

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

PROGETTAZIONE E ANALISI DI UN GETTO IN GHISA CON MODELLO TRADIZIONALE IN RESINA E IN ABS TRAMITE ADDITIVE MANUFACTURING

DESIGN AND ANALYSIS FOR A PART IN CAST IRON BY TRADITIONAL RESIN AND ADDITIVE MANUFACTURED ABS MODELS

Relatore:
Prof. Mohamad El Mehtedi

Tesi di Laurea di:
Giovanni Giancamilli

Correlatore:
Ing. Tommaso Mancia

Anno accademico [2018/2019]

INDICE

1. Introduzione.....-4-

2. Processo di Fonderia.....-5-

2.1. Allestimento del Modello.....-8-

2.2. Formatura.....-9-

2.3. Colata.....-10-

2.4. Solidificazione ed Estrazione.....-13-

2.5. Controlli.....-15-

3. Additive Manufacturing.....-16-

3.1. Prototipazione Rapida.....-17-

3.2. Tecnologie di Prototipazione.....-18-

4. Materiali e sistemi di produzione impiegati.....-21-

4.1. Ghisa.....-21-

4.2. Resina.....-22-

4.3. ABS.....-23-

4.4. Centro di Lavoro – CNC.....-24-

4.5. Stampanti 3D.....-25-

5. Procedure sperimentali.....-26-

5.1. CAD.....-27-

5.1.1. Procedura CAM.....-28-

5.2. Preparazione del modello.....-29-

5.2.1. Modello in resina.....-29-

5.2.2. Modello in ABS tramite tecnica PolyJet.....-34-

5.2.3. Modello in ABS tramite tecnica FDM.....-36-

5.3. Formatura.....-38-

5.4. Fusione e Colata.....-39-

5.5. Solidificazione e Sterro-granigliatura.....-40-

6. Controlli e Risultati.....-42-
6.1. Controlli dimensionali.....-42-
6.2. Controlli distruttivi.....-42-
6.2.1. Sezione.....-42-
6.2.2. Prova di Trazione.....-43-
6.3. Controlli non distruttivi-Prova di Durezza.....-47-
6.4. Analisi Spettrometrica.....-48-
6.5. Analisi Termica.....-50-
6.6. Confronti Economici.....-53-
6.6.1. Analisi di costi e benefici dei tre modelli.....-53-
6.6.2. Analisi di costi e benefici tra barra e fonderia.....-57-
6.7. Analisi Energetica.....-61-
7. Conclusioni.....-63-
Bibliografia e Sitografia.....-65-
Normative.....-66-
Indice delle Figure.....-67-
Indice delle Tabelle.....-69-
Ringraziamenti.....-70-

1. Introduzione

La Fonderia riveste un'importanza fondamentale per la nostra società, in relazione al ruolo di produttore di innumerevoli beni di consumo e di investimento per tutti i settori industriali; dal manifatturiero alla produzione di energia, dall'edilizia all'elettronica, dal biomedicale all'informatico.

La fusione è una delle tecnologie di lavorazione tra le più antiche conosciute: i primi utensili rinvenuti, ottenuti tramite fonderia, risalgono al 4000 a.C. .

All'interno del settore, le fonderie di ghisa costituiscono un importante comparto, profondamente radicato nel territorio, con una ultra centenaria tradizione industriale. Dietro ai prodotti esiste una realtà industriale che vive di attività, processi, tecnologie e, soprattutto, di risorse umane che quotidianamente operano all'interno delle fonderie.

Il processo di fusione in terra è preferibile quando si devono realizzare componenti complessi con cavità interne oppure quando si ha a che fare con materiali difficilmente lavorabili attraverso altri processi.

La tecnica fusoria consiste principalmente nel preparare una cavità detta "forma", che costituisce il negativo del pezzo da ottenere. In essa viene colata la lega allo stato fuso. Una volta solidificata, la lega viene estratta dalla forma ad ottenere il grezzo di fusione, del tutto simile al pezzo finale al netto dei sovrametalli (le parti da asportare con le macchine utensili per la realizzazione delle superfici funzionali).

Ricopre un ruolo fondamentale il modello che, attraverso il processo di formatura, ci permette di ottenere la cavità. I tradizionali modelli sono realizzati in resina, legno e acciaio ma, l'avvento dell'additive manufacturing ci darà sicuramente l'opportunità di utilizzare, successivamente, nuovi materiali e nuove tecniche di produzione.

La fusione in terra rientra nelle tecniche di formatura transitorie in cui ogni forma può essere utilizzata per una sola colata e viene distrutta al momento dell'estrazione del grezzo.

L'obiettivo dei miei studi è stato quello di analizzare nel complesso l'intero processo di fonderia cercando di rinnovarlo introducendo nuove metodologie e nuovi materiali, grazie alla stampa 3D, per la realizzazione del modello.

