



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

---

**Sviluppo di modelli di costo analitici per processi L-PBF di  
post-processing**

**Development of analytical cost models for L-PBF post-  
processing processes**

Relatore:

*Prof. Michele Germani*

Tesi di laurea di:

Andrea Solustri

Correlatore:

*Prof. Marco Mandolini*

*Ing. Mikhailo Sartini*

*A Claudia, Moreno e Giulia,  
per il sostegno e il supporto in ogni scelta della mia vita*

# I. Sommario

I. Sommario	1
II. Elenco delle figure	2
1 Introduzione	4
2 L' Additive Manufacturing	5
2.1 Tecnologie di Additive Manufacturing per metalli	7
2.1.1 L-PBF	7
2.1.2 EBM	8
3 Le attività di post-process dell'Additive Manufacturing per SLM	10
3.1 Hot Isostatic Pressing	11
3.2 Thermal Deburring	16
3.3 Radiografia industriale	20
3.3 Tomografia industriale computerizzata	22
4 Formulazione dei modelli di costo	26
4.1 Modello di costo per Thermal Deburring	26
4.2 Modello di costo per HIP	32
4.3 Modello di costo per CT	35
4.4 Modello di costo per RT	37
5 Caso di studio: calcolo del costo di un processo di CT	39
6 Conclusioni	42
7 Bibliografia	43

## II. Elenco delle figure

Figura 2.1 Schema L-PBF .....	5
Figura 2.2 Schema EMB .....	6
Figura 3.1.1 Schema camera HIP .....	11
Figura 3.1.2 Esempio forno HIP .....	14
Figura 3.1.3 Effetto della HIP sulla porosità (acciaio 316L).....	14
Figura 3.2.1 Caratteristiche pezzo sbavato .....	16
Figura 3.2.2 Caricamento dei pezzi nella piattaforma .....	17
Figura 3.3.1 Schema radiografia .....	20
Figura 3.4.1 Schema tomo grafia computerizzata .....	22
Figura 3.4.2 Modello pezzo in 3D .....	23
Figura 4.1 Foglio "Input" Thermal Deburring.....	24
Figura 4.2 Foglio "Parametri Materiale" Thermal Deburring .....	25
Figura 4.3 Foglio "Parametri Generali" Thermal Deburring.....	26
Figura 4.4 Foglio "Calcoli" Thermal Deburring .....	30
Figura 4.5 Foglio "Parametri macchina" Tomografia .....	32
Figura 4.6 Parametri "Input" HIP .....	33
Figura 4.7 Calcoli HIP .....	34
Figura 4.8 Parametri materiale CT .....	35
Figura 4.9 Parametri macchina CT.....	36

Figura 4.10 Foglio Input RT .....	37
Figura 4.11 Parametri macchina RT .....	38
Figura 5.1 Foglio "Input" Tomografia Computerizzata .....	40
Figura 5.2 Foglio "Calcoli" Tomografia Computerizzata.....	42
Figura 5.3 Grafico costi CT .....	43

# 1 Introduzione

In questo elaborato verrà trattato il tema dell'Additive Manufacturing, tecnologia sempre più in crescita in questo periodo di innovazione tecnologica, evidenziandone le differenze con le tecnologie di stampa tradizionali, il processo e i materiali utilizzati. Verranno poi elencate alcune delle tecnologie più diffuse di stampa 3D per metalli, ma particolare attenzione verrà rivolta ai trattamenti post process a cui dovranno essere sottoposti i pezzi stampati, che variano a seconda delle caratteristiche desiderate dall'utilizzatore del pezzo.

L'obiettivo principale dello studio svolto consiste nello sviluppo e implementazione (con il supporto del software Excel) di modelli di costo analitici per le differenti fasi di post processing. In particolare, ci si è concentrati sulle principali attività a cui sono sottoposti i componenti che vengono stampati con tecnologia L-PBF. Si parte quindi introducendo lo stato dell'arte ed il principio di funzionamento dei differenti post processing. Successivamente viene presentato il metodo con cui i modelli sono stati sviluppati: in questo capitolo vengono quindi presentati i parametri (dipendenti e non) e le formule che governano ogni singolo processo. Viene poi illustrata la loro implementazione all'interno del foglio di calcolo Excel ed infine si valutano i risultati. In quest'ultimo capitolo si ipotizza un componente da analizzare, per i quali sono noti i parametrici caratteristici, che vengono poi forniti in input ai modelli per ottenere una stima.

## 2 L' Additive Manufacturing

L' Additive Manufacturing, o Fabbricazione Additiva, è una tecnologia produttiva innovativa che consente di realizzare un oggetto finito senza la necessità di fondere materiale o di sottrarne da una forma grezza iniziale. Nelle tecniche di Fabbricazione Additiva il materiale viene aggiunto in maniera selettiva, strato dopo strato, coerentemente con il modello matematico del pezzo disegnato su di un sistema CAD 3D. Rispetto alle tecniche tradizionali consente un minore utilizzo di materiale ed una maggiore libertà nella concezione del pezzo, ampliando indefinitamente la gamma di forme e complessità realizzabili. Date le sue caratteristiche uniche, l'AM è stata adottata in diversi ambiti applicativi (tra i principali: Automotive, Aerospace, Biomedicale e Gioielleria) principalmente per la prototipazione rapida e per la produzione di piccole serie.

La stampa 3D, altro nome con cui è nota la nuova tecnologia, rispetto alle tecniche tradizionali, che partono dalla tecnica della sottrazione dal pieno (basti pensare al processo di fresatura o tornitura), consente un minore utilizzo di materiale ed una maggiore libertà nella concezione del pezzo, ampliando indefinitamente la gamma di forme e complessità realizzabili. Grazie a questo strumento di produzione si è compiuta una digitalizzazione dell'attività manifatturiera realizzata grazie al dialogo

continuo tra computer e impianti produttivi, ottenuto anche grazie allo sviluppo di internet.

Per queste ragioni, si parla (più propriamente) di Manifattura Additiva. Il processo di produzione additiva ha come input la realizzazione del modello 3D dell'oggetto (progettazione CAD), a cui segue un processo semi-automatico (svolto oramai da tutti i più diffusi software di progettazione) di conversione del file in formato STL, che prevede la scomposizione dell'oggetto in strati (layer) stampabili dalle stampanti 3D. Infine, a valle del processo di stampa, sono (spesso, dipende dalla finalità d'uso) necessarie attività di post-produzione e finitura, per ottenere adeguati livelli di finitura e proprietà meccaniche del manufatto realizzato. Uno degli elementi peculiari di tutte le tecnologie di stampa 3D è la possibilità di realizzare, in un unico processo di stampa, oggetti che tradizionalmente sono realizzati in diversi componenti singoli, da assemblare successivamente.



## **2.1 Tecnologie di Additive Manufacturing per metalli**

### **2.1 1 Laser powder bed fusion**

La L-PBF è una tecnica di Fabbricazione Additiva che, analogamente alla Selective Laser Sintering per i materiali polimerici, realizza i componenti attraverso la fusione selettiva di un letto di polvere. La differenza di nome tra le due tecnologie ha origini storiche, in passato la radiazione laser non consentiva di raggiungere la completa fusione delle particelle metalliche lasciando porosità all'interno del prodotto realizzato. Ad oggi la L-PBF , con adeguati accorgimenti durante il processo, riesce a produrre componenti con una densità molto vicina al 100% e senza porosità, con tempi di fusione di pochi millisecondi in grado di garantire grani fini. Questa tecnica può essere considerata come alternativa ai processi di lavorazione per deformazione plastica e di fonderia.

Il processo inizia con la deposizione di uno strato di polvere sulla piattaforma di lavoro successivamente livellato dal passaggio di un opportuno rullo. In seguito, un raggio laser, emesso da una sorgente laser, viene proiettato con degli specchi sullo strato di polvere, coerentemente con la sezione da realizzare, portando a fusione le particelle metalliche interessate. Ottenuto il primo strato, l'elevatore fa scendere la piattaforma di una quantità pari allo spessore del successivo strato ed il processo può così ripetersi. Una volta ultimata la lavorazione è possibile estrarre il componente e passare alla susseguente rimozione

dei supporti e delle particelle non interessate dalla fusione, che vengono contenute all'interno di contenitori appositi. All'interno del volume di lavoro, è necessario avere un'atmosfera inerte affinché non si ossidi la sezione di polvere. Pertanto, si insuffla dell'argon o dell'elio, a seconda del materiale che si sta lavorando.

