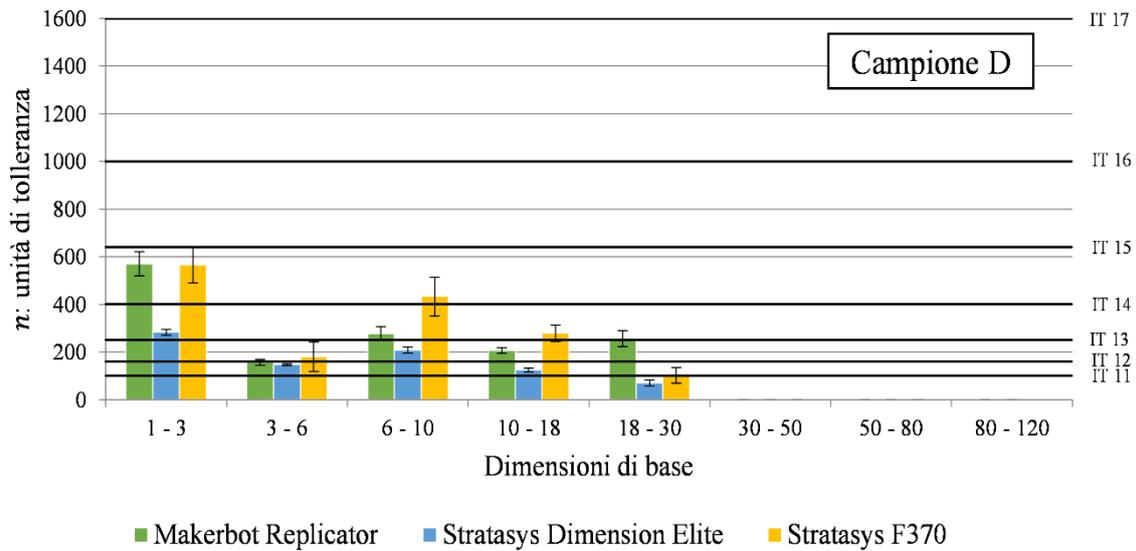


Figura 42 Gradi IT valutati sulla media del campione D

Il grado IT mostra che la Stratasys Dimension Elite ha un'accuratezza migliore, infatti, il grado IT è varia da 14 a 11 all'aumentare delle dimensioni base. Mentre, per la Makerbot Replicator e la Stratasys F370 il grado IT è sempre superiore di uno o due gradi, con valore per le due macchine uguale o peggiore per la Stratasys F370 per dimensioni base inferiori a 18 mm, mentre per dimensioni maggiori l'accuratezza peggiore è della Makerbot Replicator.

## 6. Conclusioni

In questo progetto sono state analizzati tre sistemi di fabbricazione additiva al fine di valutarne la sostenibilità tecnologica ed ambientale.

A tale scopo è stata condotta una campagna sperimentale che ha consentito la realizzazione di 36 provini per ogni macchina FDM analizzata, per un totale di 108 provini.

Le tre macchine sono state configurate con i medesimi parametri di processo al fine di rendere possibile un'analisi comparativa dei tre sistemi.

Durante la campagna sperimentale sono stati rilevati i valori dei consumi energetici e dei tempi di realizzazione. Al termine delle prove sono stati ricavati i valori delle masse dei provini realizzati. Infine, sono state ricavate le caratteristiche dimensionali dei provini mediante una macchina di misura a coordinate.

I dati così ottenuti, a seguito di un'approfondita elaborazione, hanno permesso di trarre le seguenti conclusioni:

1. Esiste una correlazione diretta e proporzionale tra le tre variabile di consumo energetico, tempo di processo e massa prodotta.
2. Il consumo energetico è prevalente durante la fase di stampa. Tuttavia, per le macchine industriali Stratasys la percentuale di energia assorbita durante le fasi di riscaldamento e calibrazione non risulta trascurabile. Tale percentuale arriva fino al 22÷26%, rispettivamente per la Stratasys F370 e la Stratasys Dimension Elite, se non viene ottimizzato il layout di stampa. Pertanto, risulta di fondamentale importanza, in termini di sostenibilità ambientale, saturare la capacità di lavoro per i suddetti sistemi industriali, mentre invece tale strategia è ininfluente per il sistemi entry-level Makerbot Replicator.
3. Il sistema entry-level realizza particolari con un'accuratezza dimensionale significativamente inferiore rispetto ai sistemi industriali. Tuttavia, esistono significative differenze in termini di accuratezza dimensionale anche tra i due sistemi industriali della stessa casa costruttrice, la Stratasys. Nel caso specifico la Stratasys Dimension Elite ha evidenziato un'accuratezza dimensionale migliore.
4. Le caratteristiche geometriche dei campioni di riferimento influiscono notevolmente sull'ordine di grandezza dell'errore dimensionale massimo. Tuttavia, per poter apprezzare l'incidenza delle geometrie di ogni campione sul grado IT, sarebbe opportuno effettuare un'analisi dimensionale geometrica GD&T.