L'elaborato si presta in un primo momento a spiegare dettagliatamente le varie fasi della produzione di un getto prototipale in ghisa tramite fusione in terra e l'additive manufacturing, per poi entrare nel cuore delle ricerche svolte. Una particolare attenzione è stata rivolta ai vari controlli e alle varie analisi da eseguire sul grezzo. Successivamente è stato eseguito un confronto, sia in termini economici che energetici, del processo di fusione in terra con un'ulteriore tecnica di produzione, ovvero sottrazione da pieno di una barra in ghisa ottenuta mediante seconda fusione. Sono stati messi in evidenza anche le differenze economiche fra il modello tradizionale in resina con quello in ABS.

Mostrati, attraverso foto, tabelle e grafici, i risultati ottenuti, sono state tratte infine accurate conclusioni.

2. Processo di Fonderia

Mediante il processo attuato nella fonderia è possibile realizzare una serie di prodotti finiti (fusioni), aventi forma, caratteristiche fisiche e metallurgiche definite, attraverso la fusione di leghe ferrose e non ferrose, la colata del metallo liquido e la sua solidificazione all'interno di forme che riproducono la geometria esterna ed interna del pezzo.
Grazie a tale procedimento si è in grado di realizzare semilavorati e getti.
I primi hanno una forma semplice e sono destinati ad ulteriori lavorazioni (pani e lingotti); i secondi hanno una forma complessa e riconducibile a quella finale.
Il processo di fonderia è preferibile quando si devono realizzare pezzi complessi con cavità interne, quando si ha a che fare con materiali difficilmente lavorabili attraverso altri processi oppure quando comporta un vantaggio economico.
Sono presenti però anche dei forti limiti:

- Le parti ottenute hanno una bassa tenacità, duttilità e resistenza meccanica;
- Si ha un elevato grado di porosità;
- Livelli di precisione e finitura piuttosto bassi (superfici rugose e tolleranze larghe);
- Problematiche ambientali (impatto ambientale elevata per via delle alte temperature).

È possibile dividere il processo di fonderia in due macrocategorie:

- Colata in forma transitoria, in cui la forma per creare il pezzo viene distrutta al termine del processo.
  La forma può essere realizzata attraverso diversi materiali, il più comune è la terra da fonderia.
  In questo particolare caso è necessaria la staffa, un particolare contenitore che permette di contenere il materiale da compattare. Questa è formata dalle pareti laterali ma non da quelle di base.
  Naturalmente per ottenere la forma sono necessarie due staffe dotate di opportuni riferimenti che permettono di accoppiarle nella giusta posizione.
- Colata in forma permanente, in cui la forma per creare il pezzo viene riutilizzata in un elevato numero di cicli produttivi. Ricordiamo in questo particolare caso la fonderia in conchiglia.

Nel processo di fonderia con forma permanente, in particolare quella con forma in terra, le caratteristiche del materiale sono di fondamentale importanza.
Le caratteristiche tecnologiche dei materiali per le forme in terra sono:

1. Refrattarietà: capacità di resistere ad elevate temperature.
2. Coesione: capacità di resistere a sollecitazioni esterne. Più compatto con forza e più la forma sarà coesa. La spinta metallostatica del fuso dovrà essere sostenuta dalla forma.
3. Permeabilità: capacità di lasciarsi attraversare dai gas; proprietà spesso antitetica alla coesione.
   La permeabilità è una proprietà molto importante dato che il fuso, durante la colata, si trascina con sé una certa quantità di aria. Inoltre sono presenti dei gas liberati dal fuso durante la solidificazione.

Se quest'ultimi non avranno l'opportunità di attraversa i pori della forma i getti saranno caratterizzati da parti mancanti. Tanto più la forma sarà coesa, tanti meno fori saranno presenti nella forma e la permeabilità sarà bassa.

4. Scorrevolezza: capacità di plasmarsi attorno al modello.
   Se il materiale non si plasmerà correttamente attorno al modello nel getto non si otterranno alcuni dettagli.
5. Sgretolabilità: facilità con la quale la terra viene rimossa al termine del processo. Avendo a che fare con forme transitorie, per estrarre il getto si dovranno rompere, per cui la sgretolabilità dovrà essere elevata.

Il refrattario conferisce resistenza ad elevate temperature. La sabbia silicia è il più utilizzato per il basso costo per l'adattabilità ad alte temperature.
Il legante (argilloso e non) ha lo scopo di conferire la coesione, per cui permetterà di resistere alle pressioni e all'erosione del fuso, garantendo l'estrazione del getto senza danneggiamenti. Infine non dovrà ridurre la permeabilità per consentire la fuori-uscita dei gas.
Le terre naturali sono un mix di sabbia silicia e argilla, mescolati grazie all' acqua di umidificazione che rende plasmabile il materiale. Si possono usare additivi per correggere alcune caratteristiche del materiale.