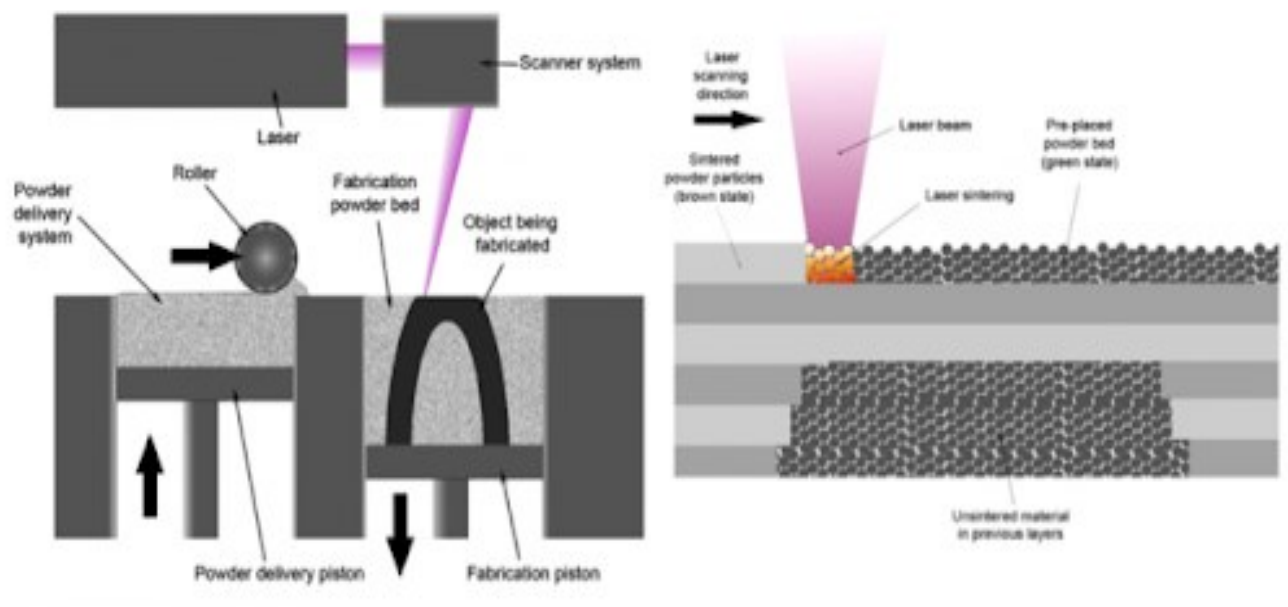


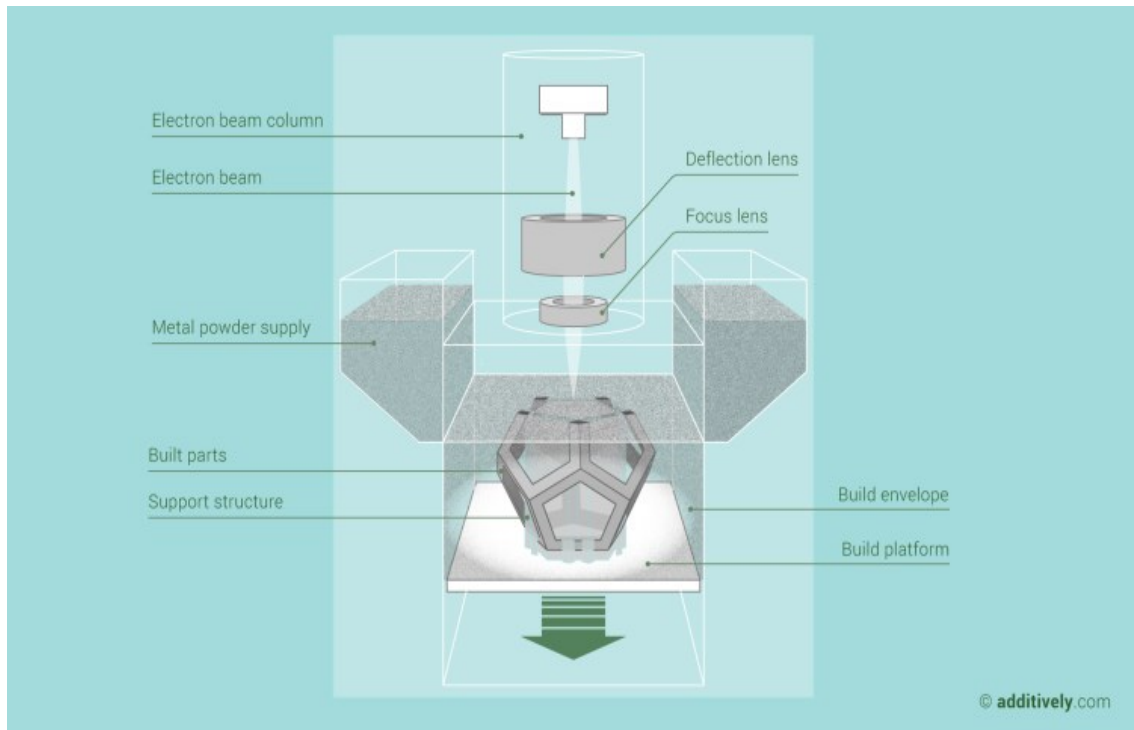
Figura 2.1 Schema SLM

## 2.1.2 Electronic Beam Melting

La tecnologia EBM (Electron Beam Melting) consente di ottenere particolari in metallo da un fascio di elettroni anziché da un fascio laser, molto simile alla SLM, con questa tecnologia si ottiene una fusione totale della polvere metallica, superiore alla sinterizzazione. Invece di stampare all'interno di uno spazio sigillato pieno di gas, le stampanti EBM producono gli oggetti in uno spazio vuoto estremamente caldo.

A causa di questa temperatura elevata, le parti realizzate via EBM sono densissime, tanto che possono arrivare ad avere qualità meccaniche

addirittura superiori a quelle dei componenti realizzati negli stampi a iniezione: perciò i prototipi ed i pezzi definitivi così costruiti presentano eccezionali proprietà meccaniche e un'elevatissima resistenza al calore.



**Figura 2.2 Schema EBW**

Il processo è particolare: invece di un singolo punto di contatto del laser con la polvere metallica, il fascio di elettroni appare come un fuoco d'artificio che colpisce la polvere metallica in moltissimi punti contemporaneamente. Come nel SLM la polvere viene depositata e livellata nel letto da un apposito rullo per poi essere investita da questo fascio di elettroni (a circa 800 gradi) per preriscaldarla e renderla compatta. Il fascio poi viene portato ad una temperatura maggiorata di circa 2500 gradi causando la fusione della sezione metallica interessata e passando attraverso 2 campi magnetici: uno focalizza il fascio mentre l'altro ne controlla la deviazione. Al termine del processo l'elevatore si

abbassa per consentire la lavorazione dello strato successivo; il prodotto finale è un blocco compatto di polvere da cui, tramite un processo di pallinatura, il componente viene estratto. I materiali principali utilizzati sono il titanio e il cromo-cobalto; infatti, le applicazioni più comuni sono in campo medico, per strumenti chirurgici o impianti e protesi interne.

### **3 Le attività di post-process dell'Additive Manufacturing per SLM**

Il post-processing comprende tutte le attività che si verificano dal momento in cui una build è completa fino al momento in cui la parte è pronta per l'utilizzo previsto. È un aspetto fondamentale della stampa 3D in quanto non è una tecnologia a "pulsante" ma piuttosto una raccolta di tecniche, passaggi e competenze specializzate necessarie per produrre un pezzo finito di qualità. Il giusto utilizzo di una combinazione delle attività di post-processing può infatti risolvere la maggior parte dei requisiti tecnici, che potrebbero non essere sempre efficaci con l'AM. Quando vengono aggiunti diversi passaggi post-processing alla lavorazione manifatturiera, i vantaggi di scorte ridotte, tempi di consegna brevi e produzione su richiesta possono essere quasi totalmente (o parzialmente) persi. Alcuni metodi utilizzati con AM non richiedono nulla di speciale per accogliere la forma e le caratteristiche del modello in costruzione; ad esempio, processi come la burattatura e la tintura sono diventati comuni, consentendo la lavorazione in serie di singole parti senza necessità di modificare il processo di AM. Le eccezioni sono i

prodotti di alto valore, personalizzati e con una produzione in serie ad alto volume.

Nel nostro studio abbiamo analizzato le seguenti tecnologie di post processing:

- Hot Isostatic pressing (HIP)
- Thermal Deburring
- Radiografia industriale
- Tomografia industriale computerizzata (CT)

### **3.1 Hot Isostatic Press (HIP)**

Nella maggior parte dei casi, quando si produce un componente con tecnologia SLM è necessario eseguire un trattamento termico per 2 motivi: per la distensione delle tensioni, in quanto il processo SLM avendo una solidificazione molto veloce del fuso, porta a delle tensioni residue molto elevate (maggiori nei materiali tenaci es. leghe titanio) e per l'aumento della duttilità che tradotto in termini fisici comporta l'aumento della grandezza dei grani, in quanto i grani dei componenti prodotti sono molto piccoli e ciò comporta una maggiore opposizione al movimento delle dislocazioni.

La pressatura isostatica a caldo (HIP) è stata utilizzata per diversi decenni in diverse industrie per una vasta gamma di applicazioni. Negli ultimi anni è diventato un importante post processo per la produzione additiva in metallo (AM). Il processo HIP elimina i difetti interni nei

materiali prodotti in modo additivo, con conseguente miglioramento delle proprietà del materiale come migliore fatica, duttilità e tenacità alla frattura. Viene utilizzato per consolidare la polvere metallica, eliminare i difetti nei solidi come i pori, vuoti e crepe interne, rendendo così la densità teorica del materiale quasi al 100%. Quando le polveri metalliche sciolte vengono consolidate dalla HIP, il ciclo deve essere eseguito in capsule a tenuta di gas, in lamiera o in vetro. Le parti invece precedentemente addensate che non hanno porosità connessa alla superficie, possono essere sottoposte a HIP senza la necessità di incapsulamento.

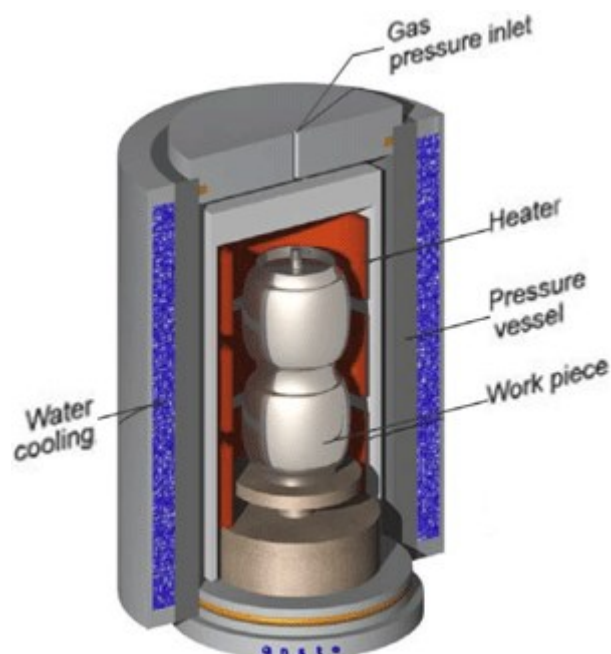


Figura 3.1.1 Layout camera HIP

Un'unità HIP è costituita principalmente da: un recipiente a pressione, un sistema di riscaldamento e un sistema di gas Argon. Il processo include un'alta temperatura e un'elevata pressione del gas isostatica ovvero essa agisce su tutte le superfici del componente in qualsiasi direzione,

portando alla densificazione. I meccanismi che portano all'addensamento sono: deformazione plastica, creep e la diffusione.

Inizialmente la deformazione plastica è il meccanismo di guida dominante poiché la pressione esterna applicata è superiore alla resistenza allo snervamento del materiale alla temperatura HIP, facendo così collassare i vuoti nel materiale.

Dopo la deformazione plastica iniziale, il creep e la diffusione contribuiscono alla densificazione. Questi meccanismi non solo collassano e chiudono i pori, ma li eliminano totalmente per creare un materiale privo di difetti.