## Bibliografia

- [1] Tuck, C. J., R. J. M. Hague, M. Ruffo, M. Ransley, and P. Adams. 2008. Rapid manufacturing facilitated customization. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21(3): 245–258.
- [2] Boothroyd, G., P. Dewhurst, and W. Knight. 1994. *Product design for manufacture and assembly*. New York: Marcel Dekker.
- [3] Bralla, J. 1998. General design principles for manufacturability. In *Design for manufacturability handbook*, edited by J. Bralla. New York: McGraw-Hill.
- [4] Hague, R., I. Campbell, and P. Dickens. 2003. Implications on design of rapid manufacturing. *Proceedings of IMechE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 217: 25–30.
- [5] Iuliano L, “Introduzione all’Additive Manufacturing”, Politecnico di Torino
- [6] <https://www.slideshare.net/BrandonHauser/design-considerations-for-additive-manufacturing-fdm>; ultimo accesso: 16/02/2020
- [7] Gibson I., Rosen D. W., Stucker B., 2010, *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, New York, USA.
- [8] Fahraz A., Boppana V. C., Maharaj J., 2014, Influence of Some Process Parameters on Build Time, Material Consumption and Surface Roughness of FDM Processed Parts: Inferences Based on the Taguchi Design of Experiments. *Proceedings of the 2014 IACJ/ISAM Joint International Conference*, Orlando, USA.
- [9] Mohamed O. A., Syed H. M., Jahar L. B., 2015, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3 (1),42-53.
- [10] Sood A.K., Ohdar R. K., Mahapatra S. S., 2009, Improving Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modeling Processed Part Using Grey Taguchi Method. *Materials and Design*, 30, 4243-4252.
- [11] Sreedhar P., Manikandan C. M., Jothi G., 2012, Experimental Investigation of Surface Roughness for Fused Deposition Modeled Part with Different Angular Orientation. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 5 (3), 21-28.
- [12] Sun Q., Rizvi G. M., Bellehumeur C. T., Gu, P., 2008, Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, 14 (2), 72-80.

- [13] Grenda E., 2006, Worldwide guide to rapid prototyping.
- [14] Croccolo D., De Agostinis M., Olmi G., 2013, Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. *Computational Materials Science*, 79, 506-518.
- [15] Es-Said O. S., Foyos J., Noorani R., Mendelson M., Marloth R., Pregger B. A., 2000, Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes*, 15 (1), 107-122.
- [16] Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P.K., 2002, Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, *Rapid Prototyping*, 8 (4), 248–257.
- [17] Too M. H., Leong K. F., Chua C. K., Du Z. H., Yang S. F., Cheah C. M., Ho S. L., 2002, Investigation of 3D nonrandom porous structures by fused deposition modelling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19 (3), 217-223.
- [18] Bertoldi M., Yardimci M. A., Pistor C. M., Guceri S. I., Sala, G., 1998, Mechanical characterization of parts processed via fused deposition. *Proceedings of the 1998 Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA*, pp. 557-565.
- [19] Cantrell J., Rohde S., Damiani D., Gurnani R., DiSandro L., Anton J., Ifju P., 2017, Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, 3, pp. 89-105.
- [20] Kara S, Li W. Unit process energy consumption models for material removal processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2011; 60(1):37-40. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.018.
- [21] Li W, Kara S. An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: A case of turning process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2011; 225(9):1636-1646. DOI: 10.1177/2041297511398541.
- [22] Luo Y, Ji Z, Leu MC. Environmental performance analysis of solid freeform fabrication processes. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment* 1999; 1-6. CODEN: 85OPA.
- [23] Gutowski
- [24] Kellens K, Mertens R, Paraskevas D, Dewulf W, Duflou J. Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing? *Procedia CIRP* 2017; 61:582-587. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.153.