I processi di fonderia in terra si possono realizzare secondo tre modalità:

- TERRA VERDE (A UMIDO)
  Il fuso viene colato in una forma in cui è presente l'acqua di umidificazione.
- SECCO
  Si tratta dell'estremo opposto del processo in terra verde, dove nella forma non è più presente l'acqua di umidificazione.
  Per far avvenire l'evaporazione del liquido si dovrà introdurre le due staffe, comprensive di terra da fonderia, all'interno di un forno che ne consente il passaggio dallo stato liquido a quello gassoso.
- SEMI-VERDE
  Si tratta di una via di mezzo fra i due processi elencati precedentemente

Il vantaggio di quello a secco rappresenta la mancanza dell'acqua che, durante la colata del fuso, forma vapore acqueo dando vita alle soffiature.
Il procedimento in semi-verde permette di ottenere proprietà migliori rispetto a quello a umido, ma peggiori rispetto a quello a secco (maggiormente costoso).
Il riscaldamento nel processo semi-verde interesserebbe solamente le superfici della forma che entreranno a contatto col fuso durante la colata.

Il processo di fonderia può essere schematizzato in quattro aree/attività principali:

▪ fusione e trattamento del metallo: area fusione

▪ preparazione dei modelli, delle forme e delle anime: area formatura

▪ riempimento delle forme con il metallo fuso, raffreddamento e solidificazione ed estrazione del getto dalla forma: area colata

▪ lavorazioni successive del getto grezzo: area finitura

2.1. Allestimento del modello

Il modello ci permette di ottenere la forma, naturalmente transitoria, attraverso il processo di formatura (compattazione della terra da fonderia attorno al modello). Anche quest'ultimo può essere suddiviso in transitorio o permanente e verrà realizzato partendo dal disegno del getto da ottenere.
Gli aspetti di cui bisogna tener conto sono:

1. **Materiale**

   I materiali si differenziano in base al tipo di modello, se permanente o transitorio.

   Nel primo caso fra i più utilizzati ricordiamo il legno, l'alluminio, l'acciaio, la ghisa e la resina; nel secondo caso si parla principalmente di cere e schiume polimeriche. Per quanto riguarda il modello in cera si ottiene la forma attraverso la sua liquefazione grazie al calore generato.

   Nelle schiume polimeriche la forma viene realizzata grazie alla degradazione termica progressiva del modello causata dal calore ceduto del fuso.

2. **Sovradimensionamento**

   Il fuso durante il raffreddamento allo stato solido e allo stato liquido subisce un ritiro, per cui il modello dovrà essere opportunamente sovradimensionato per tener conto di questo fenomeno.

   Nel caso in cui il getto finale dovesse subire ulteriori lavorazioni, si dovrà aggiungere anche un sovrametallo (o sovraspessore) solamente su quelle superfici che subiranno altri trattamenti.

3. **Piano di divisione del modello**

   I modelli normalmente impiegati nei processi di fonderia si suddividono i due semi-modelli, per cui ci si pone il problema di identificare il corretto piano di divisione (o piano di sformatura).

   Si parla di placca modello doppia se i due semi-modelli saranno montati su entrambe le facce della placca modello altrimenti, se verranno impiegati due differenti appoggi, si parla di placca modello semplice.

4. **Angoli di sformo del modello**

   In assenza dell'angolo di sformo, non si avrebbe la possibilità di estrarre il modello dalla forma in terra.

5. **Angolo di raccordo**

   Di vitale importanza se si vuole evitare che la forma si rovini durante l'estrazione del modello.

6. **Sottosquadri nel modello**

   Il sottosquadro rappresenta una superficie del modello che danneggia la forma durante la sformatura, trascinando con sé parte della terra, per cui dovrà essere assolutamente evitato.

   Per affrontare il problema dei sottosquadri si possono adottare diverse soluzioni: scelta opportuna del piano di divisione, modifica del disegno del getto, uso di anime esterne oppure uso di semi-modelli scomponibili.

2.2. Formatura

Il processo di formatura consiste nel compattare terra da fonderia attorno al modello impiegando sistemi meccanici (formatura meccanica). La compattazione avviene grazie a delle macchine che possono usare diversi principi di funzionamento:

- **A compressione**

  Viene impiegata una pressa idraulica che permette una compressione lenta e progressiva. Un pistone è posizionato sul piatto mobile che esercita l'azione di pressione sulla staffa e, una volta terminata, l'olio non agisce più permettendo al pistone di rialzarsi.

  Infine è presente un dosatore che ha lo scopo di introdurre una quantità extra di terra.