La resistenza allo snervamento diminuisce effettivamente con il trattamento termico tramite HIP rispetto al materiale stampato, ma si genera una migliore duttilità: questo cambiamento è spiegato dalla microstruttura fine del materiale che, così come viene stampato, è caratterizzato da una velocità di raffreddamento molto elevata (diverse migliaia di gradi al secondo) che offre un'elevata resistenza allo snervamento. Quando vengono aggiunti i trattamenti termici con velocità di raffreddamento più convenzionali come HIP, la microstruttura viene ingrossata con conseguente resistenza allo snervamento inferiore ma ottenendo una maggiore duttilità grazie alla rimozione di qualsiasi porosità. In figura 3.1.3. possiamo notare il cambiamento nella microstruttura che dell'acciaio 316L preso in considerazione, che andrà ad influenzare la porosità superficiale.

Ci sono tre parametri principali in un ciclo HIP che determinano la densificazione e sono caratterizzanti per i modelli di costo che andremo

poi a strutturare: la temperatura, la pressione e il tempo di tenuta. Le temperature HIP sono spesso nell'intervallo dal 70 al 90% della temperatura di solidificazione del materiale in lavorazione e la pressione utilizzata è solitamente nell'intervallo 100-200 MPa, principalmente con l'argon come mezzo di pressione.

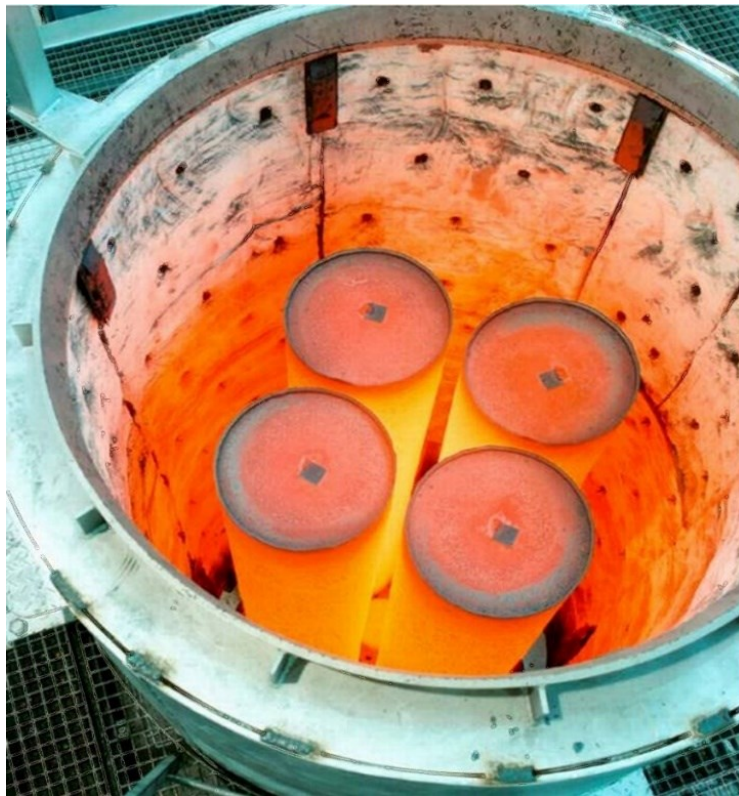
Il tempo di mantenimento dipende in qualche modo dallo spessore dei componenti in lavorazione poiché c'è un ritardo di temperatura più lungo nel nucleo di parti di grandi dimensioni a seconda della conduttività termica del materiale. Per un materiale specifico, possono esistere diversi cicli HIP che genereranno il 100% di densità ma in modi diversi, poiché tutti e tre i parametri influenzano il processo di densificazione. Ad esempio, un ciclo con temperatura relativamente bassa, bassa pressione, ma tempo di attesa lungo può generare gli stessi risultati di un ciclo con temperatura relativamente alta, alta pressione e tempo di attesa breve in termini di densificazione.

Altri parametri che devono essere definiti sono la velocità di riscaldamento e di raffreddamento (in particolare quest'ultima) le quali non influiscono sull'addensamento del materiale ma possono essere molto importanti per la microstruttura finale e quindi per le proprietà meccaniche del materiale in lavorazione.

Come già detto, questi parametri sono essenziali per poi andare a calcolare quello che sarà il costo totale del processo: attraverso le varie tempistiche, (tempo mantenimento, carico, scarico, riscaldamento e raffreddamento) che variano a seconda del materiale, potremo poi andare a calcolare il numero di pezzi lavorati in un determinato ciclo di lavoro. Calcolando poi il numero di cicli sostenuti all'anno ( o numero di



parti lavorate all'anno) e considerando i costi generali quali energia, gas, manodopera e costo orario della macchina, andremo ad ottenere un costo totale per parte lavorata. Per sostenere alte temperature vengono utilizzati dei forni al molibdeno, fino a 1350° o forni in grafite di carbonio/tungsteno per temperature più alte fino a 2200°. All'interno del recipiente a pressione, l'isolamento (ottenuto tramite l'utilizzo di fibre ceramiche e fogli di molibdeno) consente di proteggere il recipiente dal calore e di mantenere alta la temperatura. Un esempio di forno HIP viene rappresentato in Fig. 3.1.2.



**Figura 3.1.2 Esempio forno HIP**

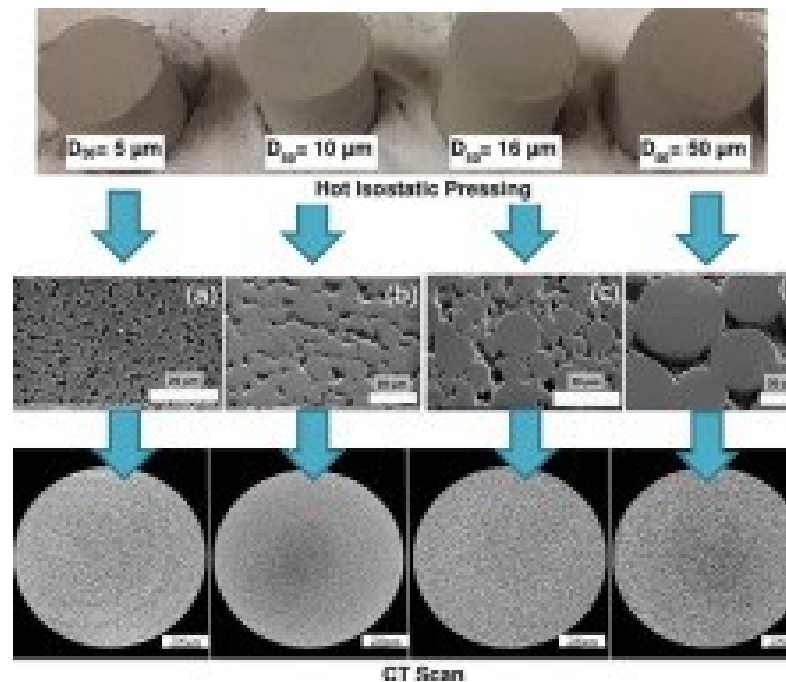


Figura 3.1.3 Effetti della HIP sulla porosità (acciaio 316L)

## 3.2 Thermal Deburring

La Sbavatura Termica (TEM – Thermal Energy Method) si applica efficacemente su tutti quei componenti dove si ha presenza di bave prodotte da lavorazioni come tornitura, fresatura, brocciatura o da pressofusione. Particolarmente interessanti sono i risultati ottenibili su componenti caratterizzate da passaggi di fluidi come ad esempio valvole oleodinamiche, corpi pompa e tutti quei particolari con geometrie ed intersezioni complesse e di difficile accesso con utensili. Il materiale da rimuovere viene bruciato a causa di una reazione chimica tra il materiale e la miscela di gas. A tal fine, i pezzi sono posti in una camera di sbavatura a campana che viene chiusa idraulicamente da una piastra di chiusura; nella figura 3.2.2 viene rappresentata una macchina per sbavatura termica dove vengono appunto caricati i pezzi nelle varie

“stazioni” poste nella piattaforma rotante che poi caricheranno i pezzi all’interno della camera della macchina. Viene alimentata una miscela di gas accuratamente definita nella camera di sbavatura tramite un misuratore di gas sistema e acceso da una scintilla. La temperatura della successiva combustione va da 2.500 a 3.300 °C (da 4.532 a 5.972 °F). Con questa combinazione la fresa raggiunge la sua temperatura di accensione e reagisce con l'eccesso ossigeno all'interno della camera di sbavatura, portando ad una combustione completa della bava entro 20 ms. Nella seguente figura 3.2.1 possiamo notare gli effetti fisici della sbavatura termica.

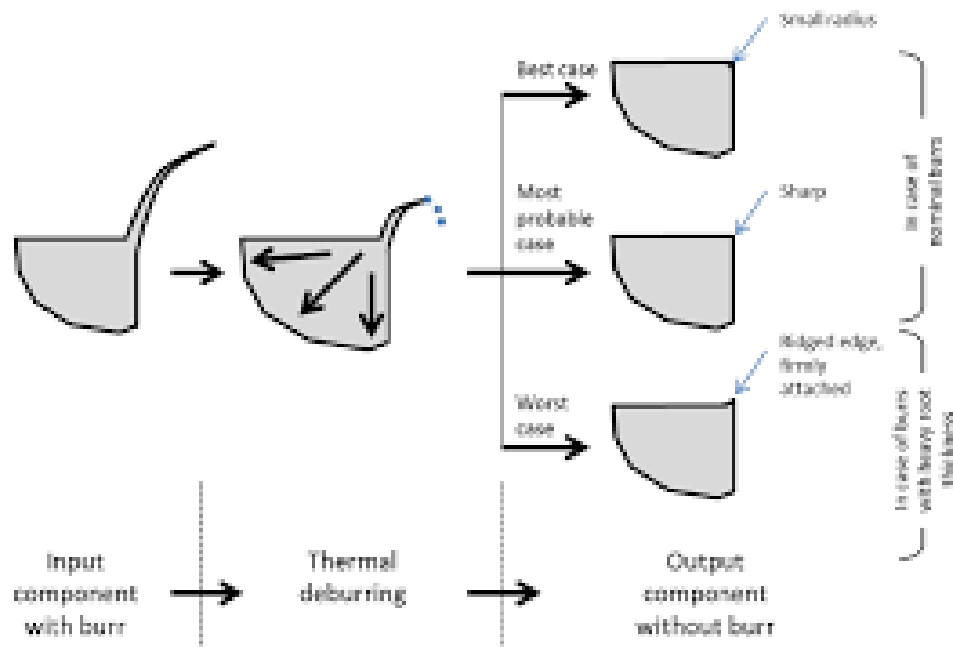


Figura 3.2.1 Caratteristiche pezzo sbavato



**Figura 3.2.2. Caricamento dei pezzi nella piattaforma**

Grazie a questo processo, si ha la garanzia che tutti i pezzi vengano sbavati secondo un processo ripetitivo e costante nel tempo, inoltre le parti “staccabili” (scorie o bave di lavorazione, residui dal processo di asportazione truciolo, ecc.) sono completamente rimosse e viene radicalmente eliminata la possibilità di presenza di corpi estranei che entrino in circolo in quello che sarà l'apparato finale.