- [25] Mognol P, Lopicart D, Perry N. Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight. *Rapid Prototyping Journal* 2006; 12(1):26-34. DOI: 10.1108/13552540610637246.
- [26] Baumers M, Tuck C, Wildman R, Ashcroft I, Hague R. Energy inputs to additive manufacturing: does capacity utilization matter? 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011; 30-40. Code: 104347.
- [27] ISO 286-1:1988 - ISO system of limits and fits - Part 1: Basis of tolerances, deviations and fit. 1988: International Organization for Standardization (ISO).
- [28] ISO 286-1:2010 - Geometrical product specifications (GPS) - ISO code system for tolerances on linear sizes - Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. 2010: International Organization for Standardization (ISO).
- [29] M. Mahesh, Y. Wong, J. Y. H. Fuh and H. T. Loh, Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes, *Rapid Prototyping J.* 10 (2), 123-135 (2004).
- [30] P. Minetola, L. Iulano and G. Marchiandi, "Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades," *Procedia CIRP* 41, p. 1027 – 1032, 2016.
- [31] Moylan S, Slotwinski J, Cooke A, Jurrens K, Donmez MA. Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes. in 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2012. 2012. Austin, TX, 902-920.
- [32] J. Richter and P. Jacobs, Accuracy, in: *Rapid Prototyping & Manufacturing*, P. Jacobs, Society of Manufacturing Engineers, (1992) 287-315.
- [33] D. Scaravetti, P. Dubois and R. Duchamp, Qualification of rapid prototyping tools: proposition of a procedure and a test part, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 38 (7), 683-690 (2008).
- [34] [https://www.Makerbot\\_Replicator.com/3d-printers/replicator-educators-edition/](https://www.Makerbot_Replicator.com/3d-printers/replicator-educators-edition/); ultimo accesso: 15/02/2020
- [35] <https://www.stratasys.com/it/3d-printers>; ultimo accesso: 15/02/2020
- [36] Yoon H, Lee J, Kim H, Kim M, Kim E, Shin, Y-J, Chu, W-S, Ahn, S-H. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* 2014; 1:261-279. DOI: 10.1007/s40684-014-0033-0.

- [37] Le Bourhis F, Kerbrat O, Hascoet J, Mognol P. Sustainable manufacturing: Evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2013; 69(9-12):1927-1939. DOI: 10.1007/s00170-013-5151-2.
- [38] Yosofi M, Kerbrat O, Mognol P. Energy and material flow modelling of additive manufacturing processes. *Virtual and Physical Prototyping* 2018; 13(2):83-96. DOI: 10.1080/17452759.2017.1418900.
- [39] Mognol P, Lopicart D, Perry N. Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight. *Rapid Prototyping Journal* 2006; 12(1):26-34. DOI: 10.1108/13552540610637246.
- [40] Baumers M, Tuck C, Bourell DL, Sreenivasan R, Hague R. Sustainability of additive manufacturing: measuring the energy consumption of the laser sintering process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2011; 225(12):2228-2239. DOI: 10.1177/0954405411406044.
- [41] Huang R, Riddle M, Graziano D, Warren J, Das S, Nimbalkar S, Cresko, J, Masanet, E. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production* 2016; 135:1559-1570. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.109.
- [42] Yosofi M, Kerbrat O, Mognol P. Additive manufacturing processes from an environmental point of view: a new methodology for combining technical, economic, and environmental predictive models. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2019; 102(9-12):4073-4085. DOI: 10.1007/s00170-019-03446-2.
- [43] V. L. Schiavo, *Analisi del ciclo di fabbricazione e dei processi di finitura dei componenti in Ti6Al4V ottenuti tramite EBM*, 2019.
- [44] D. Lamberti, *Materiali polimerici per l'Additive Manufacturing: caratteristiche dei precursori e prestazioni meccaniche dei prodotti*, 2018.
- [45] Junk S, Côté S. A practical approach to comparing energy effectiveness of rapid prototyping technologies. *Proceedings of AEPR'12, 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing* 2012.
- [46] Childs THC, Juster NP. Linear and Geometric Accuracies from Layer Manufacturing. *CIRP Ann Manuf Technol* 1994;43(1):163-166.
- [47] Cruz Sanchez FA, Boudaoud H, Muller L, Camargo M. Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing: This paper proposes a benchmarking model for

evaluating accuracy performance of 3D printers. *Virtual and Physical Prototyping* 2014;9(3):151-167.

[48] Bassoli E, Atzeni E. Direct metal rapid casting: mechanical optimization and tolerance calculation. *Rapid Prototyping J* 2009;15(4):238-243.

[49] Violante MG, Iuliano L, Minetola P. Design and production of fixtures for free-form components using selective laser sintering. *Rapid Prototyping J* 2007;13(1):30-37.

[50] J. P. Kruth, Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 40 (2), 603-614 (1991).