  Il principale limite di questa formatura consiste in una differente compattazione in base alle altezze del modello.

- **A scossa o vibrazione**

  Sono stati realizzati per eliminare il problema della variazione di altezze nel modello.

  In un caso dell'aria viene pompata all'interno del cilindro con una certa frequenza per dar luogo a delle vibrazioni (compattazione maggiore) o a una scossa (compattazione peggiore ma più economica).

- **A vibro-compressione o scossa-compressione**

  Sono presenti due differenti cilindri: all'interno di uno entra olio (per la compressione), mentre nell'altro entra aria (per la vibrazione o scossa). In questo caso è necessaria una pressa a doppio effetto.

- **A lancio centrifugo o a lancio pneumatico**

  Nel primo caso una girante monopala ruotando prende terra e la lancia contro il modello grazie alla forza centrifuga. Non si avranno problemi legati alla variazione di altezze nel modello, ma si può verificare una grande usare per via dell'elevata velocità con cui vengono lanciate le particelle.

  La seconda soluzione prevede di usare il lancio pneumatico, dove una miscela aria-terra attraverso un condotto viene scaraventata contro la placca modello.

2.3. Colata

Non appena si è pronti ad eseguire la colata nelle staffe, la ghisa fusa viene versata in un primo momento in una siviera che, successivamente, verrà spostata grazie ad un carroponte in prossimità del forno di colata. Aprendo semplicemente quest'ultimo, il liquido caldo avrà l'opportunità di entrare all'interno della forma grazie all'apposito sistema di canalizzazione (o di alimentazione).

a) BACINO DI COLATA

Rappresenta l'interfaccia tra la forma e l'ambiente esterno.

Raccoglie il fuso versato e deve fare in modo che il flusso negli altri elementi di colata sia tranquillo.

E' dotato da sistemi che trattengono le scorie (ossidi e impurità) galleggianti in superficie e le inclusioni che si raccolgono sul fondo.

Nel primo caso si parla di ferma-scorie, mentre nel secondo di filtri.



Figura 1: Sistema di canalizzazione

b) CANALE DI COLATA

Si tratta di una canalizzazione ad asse verticale che trasforma l'energia potenziale del fuso in cinetica.

Un problema che si può verificare nel caso di fonderia in forme transitorie (permette il passaggio di gas) riguarda la generazione del fenomeno della depressione nell'interfaccia tra bacino di colata e canale di colata. E' un fenomeno che non si deve verificare dato che tende a richiamare dell'aria all'interno della forma permeabile e porosa.

Il canale di colata è costituito da una forma simil tronco-conica, in cui la sezione di attacco con il bacino di colata è maggiore di quella della sua base.

Il rapporto fra le due aree che permette di prevenire l'aspirazione nell'interfaccia col bacino di colata può essere espresso dalla seguente formula:

$$R = \left(\frac{Hc}{Htot}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

dove:

- Hc è l'altezza del canale di colata
- Htot è la somma dell'altezza del bacino di colata con quelle del canale di colata

c) CANALE DI ALIMENTAZIONE

Si trova alla base del canale di colata e ha la funzionalità di distribuire il fuso in più punti della forma mediante gli attacchi di colata.

La sua sezione deve essere maggiore di quella del canale di colata per rallentare e addolcire il flusso.

Il canale ha un'estremità, oltre l'ultimo attacco, che funge da trappola per le inclusioni.

d) ATTACCHI DI COLATA

Rappresentano delle canalizzazioni che permettono al fuso di entrare all'interno del negativo.

Hanno una sezione molto piccola nella giunzione con la pasticca di rottura poiché dovranno consentire una facile separazione dal getto solidificato e strozzare il flusso che entra nella forma.

La colata nella forma è un'operazione complessa poiché il fuso modifica e diminuisce la propria temperatura durante il processo.

Le caratteristiche fluidodinamiche (viscosità, tensione superficiale e fluidità) sono delle proprietà che non rimangono costanti, ma variano da punto a punto.

1) VISCOSITA'

Rappresenta la resistenza che una parete oppone allo scorrimento del fluido e tende ad aumentare al diminuire della temperatura.

Una volta versato il fuso all'interno della forma, la sua temperatura tende progressivamente a decrescere provocando un aumento della viscosità; tale resistenza può costituire un problema nel riempimento di pareti sottili.

Due possibili soluzioni sono:

- aumento della temperatura di surriscaldamento, che avrebbe un effetto benefico sulla viscosità, ma può provocare la perdita dell'ordine a corto raggio e quindi minor resistenza meccanica;
- pre-riscaldamento della forma.

2) TENSIONE SUPERFICIALE

E' il lavoro necessario per creare una superficie di area unitaria a temperatura e volume costanti.