Si possono sottoporre al processo tutti i materiali che siano ossidabili, come la ghisa, gli acciai, ottone, ma anche i materiali più delicati al processo specifico, quali l'alluminio, la zama, le leghe leggere in genere, ove la sbavatura termica garantisce risultati di finitura con aggressione di bave e scorie fino a circa 1/10 di mm di spessore. Ovviamente, a

seconda della tipologia di materiale preso in considerazione, varieranno alcuni parametri legati ad esso, in questo caso (come vedremo anche nei modelli di calcolo del costo) varieranno le pressioni massime e minime utilizzate.

Nel complesso, il tempo di ciclo del processo di sbavatura termica è molto breve: si parla di circa due minuti per il processo di sbavatura in sé, a cui si aggiunge il tempo impiegato dall'operatore per caricare i vari pezzi nella stazione e il tempo di rotazione della piattaforma che permette il caricamento dei pezzi.

Un fattore importante che è stato considerato nella formulazione del modello di costo è il "gap" tra pezzo e camera ovvero la differenza (in mm) tra diametro (e altezza) massima della camera e diametro (e altezza) massima del pezzo. Questo valore, ci consentirà, poi, di calcolare il numero massimo di pezzi elaborati da ciascuna macchina ed è un parametro fondamentale in quanto ci permette di effettuare una verifica per quanto riguarda i valori inseriti in Input, per controllare se siano consoni alle capacità della macchina associata alla lavorazione.

## 2.3. Radiografia industriale

La radiografia industriale fa parte, insieme alla tomografia industriale computerizzata e ad altri, dei processi che sono denominati "Controlli non distruttivi" in quanto vengono effettuati direttamente sul pezzo prodotto in modo da verificare l'eventuale presenza di difetti che possano compromettere la funzionalità del pezzo.

Risulta possibile evidenziare un gran numero di discontinuità presenti in manufatti industriali, getti o saldature, quali ad esempio porosità, inclusioni, soffiature, cricche, tarli, inclusioni di scoria, mancanza di penetrazione.

Il principio di funzionamento di tali tecniche si basa sulle alterazioni che radiazioni elettromagnetiche subiscono quando incontrano un difetto nel loro percorso all'interno del materiale. Quando un fascio di onde elettromagnetiche di elevatissima energia fotonica (elevata frequenza) e fortemente ionizzanti (raggi X o raggi gamma), passa attraverso l'oggetto da esaminare, viene assorbito con legge esponenziale in funzione dello spessore e della densità della materia attraversata). Lo sviluppo della pellicola produce un'immagine bidimensionale dell'oggetto radiografato. In questa immagine le variazioni di spessore, densità, composizione, del pezzo vengono visualizzate come variazioni di densità dell'immagine (in pratica variazioni in una scala di grigio).

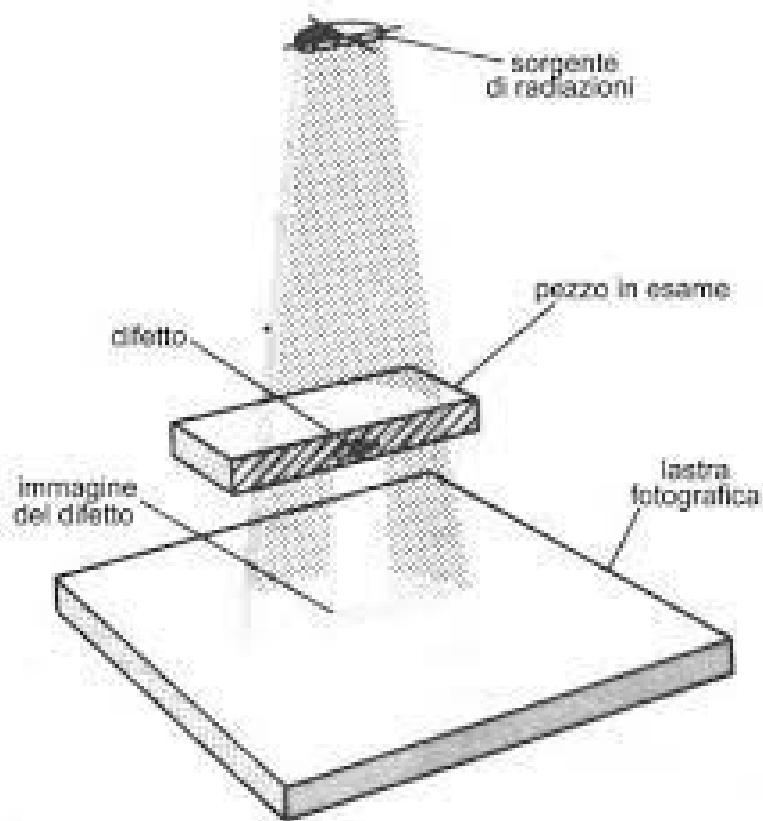


Figura 3.3.1 Schema radiografia

La valutazione viene eseguita per confronto della densità radiografica con le caratteristiche conosciute dell'oggetto stesso o con standard radiografici prodotti dallo stesso oggetto di qualità accettabile. Quindi gli elementi essenziali del controllo radiografico sono tre: la sorgente di radiazione, il pezzo da controllare e la lastra radiografica. La radiografia industriale è proficua per l'esame di pezzi di geometria semplice, la cui proiezione dia luogo a sfondi relativamente omogenei, nei quali ogni piccola variazione d'intensità d'annerimento è facile da osservare e da interpretare. Man mano che la geometria dei pezzi diventa più complessa, questa tecnica richiede una grande esperienza. Ha il vantaggio di fornire immagini facilmente interpretabili ma non può dare indicazioni sulla

profondità del difetto rilevato. Evidenzia tendenzialmente solo i difetti di forma tridimensionale oppure bidimensionale ma orientato in modo tangenziale rispetto ai raggi X.

### **3.4 Tomografia industriale computerizzata (CT)**

La tomografia industriale computerizzata rappresenta la tecnologia più interessante in assoluto per i test non distruttivi. Il termine tomografia è costituito dai termini greci tomos (taglio) e graphein (scrivere) e letteralmente significa “raffigurazione a sezioni o strati”.

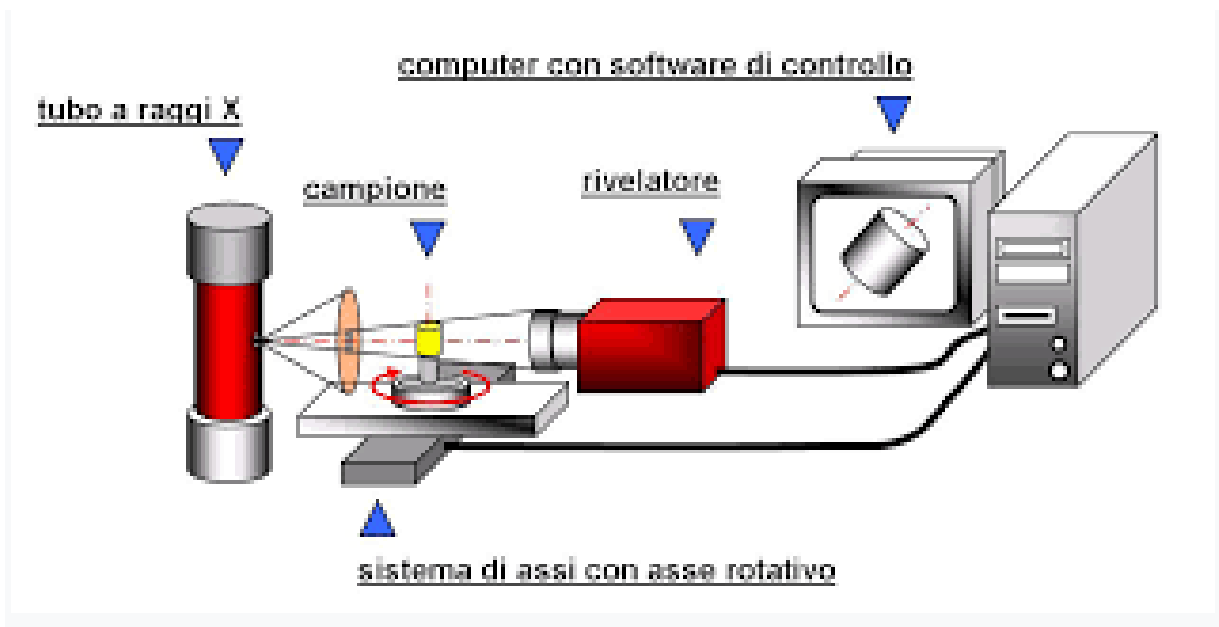
Per le applicazioni industriali ha conosciuto, in anni recenti, la sua maggiore diffusione nella ricerca dei difetti, nella misura delle dimensioni di parti non accessibili, nell'osservazione dei guasti e nell'analisi delle proprietà dei materiali come la distribuzione di densità.

La tomografia computerizzata è un metodo eccellente per la misura delle dimensioni di parti non accessibili, per l'identificazione di difetti, per l'analisi degli spessori critici delle pareti e per la ricostruzione della geometria 3D di getti complessi. Ingegneri, costruttori, ricercatori e scienziati possono così scoprire caratteristiche che non potevano prima essere esaminate senza distruggere l'oggetto del test. La richiesta di analisi tomografiche di getti in lega leggera è cresciuta considerevolmente negli ultimi anni; presso alcune aziende del settore sono in fase di sviluppo nuovi sistemi CT in cui i costi di acquisizione dati potranno essere sensibilmente ridotti con una ricaduta favorevole



all'allargamento dello spettro delle applicazioni della tomografia computerizzata in campo industriale.