## Indice delle figure

Figura 1 Schema delle principali tecniche di AM suddivise per il tipo di materiale adoperato ed in base al tipo di processo [adapted from 5] .....	4
Figura 2 Schema tecnologia FDM [6].....	5
Figura 3 Diagramma Ishikawa dei parametri di processo FDM [9] .....	7
Figura 4 Principali parametri relativi alla geometria di stampa [9] .....	7
Figura 5 Consumo energetico in funzione del tasso di materiale processato per diverse tecnologie tradizionali [23].....	9
Figura 6 SEC in letteratura [24].....	10
Figura 7 Risultati Luo et al. [22].....	11
Figura 8 Risultati Mognol et al. [25].....	11
Figura 9 Risultati Baumers et al. [26] .....	12
Figura 10 Modello CAD e geometrie del manufatto proposto da Mahesh et al. [29].....	14
Figura 11 Modello CAD e geometrie del manufatto proposto da Minetola et. al [30].....	15
Figura 12 Modello CAD 3D dei campioni di riderimento.....	17
Figura 13 Macchine FDM: Makerbot Replicator(a), Stratasys Dimension Elite (b), Stratasys F370 (c) [34-35].....	20
Figura 14 Configurazione dei layout di stampa dei job .....	22
Figura 15 Misuratore di potenza Fluke 435 serie II in funzione su Stratasys F370 .....	23
Figura 16 Configurazione circuito monofase con neutro e messa a terra .....	24
Figura 17 Bilancia Gibertini 1000HR-CM .....	25
Figura 18 Spurgo realizzato dalla Stratasys F370 (Job 4) .....	25
Figura 19 Macchina di misura a coordinate (Hexagon DEA IOTA 0101).....	26
Figura 20 Acquisizione dati e identificazione delle principali fasi del processo (Makerbot Replicator Job 1).....	30

Figura 21 Acquisizione dati e identificazione delle principali fasi del processo (Stratasys Dimension Elite Job 3) .....	31
Figura 22 Acquisizione dati e identificazione delle principali fasi del processo (Stratasys F370 Job 7) .....	32
Figura 23 Risultati Makerbot Replicator: tempo di processo (in alto) e consumo energetico (in basso) .....	35
Figura 24 Risultati Stratasys Dimension Elite: tempo di processo (in alto) e consumo energetico (in basso) .....	36
Figura 25 Risultati Stratasys F370: tempo di processo (in alto) e consumo energetico (in basso) ...	37
Figura 26 Campioni prodotti (dall'alto verso il basso): Job#1 Makertbot Replicator, Job#5 Stratasys Dimension Elite e Job#9 Stratasys F370.....	45
Figura 27 Valori dei gradi di tolleranza standard per dimensioni nominali fino a 500 mm [27] .....	46
Figura 28 Precisione dimensionale (95° percentile) del campione di riferimento A confrontate in termini di gradi IT per diverse gamme di dimensioni di base ISO .....	48
Figura 29 Precisione dimensionale (95° percentile) del campione di riferimento B confrontate in termini di gradi IT per diverse gamme di dimensioni di base ISO .....	49
Figura 30 Precisione dimensionale (95° percentile) del campione di riferimento C confrontate in termini di gradi IT per diverse gamme di dimensioni di base ISO .....	50
Figura 31 Precisione dimensionale (95° percentile) del campione di riferimento D confrontate in termini di gradi IT per diverse gamme di dimensioni di base ISO .....	51
Figura 32 Potenza media delle fasi di un job (Job n°1) .....	52
Figura 33 Makerbot Replicator: pesi percentuali del tempo di processo (alto) e del consumo energetico (basso) .....	54
Figura 34 Stratasys Dimension Elite: pesi percentuali del tempo di processo (alto) e del consumo energetico (basso) .....	55

Figura 35 Stratasys F370: pesi percentuali del tempo di processo (alto) e del consumo energetico (basso).....	56
Figura 36 Correllazione consumo energetico-tempo di processo della fase di stampa .....	57
Figura 37 Correllazione consumo energetico-massa prodotta della fase di stampa .....	58
Figura 38 SEC vs DR: macchine FDM.....	59
Figura 39 Gradi IT valutati sulla media del campione A.....	60
Figura 40 Gradi IT valutati sulla media del campione B.....	60
Figura 41 Gradi IT valutati sulla media del campione C.....	61
Figura 42 Gradi IT valutati sulla media del campione D.....	62

## Indice delle tabelle

Tabella 1 Descrizione delle caratteristiche geometriche.....	19
Tabella 2 Parametri di processo .....	21
Tabella 3 Configurazione dei job di produzione.....	22
Tabella 4 Contributi del tempo di processo e del consumo energetico dovuti alle fasi di non deposizione.....	33
Tabella 5 Contributi del tempo di lavorazione e del consumo di energia elettrica relativi alle fasi di stampa .....	34
Tabella 6 Masse Makerbot Replicator .....	39
Tabella 7 Masse Stratasys Dimension Elite .....	41
Tabella 8 Masse Stratasys F370 .....	43
Tabella 9 Deviazione standard dei valori delle masse per singolo componente .....	44