Si tratta di una proprietà che agisce nell'interfaccia liquido-solido e che aumenta al diminuire della temperatura, per cui diventa sempre più difficile creare superfici.

Un altro fattore che provoca la sua crescita è la formazione di ossidi dovuti al contatto del fuso con l'ambiente esterno.

3) FLUIDITA’

La fluidità è l’attitudine del fuso ha nel riempire la forma ed è una caratteristica complessa che dipende da molteplici fattori:

- Temperatura iniziale del fuso (grado di surriscaldamento)

  Tanto più sarà alta la temperatura di surriscaldamento e tanto più sarà alta la fluidità.

  La temperatura iniziale del fuso determina la quantità di calore che viene dissipata prima dell’inizio della solidificazione;

- Composizione chimica del metallo

  La fluidità è una caratteristica che varia da metallo a metallo.

  Generalmente la fluidità di una lega metallica è più bassa di quella di un metallo puro (solamente le leghe eutettiche hanno un grado di fluidità più o meno simile);

- Forma (negativo in cui il fuso viene versato)

  A seconda del materiale che costituisce la forma si avrà una conducibilità termica più o meno grande. La forma in terra da fonderia ha una conducibilità termica inferiore rispetto a quella metallica, per cui il calore dissipato verso l’esterno è minore e la temperatura del fuso diminuisce più lentamente.

  Un altro aspetto da prendere in considerazione è la geometria della forma: nel caso di pareti sottili, l’ideale per ottenere ottime proprietà meccaniche nel caso della fonderia, la fluidità avrà un valore basso.

  Infine bisogna tener conto anche del pre-riscaldamento della forma. Quest’ultima in molti casi si trova a temperatura ambiente, ma pre-riscaldandola diminuiremo il ΔT con il fuso che si raffredderà più lentamente.

E’ possibile quantificarla mediante l’INDICE DI FLUIDITA’: rappresenta la lunghezza di un canale di dimensioni standardizzate che il fuso riesce a percorrere prima che il suo moto si arresti per via della solidificazione.

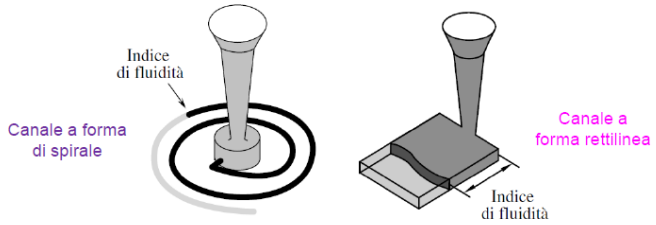


Figura 2: Indice di fluidità

2.4. Solidificazione ed Estrazione

Una volta riempita la forma, con il passare del tempo il fuso si porterà alla temperatura di inizio solidificazione (essendo la ghisa una lega Fe-C) in cui avverrà la formazione dei primi nuclei di cristallizzazione.
Durante il raffreddamento della ghisa, l'ottenimento della grafite, forma stabile del carbonio, è legato alla presenza di elementi grafitizzanti (C, Si) e dalle ridotte velocità di raffreddamento.
La forma in terra è caratterizzata da una bassa conducibilità termica; di conseguenza viene dissipata una scarsa quantità di calore verso l'esterno istante per istante, la temperatura del fuso diminuisce più lentamente e la velocità di raffreddamento è piuttosto bassa.
La distribuzione delle lamelle è anche legata alla temperatura di colata e alle dimensioni del pezzo.
La caratteristica fondamentale di questo materiale è data dalla forma della grafite che solidifica sotto forma di lamelle, generando una discontinuità della parte ferrosa della lega. Ciò conferisce una buona valorizzazione dell'effetto "autolubrificante" della grafite (l'effetto "grippaggio" è estremamente ridotto), la frantumazione in piccolissimi trucioli in fase di lavorazione e la mancanza di deformabilità (fragilità, mancanza di allungamento prima della rottura) di questo materiale. Difatti l'allungamento nelle ghise lamellari è pressoché trascurabile, a differenza di quelle sferoidali dove si può raggiungere anche il 22%.

EFFETTI AL RAFFREDDAMENTO

Durante il raffreddamento del fuso dalla T_{surr} alla T_{amb} si presentano due fenomeni:

- Ritiro del materiale (contrazione volumetrica del metallo) che può essere affrontato mediante il sovradimensionamento del modello;
- Sviluppo di gas nel metallo (soffiature). Il metallo libera dei gas, durante il raffreddamento, che possono rimanere intrappolati nel getto.

Nel primo caso la contrazione del metallo avviene in tre differenti fasi: allo stato liquido, durante la solidificazione e allo stato solido, provocando difetti nel getto.

a) Ritiro volumetrico

E' possibile quantificarlo mediante $\Delta V = \frac{(Vf - Vi)}{Vi} x100$

dove:

Vf è il volume finale del getto

Vi è il volume iniziale del fuso

b) Formazione del cono di ritiro

Si tratta di un difetto tipico delle forme aperte.