I dati ottenuti permettono di sviluppare nuovi materiali e nuove geometrie. Un provino completo, inquadrabile in una sola scansione, consente di rilevare possibili difetti e contemporaneamente le dimensioni. Sostanzialmente la tomografia rappresenta un'evoluzione del processo radiografico appena descritto: il principio di funzionamento è analogo in quanto viene interposto il componente da controllare tra una sorgente di fotoni e un recettore, come mostrato in figura 3.4.1.



**Figura 3.4.1 Schema Tomografia Computerizzata**

Il componente viene posto su una tavola rotante alla quale viene fatto fare un giro completo. Viene fatta una scansione mediante il sistema a raggi X ogni frazione di giro, più è piccola la frazione, maggiore sarà la risoluzione dell'immagine ottenuta. Le scansioni vengono successivamente elaborate da un software che fornisce una visione

tridimensionale del componente analizzato; un esempio lo troviamo nella seguente figura 3.4.2 che mostra il modello 3D del pezzo.

La rotazione della piattaforma, come vedremo successivamente nei fogli di lavoro Excel, rappresenta uno dei parametri caratterizzanti per il processo di tomografia. L'angolo totale di rotazione (che può essere impostato di 360° o 180° a seconda della qualità desiderata) e lo "step" (o frazione di giro) che vengono impostato dal progettista della macchina, sono parametri essenziali per calcolare quello che sarà il tempo necessario alla scansione del pezzo.

Utilizzando questi parametri possiamo utilizzare la seguente formula [1]

$$N_{\text{proiezioni}} = \frac{N \cdot \pi}{2}$$

per ottenere, in base all'angolo considerato e alle dimensioni del pixel Detector della macchina scelta, il numero di proiezioni del pezzo effettuate. Questo valore, moltiplicato al tempo di esposizione per ogni

frazione di angolo e al numero degli fps della macchina ci fornirà il tempo di scansione (in secondi) per il relativo pezzo.

$$\text{Tempo esposizione} = N \text{ proiezioni} * \text{tempo esposizione} * \text{numero fotogrammi [5]}$$

Considerando poi i vari costi relativi al processo quali energia, costo dell'operatore e costo orario della macchina e rapportandoli al tempo della scansione, otteniamo quello che sarà il costo totale del processo.

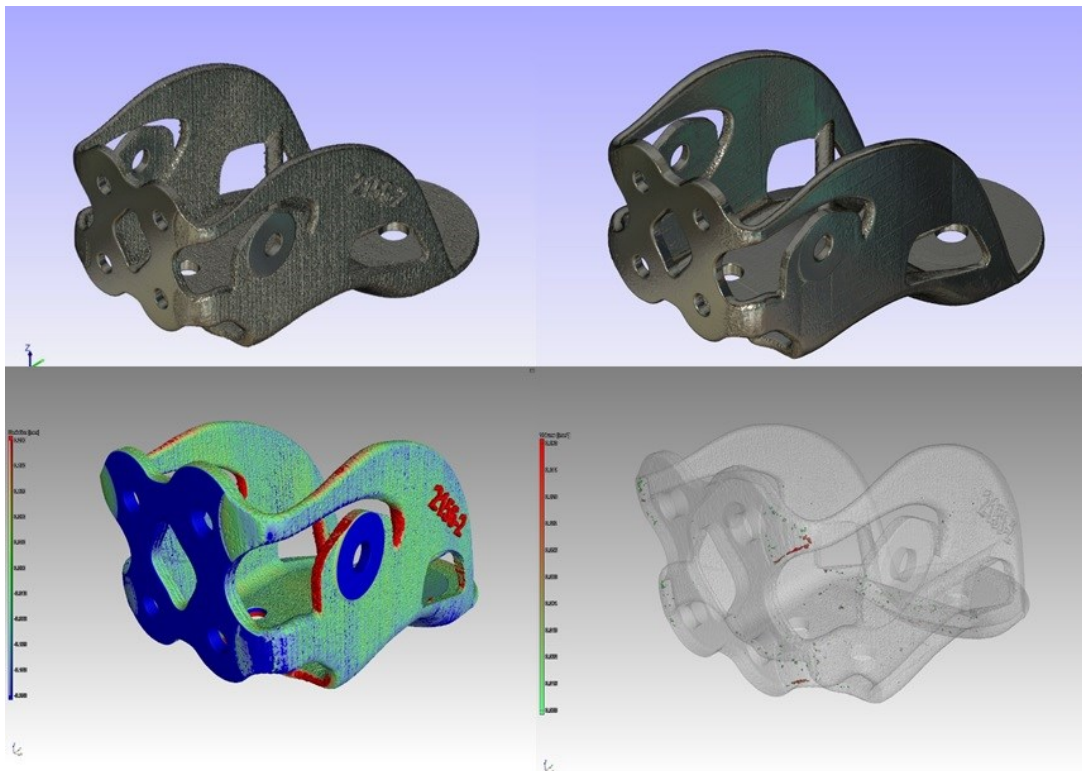


Figura 3.4.2 Modello del pezzo in 3D

## **4 Formulazione dei modelli di costo**

Attraverso l'utilizzo di Excel, sono stati impostati dei modelli di costo che possono essere applicati a ciascuna tipologia di trattamento post-process.

### **4.1 Modello di costo per Thermal Deburring**

Prendiamo ora in considerazione il processo di Thermal Deburring, anche se la struttura dei modelli è circa la stessa per ogni processo (variano ovviamente i parametri caratterizzanti relativi alle macchine e al funzionamento del processo). Nel primo foglio di calcolo, denominato Input, abbiamo in ingresso i parametri geometrici e fisici (materiale) che caratterizzano il pezzo, insieme ad altri parametri che invece ne caratterizzano il tempo di lavorazione e il costo : come mostrato in Fig. 4.1, vi sono infatti da inserire le dimensioni di ingombro del pezzo (diametro ed altezza), il volume (il quale viene automaticamente calcolato una volta inserite le dimensioni), la tipologia di macchina da utilizzare e il numero di pezzi da lavorare.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	<b>PARAMETRI COMPONENTI</b>									
3	Parametri	Valore	Unità di misura							
4	Diametro ingombro	0,1	m							
5	Altezza ingombro	0,2	m							
6	Volume ingombro	0,00157	m <sup>3</sup>							
7	Volume ingombro (Nm <sup>3</sup> )	0,001489564	Nm <sup>3</sup>							
8	Tipologia macchina	Extrude Hone 450								
9	Quantità di pezzi elaborati	5	OK							
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										

**Figura 4.1 Foglio "Input"**

Alla fine dell'inserimento dei dati, ci sarà una verifica che ci permetterà di capire se i parametri scelti dall'utente saranno consoni alla macchina e alla quantità di pezzi da lavorare scelti; nella cella C9, infatti, troviamo un controllo relativo al fatto che i pezzi elaborati devono essere ovviamente minori dei pezzi lavorabili dalla macchina per ogni caricamento.

Successivamente al foglio di Input troviamo un foglio denominato Materiale che mostra le relazioni che ci sono tra il materiale utilizzato e le pressioni massime e minime che la miscela di gas deve avere all'interno della camera per ottenere un corretto svolgimento del processo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	<b>PARAMETRI MATERIALE</b>																
2	Materiale	Pressione min [bar]	Pressione max [bar]														
3	Acciaio	5	20														
4	Alluminio	8	20														
5	Chisa	5	20														
6	Zinco	5	20														
7	Ottone	8	20														
8																	
9																	
10																	
11																	
12																	
13																	
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	

Figura 4.2 Foglio "Materiali" Thermal Deburring

Proseguendo troviamo il foglio di calcolo "Parametri generali" relativo a tutti quelli che sono i parametri caratterizzanti delle macchine per sbavatura termica.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	<b>Parametri costi orari</b>								
3	Machine	iTem 250	iTem 400	ude Hone	iTem 400/600	ità di misura	<b>Fonte</b>		
4	Price	250000	350000	370000		380000	€		
5	Annual maintenace cost	18750	26250	27750		28500	€/year	<a href="https://www.maquinaria">https://www.maquinaria</a>	
6	Depreciation time	10	10	10		10	years	<a href="https://petersonsawmill">https://petersonsawmill</a>	
7	Discount rate	8%	8%	8%		8%	%		
8	Building area	20	25	34		23	m <sup>2</sup>		
9	Building yearly rent rate	130	130	130		130	€/m <sup>2</sup> /year		
10	Machine discounted cost	450000	630000	666000		684000	€		
11	Load factor	90%	90%	90%		90%	%		
12	Working time	3110	3110	3110		3110	h/year		
13	Depreciation hourly rate	14,47	20,25	21,41		21,99	€/h		
14	Maintenance hourly rate	6,03	8,44	8,92		9,16	€/h		
15	Production overhead hourly	0,84	1,04	1,42		0,96	€/h		
16									
17									
18									
19									
20	<b>Parametri tempo ciclo</b>								
21	Macchina	iTem 250	iTem 400	Extrude H	iTem 400/600		<b>Fonte (video)</b>		
22	Tempo single shot	75	45	60		55	<a href="https://www.youtube.com/watch?">https://www.youtube.com/watch?</a>		
23	Tempo double shot	130	105	100		105	<a href="https://www.youtube.com/watch?">https://www.youtube.com/watch?</a>		
24							<a href="https://www.youtube.com/watch?">https://www.youtube.com/watch?</a>		
25							<a href="https://www.youtube.com/watch?">https://www.youtube.com/watch?</a>		
26									
27									
28	<b>Parametri Macchine</b>								
29		iTem 250 SC					<b>Fonte</b>		
30									

Figura 4.3 Foglio "parametri generali" Thermal deburring

In questo caso abbiamo analizzato 4 macchine differenti relative a 2 aziende diverse. Come dati caratterizzanti abbiamo: capienza massima della camera per la lavorazione, volume di ingombro della macchina, pressione massima, numero di stazioni (la piattaforma è suddivisa in stazioni dove si inseriscono i pezzi che andranno caricati nella camera della macchina) e gap relativo ad altezza e diametro, che ci permette di calcolare (fig. 4.4) il numero di pezzi massimi elaborati da ogni tipologia di macchina per "inornata".