Dopo aver versato il metallo liquido nella lingottiera, inizia il raffreddamento con conseguente trasmissione di calore per conduzione da parte del fuso alle pareti della forma e per irraggiamento in direzione della superficie libera (a contatto con l'ambiente circostante).

L' inizio della solidificazione si ha sulle pareti laterali e sul fondo.

L'abbassamento del livello del liquido per la contrazione volumetrica comporta la formazione di un cono di ritiro sulla superficie superiore.

Quando si ha la lingottiera a contatto con l'ambiente esterno il cono di ritiro è un fenomeno inevitabile.

Sovradimensionare il modello rappresenta una soluzione a questo difetto, ottenendo materiale in eccesso che verrà asportato una volta completata la solidificazione.

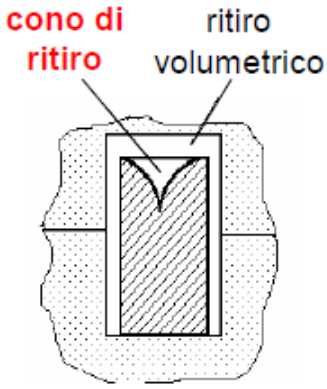


Figura 3:Cono di ritiro

c) Formazione delle cavità di ritiro

E' un difetto che si verifica nelle forme chiuse dove lo scambio termico avviene solamente per conduzione con le pareti (in terra nel nostro caso), dove si formerà il primo strato solido.

Quest'ultimo intrappola al proprio interno una massa liquida che subirà un ritiro maggiore.

Man mano che la solidificazione procede, lo strato solido aumenta di dimensioni, fino al momento in cui non rimarrà un'ultima traccia di liquido, dove si formerà una cavità.

Il punto in cui si verifica si genererà la cavità di ritiro si chiama baricentro termico, che non necessariamente coincide con quello geometrico.

Si tratta di un difetto con dimensioni macroscopiche (visibile ad occhio nudo) che si può generare singolarmente oppure in modo diffuso.



Figura 4:Cavità di ritiro

d) Formazione di microcavità inter-dendritiche

Si tratta di un difetto tipico dei getti costituiti da grani con forma dendritica.

Man mano che la dimensione del grano aumenta, parte di liquido potrebbe rimanere intrappolata generando delle cavità di dimensione microscopica.

La rottura delle strutture dendritiche ha lo scopo di affinare il grano, aumentando la resistenza meccanica, e evitare la formazione di questi piccoli difetti.

Una volta che il getto sarà solidificato, la forma verrà rotta per ottenere la sua estrazione.



Figura 5:Microcavità inter-dendritiche

2.5. Controlli

Per valutare le proprietà meccaniche dei getti ottenuti e la corretta composizione della ghisa verranno eseguite prove meccaniche e analisi di vario tipo:

- **Controlli dimensionali**
  Rientrano in questa categoria tutti quei controlli che riguardano il peso del getto e le relative misure mediante calibro.
- **Sezione**
  Ha lo scopo di mettere in risalto la presenza di difetti (cavità) all'interno del getto.
- **Prova di trazione**
  La norma UNI EN 10002/1 afferma che la prova di trazione statica, effettuata a temperatura costante, consiste nel sottoporre una provetta ad un carico di trazione applicato con una certa velocità d'incremento fino a provocare la rottura, allo scopo di determinare le caratteristiche di resistenza, elasticità, deformabilità.
- **Prova di durezza**
  Le prove di durezza sono eseguite per ottenere un indice convenzionale dal quale trarre informazioni sulle qualità e sulle proprietà del materiale. I valori della durezza vengono determinati secondo vari metodi, fra i quali sono più comunemente impiegati quelli Brinell, Vickers e Rockwell. Ogni metodo usa un diverso penetratore e un valore diverso del carico. Se, su uno stesso materiale, eseguiamo prova di durezza con metodi differenti otteniamo indici differenti.
- **Analisi spettrometrica**
  L'analisi spettrometrica ad emissione atomica consente di individuare e quantificare all'interno di un materiale una serie di elementi, presenti entro certi intervalli di concentrazione.
- **Analisi termica**
  Consiste nella registrazione mediante software dell'andamento della temperatura nel tempo di un campione di metallo, colato solitamente in un crogiuolo di sabbia contenente una termocoppia.
  Il risultato è una curva che, a seconda del tipo di crogiuolo adoperato, può fornire informazioni sia del tipo compositivo che comportamentale.

3. Additive Manufacturing

La produzione additiva, comunemente chiamata stampa 3D, è un processo di fabbricazione che consente di realizzare oggetti fisici partendo da un modello digitale. Numerose sono le tecnologie e i materiali a disposizione, ma il principio di base è lo stesso: attraverso la sovrapposizione di strati di materiale, uno dopo l'altro, un modello digitale viene trasformato in un oggetto solido tridimensionale.

È importante sottolineare che la dicitura "produzione additiva" non si riferisce ad una singola tecnologia ma bensì ad un insieme di processi di produzione, molto diversi tra loro, accomunati da tre fattori:

1. Sono processi di produzione impiegati per la creazione di oggetti tridimensionali.
2. Gli oggetti in questione vengono realizzati attraverso la sovrapposizione di strati successivi di materiale.
3. I prodotti vengono realizzati partendo da un modello 3D digitale.

I processi di produzione additiva si differenziano dai processi di produzione tradizionali, e congiuntamente a questi ultimi fanno parte di una più ampia gamma di processi di fabbricazione a disposizione del settore terziario.

La prima cosa da fare è ottenere un modello virtuale dell'oggetto che si desidera realizzare.

Questo può essere fatto utilizzando un software di progettazione CAD (se si intende dare vita ad un oggetto nuovo) o attraverso uno scanner 3D (per la riproduzione di oggetti esistenti). Lo scanner 3D è infatti in grado di creare una copia digitale tridimensionale di un oggetto reale. In alternativa, è possibile scaricare file 3D già pronti per l'utilizzo dalle numerose piattaforme presenti on-line, chiamate repositories.

Il modello 3D viene suddiviso in sezioni orizzontali, e una volta pronto per la stampa, il macchinario inizierà a depositare materiale uno strato dopo l'altro, procedendo dal basso verso l'alto, fino al raggiungimento del risultato finale.

3.1. Prototipazione Rapida

E’ necessario non confondere la prototipazione rapida con la stampa 3D, o con la produzione additiva, in quanto tali concetti sono spesso erroneamente utilizzati in maniera interscambiabile.
Potremmo affermare che la produzione additiva è solo una delle tecnologie con cui è possibile un realizzare un prodotto a prototipazione rapida.
La prototipazione rapida è un processo produttivo automatizzato che consente di realizzare prototipi 3D solidi in maniera veloce ed efficiente partendo da file CAD 3D.
I processi di produzione possono essere classificati in sottrattivi, additivi o di formatura. Ogni processo può interamente fare parte di una di queste tre categorie o essere considerato ibrido, se presenta caratteristiche compatibili con più tipologie di processi.
Nella giungla del terziario, “produttività” significa trasformare un’idea (concept) in un prodotto finito, pronto per essere immesso sul mercato, in maniera rapida e a basso costo. La prototipazione rapida favorisce tale processo.
È bene sottolineare che il punto di partenza è lo stesso: la progettazione assistita da elaboratore (CAD).



Figura 6:Prototipazione rapida

3.2. Tecnologie di Prototipazione

La stampa 3D nasce nel 1986, con la pubblicazione del brevetto di Chuck Hull, che inventa la stereolito-grafia. Dal 1986 la stampa 3D si è evoluta e differenziata, con l'introduzione di nuove tecniche di stampa e di innumerevoli materiali con diverse caratteristiche meccaniche, stampabili sia da soli che in combinazione, permettendo la diffusione di questa tecnica di produzione in molti ambiti, che spaziano dall'industria all'ambito medico e domestico.
Le tecnologie di prototipazione più importanti sono:

1. **FFF- Fused Filament Fabrication**

   La Fabbricazione a Fusione di Filamento (in inglese FFF fused filament fabrication) è una tecnologia di produzione additiva usata comunemente per la modellazione, la prototipazione e la produzione di oggetti diversi. L'FFF lavora su un principio "additivo" rilasciando il materiale su strati. Un filamento plastico è srotolato da un rocchetto che fornisce il materiale ad un ugello di estrusione da cui si può avviare e fermare il flusso di plastica fusa.
   L'ugello è riscaldato per poter sciogliere il materiale e può essere spostato sia in direzione orizzontale che verticale da un meccanismo di controllo numerico, controllato direttamente da un software. Mentre si depositano i vari strati, il piano di lavoro (asse Z) si modella a seconda della dimensione dello strato (layer) che si vuole ottenere.
   I materiali che possono essere utilizzati con questa tecnologia sono molteplici e in continua evoluzione: diversi tipi di polimeri, come PLA, ABS o Nylon; materiali compositi che a un polimero di base integrano percentuali variabili di polvere di legno, marmo o metalli, e che permettono di ottenere riproduzioni molto realistiche; materiali solubili, come l'HIPS o il PVA; materiali flessibili come l'FPE e molti altri.