Facendo il rapporto tra gap diametrale e il diametro totale della camera e sommandolo con il rapporto tra gap dell'altezza e l'altezza totale della camera, troviamo un fattore correttivo (sempre <1) che ci permetterà di calcolare il numero dei pezzi caricabili per ogni macchina attraverso la seguente formula:

$$N^{\circ} \text{ pezzi caricabili} = \text{Volume camera} / \text{Volume pezzo} * (1-K)$$

dove K è il fattore correttivo totale.

In questo foglio troviamo anche i parametri relativi alle tempistiche per le due tipologie di processi: single o double shot, a seconda delle esigenze di lavorazione del pezzo, sommate ai tempi fissi aggiuntivi relativi all'operatore (caricamento/scaricamento dei pezzi) e alla macchina stessa (apertura/chiusura sportello).

Infine, nel foglio "Calcoli" troviamo tutti quelli che costituiscono i costi totali del processo (Fig. 4.4):

- costo del metano e dell'ossigeno, calcolati moltiplicando il costo unitario di ogni gas (espresso per ogni Nm<sup>3</sup>) per il volume occupato all'interno della camera
- costo dell'operatore, ottenuto moltiplicando il costo orario dell'operatore, che in questo caso è di 30€/h, per il tempo ciclo del processo (single o double shot)
- costo delle operazioni, espresso dal costo orario dovuto alla macchina rapportato al tempo necessario alla lavorazione. Il costo orario della macchina viene ottenuto considerando i vari costi orari relativi all'ammortamento, alla manutenzione della macchina, all'affitto dello spazio e al costo della produzione.

Sommando questi costi otterremo quello che rappresenta il costo totale per infornata.

	A	B	C	D	E	F
2	<b>Tempo ciclo totale</b>					
3	Tempo ciclo totale single shot	105	s			
4	Tempo ciclo totale double shot	145	s			
5						
6						
7	<b>Costo orario macchina</b>					
8	<b>Parametro</b>	<b>Valore</b>	<b>Unità</b>			
9	Price	370000	€			
10	Annual maintenance cost	27750	€/year			
11	Depreciation time	10	years			
12	Discount rate	0,08	%			
13	Building area	34	m <sup>2</sup>			
14	Building yearly rent rate	130	(€/m <sup>2</sup> )/year			
15	Machine discounted cost	666000	€			
16	Load factor	0,9	%			
17	Working time	3110,40	h/year			
18	Depreciation hourly rate	21,41	€/h			
19	Maintenance hourly rate	8,92	€/h			
20	Production overhead hourly rate	1,42	€/h			
21	Max machined pieces	40,08	/			
22	<b>Costo orario macchina</b>	<b>31,75</b>	€/h			
23						
24	<b>Costo infornata</b>					
25	costo ossigeno	0,02	€			
26	costo metano	0,01	€			
27	costo energia	0,12	€			
28	costo operatore	1,21	€			
29	costo operazioni	1,28	€			
30	<b>Costo totale ogni infornata</b>	<b>2,64</b>	€			
31						
32						
33						
34						

Figura 4.4 Foglio "Calcoli" Thermal deburring



Come già precisato in precedenza, il modello di costo è strutturato in modo simile per tutti i processi ovvero troveremo sempre una suddivisione dei fogli di Excel in "Input", "Parametri Materiale", "Parametri Generali" e "Calcoli", che si differenzieranno ovviamente a seconda dei parametri caratterizzanti dei processi.

Ad esempio, prendendo in considerazione il processo di Tomografia industriale computerizzata, si può notare come siano presenti, differentemente dagli altri processi, dei parametri della macchina fissi stabiliti dal progettista (oltre ai parametri caratterizzanti delle macchine per CT) ovvero l'angolo di rotazione totale della piattaforma dove viene posto il pezzo da analizzare e l'angolo di "scan&stop" dopo il quale la piattaforma si ferma in modo da acquisire le proiezioni del pezzo necessarie alla scansione. Nel nostro caso, come possiamo notare, abbiamo un angolo di rotazione della piattaforma di 360° con uno step ad ogni 0.60° e un tempo di mantenimento di 0.35 secondi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	<b>Parametri generali macchine</b>										
2	Tipologia macchina	YXLON UX20	YXLON FF20 CT	YXLON FF35 CT		Fonte	*In tutte le macchine viene utilizzato il p				
3	Volume ingombro	10	5	10	m3	https://www.yxlon.com/home					
4	Energia sorgente X	160	190	225	kV						
5	Potenza massima	1,8	0,08	0,32	kW						
6	Diametro max misurabile	700	280	530	mm						
7	Altezza max misurabile	1060	700	800	mm						
8	Volume scansionabile	407729000,00	43080800,00	176405200,00	mm3						
9	Peso max. caricabile	100	17	27	kg						
10	Dimensione pixel detector	13,37	11,78	12,24	µm						
11	Matrice pixel detector (Risoluzione detector)	1280x1280	1792x2176	2880x2880	pixel						
12	Distanza focus/detector massima	900	790	1170	mm						
13	Dimensioni macchina focale	0,4	0,4	1	mm						
14	Visibilità dettagli 3D	0,15	0,15	4	µm						
15	Frame per secondo (fps)	50	30	15	fps						
16											
17											
18	<b>Parametri progettazione</b>										
19	Angolo di rotazione piattaforma	180	*	Fonte	Chatzinikolaou E, Keklikoglou K (2021)	Micro-CT protocols for scanning and 3D					
20	Rotation step	0,6	*								
21	Tempo esposizione per fotogramma	0,35	s								
22											
23											
24											
25	<b>Costi orari macchina</b>										
26	Machine	YXLON UX20	YXLON FF20 CT	YXLON FF35 CT	Unità di misura						
27	Price	250000	350000	450000	€						
	Input	Parametri materiale	Parametri macchina	Calcoli							

Figura 4.5 Parametri macchina tomografica

## 4.2 Modello di costo per Hot Isostatic Pressing:

Anche nel modello di costo per la pressatura isostatica a caldo ritroviamo lo stesso schema: in Input (Fig. 4.6) abbiamo i parametri geometrici del pezzo da lavorare (lunghezza, larghezza, altezza e volume di ingombro), il peso e il numero di pezzi lavorati per ogni lotto.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2	<b>Macchina</b>												
3	Forno	Forno piccolo	-										
4	Diametro forno		186	mm									
5	Altezza forno		500	mm									
6	Volume forno		13.585.817	mm <sup>3</sup>									
7	Densità di caricamento del forno		70%	%									
8	Numero componenti per carico forno		35	-									
9	Peso componenti per carico forno		12	kg									
10	Potenza media macchina		21	kW									
11	Consumo gas		1,5	Nm <sup>3</sup> /h									
12	Costo orario macchina		45,00	€/h									
13													
14	<b>Tempi ciclo</b>												
15	Tempo carico/scarico		1,1	h									
16	Tempo mantenimento		4	h									
17	Tempo riscaldamento/raffreddamento		2,2	h									
18	Tempo ciclo		7,3	h									
19													
20	<b>Capacità produttiva macchina</b>												
21	Ore lavorative al giorno		24	h									
22	Giorni lavorativi a settimana		5	giorni									
23	Settimane lavorative all'anno		48	settimane									
24	Carico macchina		90%	%									* Percentuale di tempo disponibile (10% macchina in manutenzione)
25													
26	<b>Capacità produttiva componente</b>												
27	Numero cicli al giorno		3	cicli/giorno									
28	Numero di cicli a settimana		16	cicli/settimana									
29	Numero di cicli all'anno		691	cicli/anno									
30	Numero parti all'anno		24.185	parti/anno									
31													
32	<b>Costi - parte</b>												
33	Consumo energia		€ 6,40	€/ciclo									
34	Consumo gas		€ 4,20	€/ciclo									
35	Costo lavoro		€ 44,00	€/ciclo									
36	Costo macchina		€ 328,50	€/ciclo									
37	TOTALE - ciclo		€ 383,10	€/ciclo									
38	TOTALE - parte		€ 10,95	€/parte									
39													
40	<input type="radio"/> Input   <input type="radio"/> Parametri materiale   <input checked="" type="radio"/> Calcoli   <input type="radio"/> Risultati            (+)												

**Figura 4.6 Parametri "Input" HIP**

Nel foglio successivo, denominato "Parametri materiale" troveremo tutte le caratteristiche dei vari materiali utilizzati che poi caratterizzeranno le tempistiche e i costi del processo, ovvero: calore specifico, densità, temperatura, pressione e tempo di mantenimento nel forno.

Proseguendo nel modello di calcolo arriviamo al foglio "Calcoli" dove vengono forniti in output tutti i dati relativi alla tipologia di forno scelto.

Possiamo infatti scegliere tra un forno di piccole o di grandi dimensioni; questa scelta andrà a variare quelli che sono, come già detto in precedenza, i parametri caratterizzanti della macchina: scegliendo un

forno grande, ad esempio, noteremo che il costo del gas e dell'energia, come anche il costo orario totale della macchina, sarà più alto rispetto

ad un forno piccolo, in quanto sia il volume che la potenza richiesta saranno maggiori. Anche le tempistiche saranno diverse per i due forni:

nel caso del forno piccolo, infatti, il tempo di caricamento/scaricamento del pezzo sarà inferiore rispetto al forno grande.

The screenshot shows a spreadsheet application with a table containing the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
2	<b>Macchina</b>										
3	Forno	Forno grande	-								
4	Diametro forno	375	mm								
5	Altezza forno	1200	mm								
6	Volume forno	132.535,940	mm <sup>3</sup>								
7	Densità di caricamento del forno	70%	%								
8	Numero componenti per carico forno	349	-								
9	Peso componenti per carico forno	120	Kg								
10	Potenza media macchina	84	kW								
11	Consumo gas	3,3	Nm <sup>3</sup> /h								
12	Costo orario macchina	65,00	€/h								
13											
14	<b>Tempi ciclo</b>										
15	Tempo carico/scarico	1,6	h								
16	Tempo mantenimento	4	h								
17	Tempo riscaldamento/raffreddamento	2,2	h								
18	Tempo ciclo	7,8	h								
19											
20	<b>Capacità produttiva macchina</b>										
21	Ore lavorative al giorno	24	h								
22	Giorni lavorativi a settimana	5	giorni								
23	Settimane lavorative all'anno	48	settimane								
24	Carico macchina	90%	%							* Percentuale di tempo disponibile (10% macchina in manutenzione)	
25											
26	<b>Capacità produttiva componente</b>										
27	Numero cicli al giorno	3	cicli/giorno								
28	Numero di cicli a settimana	15	cicli/settimana								
29	Numero di cicli all'anno	648	cicli/anno								
30	Numero parti all'anno	226.152	parti/anno								

Fig. 4.7 Calcoli Hip

Per quanto riguarda il pezzo per lotto prodotto invece, avremo che il prezzo per un ciclo totale di produzione sia molto più elevato nel caso del forno grande, in quanto molti più pezzi saranno lavorabili nello stesso arco di tempo. Contemporaneamente, per la stessa motivazione, avremo che il costo per singola parte lavorata sarà più elevato nel caso del forno piccolo.

## 4.3 Modello di costo per Tomografia industriale computerizzata

Passiamo alla Tomografia industriale Computerizzata, che sarà anche oggetto del nostro caso di studio.

In input, Fig. 5.1, ritroviamo sempre i parametri geometrici di ingombro del pezzo, seguito dalla scelta della macchina da utilizzare, da parte dell'utente, e del materiale del pezzo. A seconda della macchina utilizzata e del materiale, ci saranno due verifiche: una per quanto riguarda lo spessore massimo del pezzo analizzabile e una per la conformità delle dimensioni di ingombro del pezzo in relazione alla capacità della macchina.

Nel foglio successivo, in Fig. 4.8, troviamo una tabella che lega il voltaggio minimo richiesto allo spessore analizzabile per ogni materiale, essenziale per la verifica nel foglio Input.

	Acciaio/Ceramica	Alluminio	Plastica	
1	<b>Parametri materiali</b>			
2	Voltaggio raggi X	130	150	190 225 450 kV
3	Acciaio/Ceramica	5	<8	<25 <40 <70 mm
4	Alluminio	<30	<50	<90 <150 <250 mm
5	Plastica	<90	<130	<200 <250 <450 mm
6				
7				
8		Acciaio/Ceramica	Alluminio	Plastica
9	YXLON UX20	8	50	130 mm
10	YXLON FF20 CT	25	90	150 mm
11	YXLON FF35 CT	130	200	250 mm
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				

Fig. 4.8 Parametri materiale CT

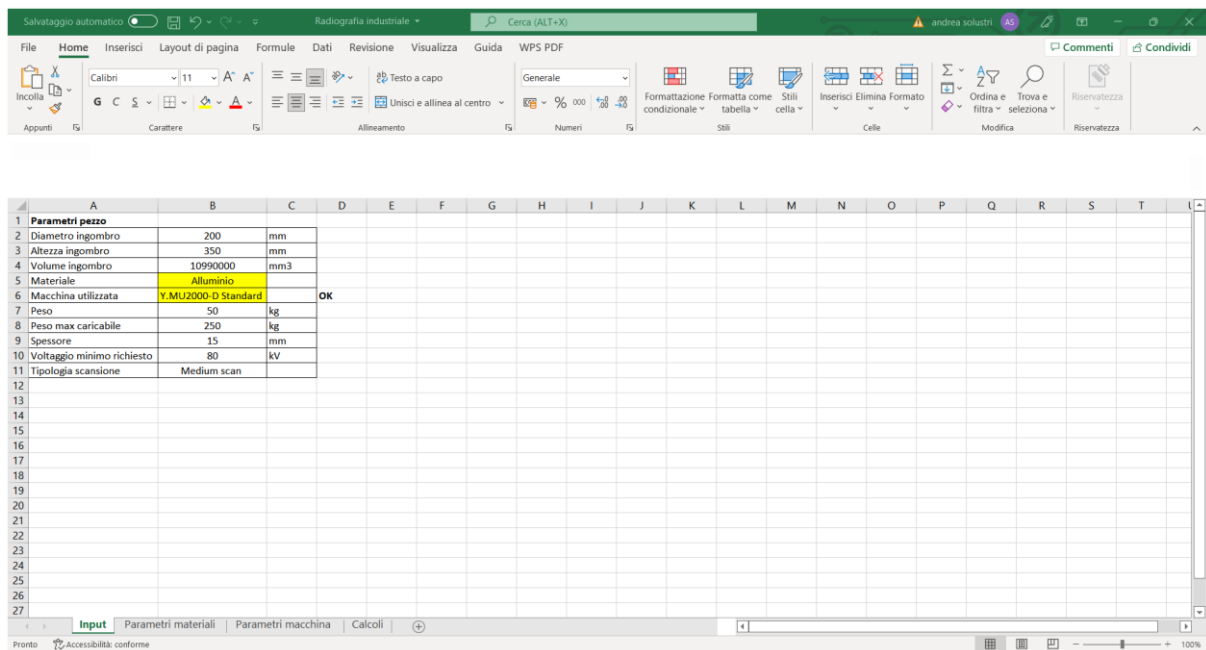
Come già citato nei capitoli precedenti, in Fig. 4.9 troviamo poi tutti i parametri relativi alla macchina e al progettista che ci permetteranno di ottenere un tempo (e conseguentemente un costo) di scansione, quali: angolo di rotazione della piattaforma, angolo di step e tempo di esposizione per fotogramma. Ottenuto il tempo di scansione sarà possibile calcolare il costo dell'operatore (costo orario operatore\*tempo scansione) e, sommandolo agli altri costi dovuti dall'energia (costo unitario energia\*potenza macchina) e al costo orario della macchina, otterremo il costo totale per scansione.

Macchine	YXLON UX20	YXLON FF20 CT	YXLON FF35 CT	Unità di misura
Price	250000	350000	450000	€
Annual maintenance cost	27500	52500	67500	€/year
Depreciation time	5	5	5	years
Discount rate	8%	8%	8%	%
Building area	10	5	10	m <sup>2</sup>
Building yearly rent rate	130	130	130	€/m <sup>2</sup> /year
Machine discounted cost	350000	490000	630000	€
Load factor	60%	60%	60%	%
Working time	4032	4032	4032	h/year
Depreciation hourly rate	17.36	24.31	31.25	€/h
Maintenance hourly rate	9.30	13.02	16.74	€/h
Production overhead hourly rate	0.32	0.16	0.32	€/h
<b>Costi generali</b>				
Costo orario operatore		35		€/h
Costo energia		0.26		€/kWh
<b>Costo orario energia elettrica</b>				
Macchine	YXLON UX20	YXLON FF20 CT	YXLON FF35 CT	
Costo orario energia elettrica	0.468	0.0208	0.0832	€/h
<b>Tempi operatore/macchina</b>				
Macchine	YXLON UX20	YXLON FF20 CT	YXLON FF35 CT	
Apertura serranda	8	8	10	s
Chiusura serranda	8	8	10	s
Setup macchina	900	900	900	s
Tempo totale operatore	916	916	920	s

Fig. 4.9 Parametri macchina CT

## 4.4 Modello di costo per Radiografia industriale

Per quanto riguarda il processo di radiografia industriale, il modello di costo è molto simile a quello della tomografia industriale computerizzata; l'unica differenza tra i due processi, infatti, sta nel fatto che nella tecnologia CT il processo di scansione del modello viene seguito da un'elaborazione in formato 3D da parte di appositi software. Come mostrato in figura 4.10, in Input abbiamo sempre i parametri geometrici di ingombro del pezzo (altezza e diametro), spessore del pezzo, la tipologia di materiale che nel nostro caso è l'alluminio e la possibilità di scelta della macchina adoperata.



The screenshot shows a spreadsheet application window titled "Radiografia industriale". The spreadsheet contains an input form with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	<b>Parametri pezzo</b>																			
2	Diametro ingombro	200	mm																	
3	Altezza ingombro	350	mm																	
4	Volume ingombro	10990000	mm3																	
5	Materiale	Alluminio																		
6	Macchina utilizzata	Y.MUZ000-D Standard		OK																
7	Peso	50	kg																	
8	Peso max caricabile	250	kg																	
9	Spessore	15	mm																	
10	Voltaggio minimo richiesto	80	kV																	
11	Tipologia scansione	Medium scan																		
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				
25																				
26																				
27																				

Fig. 4.10 Foglio Input RT

A seconda dello spessore e del materiale del pezzo avremo noto (cella B10) il voltaggio minimo richiesto per la radiografia, in base alle relazioni tra materiale e voltaggio. Nella tabella degli Input abbiamo anche la possibilità di scegliere che tipologia di scansione effettuare: Fast, Medium o High quality a cui ovviamente corrispondono tempistiche diverse. L'acquisizione delle immagini segue lo stesso processo utilizzato nella tomografia. Oltre alla tempistica della scansione, come vediamo in figura 4.11, ci sono da considerare delle tempistiche dovute alla macchina e all'operatore quali: caricamento e scaricamento del pezzo, apertura e chiusura degli sportelli che impiegano qualche secondo e tempo di setup della macchina da parte dell'operatore, che abbiamo ipotizzato duri circa 5 minuti.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
22	<b>Tempi aggiuntivi operatore</b>																							
23	Macchina	MU60 AE Standard	MU2000-D Standard																					
24	Setup macchina	300	300																					
25	Caricamento pezzo	30	30																					
26	Scaricamento pezzo	30	30																					
27	Apertura cabina	4	6																					
28	Chiusura cabina	4	6																					
29	Totale	368	372																					
30																								
31																								
32	<b>Parametri fissi piattaforma</b>																							
33	Macchina	MU60 AE Standard	MU2000-D Standard																					
34	Angolo di rotazione	360	360																					
35	Angolo di inclinazione	20	20																					
36																								
37	<b>Costi fissi orari</b>																							
38	Costo energia	0,25	€/kWh																					
39	Costo operatore	55	€/h																					
40																								
41																								
42	<b>Costi orari macchina</b>																							
43	Macchine	MU60 AE Standard	MU2000-D Standard	Unità di misura																				
44	Price	60000	75000	€																				
45	Annual maintenance cost	9000	11200	€/year																				
46	Depreciation time	5	5	years																				
47	Discount rate	8%	8%	%																				
48	Building area	13	20	m²																				
49	Building yearly rent rate	130	130	€/m²/year																				
50	Machine discounted cost	84000	105000	€																				
51	Load factor	60%	60%	%																				
52	Working time	4032	4032	h/year																				
53	Depreciation hourly rate	4,17	5,21	€/h																				
54	Maintenance hourly rate	2,23	2,20	€/h																				
55	Production overhead hourly rate	0,42	0,64	€/h																				

**Fig. 4.11 Foglio Parametri macchina RT**

Anche in questo caso troviamo un costo unitario dell'energia, che ci permetterà di calcolare il costo energetico in relazione alla potenza utilizzata dalla macchina, e un costo orario dell'operatore, che nel caso della radiografia si aggira intorno ai 55 €/h. Considerando anche il costo orario della macchina e quello dovuto al consumo di energia, si arriva ad ottenere un costo totale per scansione.



## 5 Caso di studio: calcolo del costo di un processo di CT

Poniamo come caso di studio il calcolo del costo di un processo di Tomografia industriale Computerizzata.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	<b>Parametri input</b>									
2	Altezza ingombro	250	mm							
3	Diametro ingombro	350	mm							
4	Volume ingombro	24040625	mm <sup>3</sup>	<b>OK</b>						
5	Peso	20	kg							
6	Materiale	Alluminio								
7	Tipologia di macchina	YXLON FF35 CT								
8	Peso max supportato	27	kg							
9	Spessore	20	mm							
10	Spessore massimo analizzabile	200	mm							
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										

Pronto

Figura 5.1 Foglio "Input" CT

Come mostrato in figura 5.1 ipotizziamo di avere un pezzo di alluminio da scansionare con diametro ed altezza di ingombro rispettivamente di 250mm e 350mm. Nella cella a fianco al valore del volume calcolato in automatico abbiamo una verifica che ci indica se le dimensioni del pezzo sono idonee rispetto alle dimensioni della camera della macchina selezionata, in questo caso la YXLON FF35 CT. Anche il peso e lo

spessore del pezzo ipotizzati, rispettivamente di 20kg e 20mm, sono conformi alle caratteristiche della macchina (come mostrato dai valori massimi consentiti in figura).

Analizziamo ora i parametri della macchina scelta:

come parametri progettuali impostati dall'operatore abbiamo: un angolo di rotazione della piattaforma durante la scansione di  $360^\circ$ , un angolo di step di  $0.60^\circ$  e un tempo di mantenimento dell'esposizione per fotogramma di 0,35 secondi. Ciò vuol dire che ogni  $0.60^\circ$  la piattaforma rotante si ferma per 0.35 secondi per acquisire le proiezioni del pezzo. Attraverso questi dati, si è poi arrivato al calcolo di due parametri essenziali che determinano il tempo di scansione: il numero delle proiezioni totali del pezzo e il numero di fotogrammi per esposizione. Il primo si trova calcola attraverso la formula già citata nel capitolo della Tomografia Industriale ovvero come metà del prodotto tra la dimensione del pixel Detector della relativa macchina e l'angolo di rotazione della piattaforma, in questo caso  $360^\circ$ . Il numero di fotogrammi per esposizione si ottiene banalmente mettendo in relazione fps della macchina con il tempo di esposizione.

Nel nostro caso specifico abbiamo:

- N° proiezioni = 2203
- N° fotogrammi per esposizione = 5

Tramite il prodotto di questi due valori possiamo ottenere la durata della scansione, espressa in secondi, che nel nostro caso risulta di 67.5 minuti.

Tempo scansione	YXLON UX20	YXLON FF20 CT	YXLON FF35 CT
Macchina	2406,6	2120,4	2203,2
Numero di proiezioni	17,5	10,5	5,25
Numero di fotogrammi per esposizione	245,7	129,9	67,5
Tempo scansione			

Price	450000 €
Annual maintenance cost	67500 €/year
Depreciation time	5 years
Discount rate	0,08 %
Building area	10 m <sup>2</sup>
Building yearly rent rate	130 €/m <sup>2</sup> /year
Machine discounted cost	630000 €
Load factor	0,6 %
Working time	4032 h/year
Depreciation hourly rate	31,25 €/h
Maintenance hourly rate	16,74 €/h
Production overhead hourly rate	0,32 €/h
<b>Costo orario totale macchina</b>	<b>48,31 €/h</b>

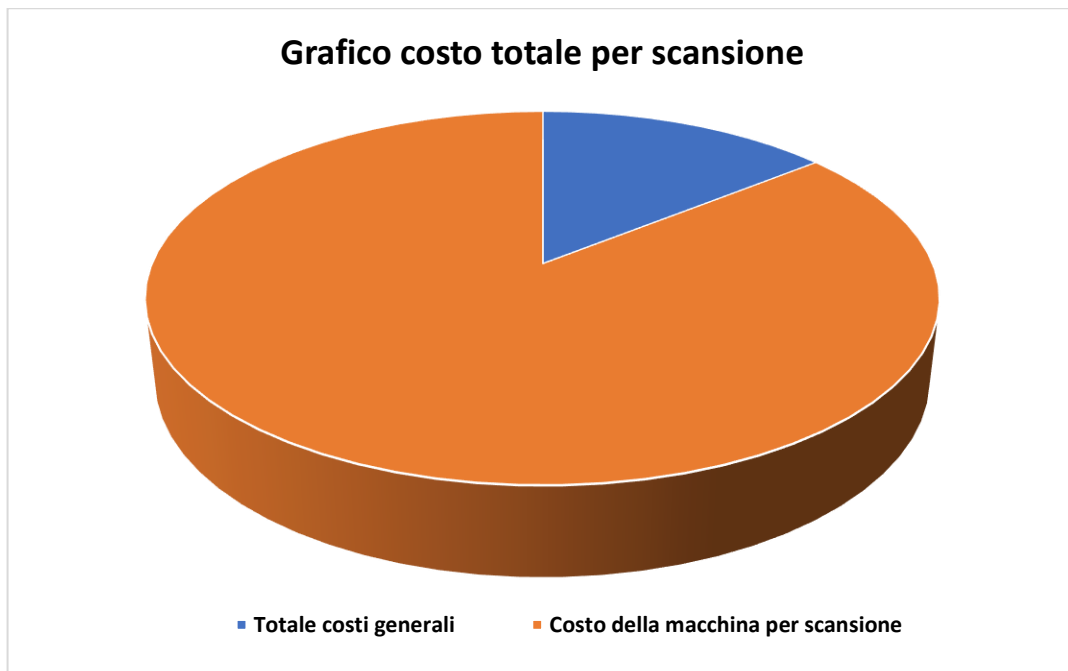
Costo totale operatore per scansione	8,94 €
Costo totale energia	0,0832 €
<b>Totale costi generali</b>	<b>9,03 €</b>
<b>Costo totale per scansione</b>	<b>63,36 €</b>

Figura 5.2 Foglio "Calcoli" CT

Per quanto riguarda i costi invece, come mostrato in figura, la tabella "Costo orario macchina" ci fornisce tutti quelli che sono i costi associabili all'utilizzo della macchina e che costituiranno il costo totale orario: costo orario di ammortamento, costo orario relativo alla manutenzione della macchina, costo legato alla produzione. Questi costi sono ottenibili tramite formule che legano le varie voci di: prezzo totale della macchina, costo annuale di manutenzione, tempo di ammortamento in anni, tasso di sconto, volume occupato dalla macchina e costo relativo all'affitto dello spazio necessario, prezzo della macchina scontato, fattore di caricamento della macchina e ore di lavoro all'anno.

Nel nostro caso avremo un costo orario della macchina, dato dalla somma dei costi precedentemente citati, pari a €48.31 che, rapportato al tempo della scansione, arriverà a €54,33 a cui si sommano i costi generali, rappresentati dal costo dell'operatore per ciascuna scansione e

il costo relativo all'energia consumata, per un totale di €63.36.



**Figura 5.3 Grafico costo scansione**

## 6 Conclusione

In questo elaborato, dalla ricerca condotta è emerso che, dopo aver trattato in modo specifico i processi e i parametri caratterizzanti delle varie tecnologie di post process per L-PBF, abbiamo constatato, anche grazie al caso di studio svolto, che i modelli analitici di costo formulati possono essere adattati ad ogni processo, fornendo in output risultati consoni a quelli che sono i loro costi standard. I modelli, seppur presentando un workflow diverso tra loro, sono caratterizzati da uno schema suddiviso in fogli simili, per rendere la lettura degli elaborati e dei risultati più semplice e immediata possibile.

## 7 Bibliografia

1. <https://www.ridix.it/blog/appfondimenti/additive-manufacturing-cosa-e/>
2. Wohlers Associates. "Wohlers Report 2017 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry". Aprile 2017
3. <https://www.xrayconsult.it/nota-tom.html>
4. <https://webthesis.biblio.polito.it/9587/1/tesi.pdf>
5. <https://www.yxlon.com/>
6. J.C. Hebeisen "HIP-A New Era of Cost Effective-ness", Paper No. 14, Proceedings of the 41st Annual Technical Meeting: Investment casting Institute, 1993.
7. <https://extrudehone.com/>
8. <https://atl-luhden.de/en/>
9. [https://www.maquinariaeurotec.com/sites/default/files/2020-03/ATL\\_iTEM-System\\_EN\\_2019.pdf](https://www.maquinariaeurotec.com/sites/default/files/2020-03/ATL_iTEM-System_EN_2019.pdf)
10. Chatzinikolaou E, Keklikoglou K (2021) Micro-CT protocols for scanning and 3D analysis of Hexaplex trunculus during its different life stages. Biodiversity Data Journal 9: e71542.
11. <https://petersonsawmills.com/>
12. [https://www.ykt.co.jp/english/products/atl/pdf/atL\\_catalog.pdf](https://www.ykt.co.jp/english/products/atl/pdf/atL_catalog.pdf)
13. <https://www.surtek.com.tr/en/>
14. <https://www.directindustry.com/>
15. SalaryExpert.com

16. Micro-CT protocols for scanning and 3D analysis of Hexaplex trunculus during its different life stagesEva Chatzinikolaou, Kleoniki Keklikoglou\*  
Hellenic Centre for Marine Research (HCMR), Institute of Marine Biology, Biotechnology and Aquaculture (IMBBC),Heraklion, Crete, Greece§ Biology Department, University of Crete, Heraklion, Crete, Greece
17. <https://studylibit.com/>