2. **DLP- Digital Light Processing 4/2**

   Nel Digital Light Processing (DLP), una vasca di polimero liquido è esposto alla luce di un proiettore DLP in condizioni di luce inattinica. Il polimero liquido esposto si indurisce.
   La piastra di costruzione poi si muove in basso in piccoli incrementi e il polimero liquido è di nuovo esposto alla luce. Il processo si ripete finché il modello non è costruito.
   Il polimero liquido è poi drenato dalla vasca, lasciando il modello solido**.**

3. CJP- ColorJet Printing

La tecnologia CJP (ColorJet Printing), è il metodo di produzione additiva professionale che per stampare in 3D utilizza come materiale il gesso o la polvere di plastica.
Con questa tecnologia di stampa 3D la prototipazione rapida avviene mediante l'incollaggio di polvere fino a plasmare completamente l'oggetto desiderato. Questo viene poi ricoperto da uno strato di binder (legante) che permette di rendere l'oggetto colorato (con più di 6 milioni di colori). La tecnologia CJP (a differenza della tecnologia FFF e della tecnologia SLA) non ha bisogno di supporti e permette di stampare qualsiasi forma (anche i 'sotto squadra') perché è la polvere in eccesso presente nella vasca che va a sostenere le parti superiori.

4. MJP- MultiJet Printing

Con le stampanti 3D di questo tipo la prototipazione rapida avviene mediante la deposizione strato per strato di resine plastiche allo stato liquido, fotoindurenti – e di materiale ceroso che funge da supporto – fino alla composizione dell'oggetto finito.
La tecnologia MJP (MultiJet Printing) è un metodo di produzione additiva professionale che assicura un risultato di qualità impareggiabile.
I materiali con cui si producono i pezzi sono resine plastiche performanti con caratteristiche meccaniche in grado di soddisfare le esigenze di prototipazione professionale e piccole produzioni e resine biocompatibili per la realizzazione di modelli calcinabili.

5. SLA- Stereolitografia

La stereolitografia è una tecnica che permette di realizzare singoli oggetti tridimensionali a partire direttamente da dati digitali elaborati da un software CAD/CAM.
La sua principale applicazione è la prototipazione rapida, che permette di avere oggetti fisici da testare prima della produzione industriale oppure preparare modelli per realizzare stampi di colata o pressofusione. Può essere impiegata anche per produrre velocemente pezzi di ricambio, facendosi inviare il file attraverso internet. L'utilizzo per la produzione in serie è ipotizzabile laddove altre tecniche di produzione si rivelino difficili e costose (per esempio con macchine a controllo numerico) ed in genere per produzioni numericamente molto limitate dove il costo fisso delle attrezzature (gusci, stampi ecc) incida eccessivamente.

6. SLS- Sinterizzazione Laser Selettiva

La tecnologia di Sinterizzazione Laser Selettiva(SLS) si realizza attraverso un processo per addizione stratificata, in cui l'utilizzo di un laser permette di fondere (o sinterizzare) materiali termoplastici, creando il modello o il prototipo tridimensionale. Il processo prevede che uno strato sottilissimo di polvere (0,1mm) venga disteso sulla piattaforma di lavoro, in modo che il laser possa solidificare la polvere in base alla sezione della geometria, strato dopo strato. L'uso della sinterizzazione per la produzione di prototipi e componenti consente di ridurre drasticamente i costi di sviluppo, riducendo i tempi di realizzazione ed eliminando i costi di attrezzaggio per la produzione.Le parti prodotte con tecnologia di Sinterizzazione Laser Selettiva SLS possono essere utilizzate per verifiche di montaggio, test di ingombro e di forma e per parti definitive per il controllo e l'ottimizzazione dei progetti e dei prodotti sviluppati.

7. DMP- Direct Metal Printing

Il processo produttivo di questa tecnologia consiste nel posizionare un letto di polveri metalliche che successivamente verranno fuse attraverso un raggio laser. Finita la lavorazione sullo strato, un rullo si azionerà andando a posizionare un secondo letto molto sottile di polvere, il quale verrà nuovamente lavorato dal raggio laser, andando a fonderlo con lo strato precedente. Ovviamente, in modo da ottenere a fine stampa le geometrie e i volumi desiderati, il raggio laser andrà a colpire solamente le aree interessate alla realizzazione del pezzo, tralasciando completamente il resto delle polveri. In questo modo, le polveri non lavorate potranno essere recuperate e riutilizzate per la stampa successiva.

Nonostante l'evidente contributo che tali tecnologie possono apportare al progresso dell'industria grazie ai loro numerosi vantaggi, è un dato di fatto che alcune delle limitazioni da esse incorporate, rendono le tecnologie di produzione additiva non ampiamente implementate in molti settori.

Tali limitazioni sono connesse alla natura stessa dei processi di produzione additiva, i quali possono ancora essere perfezionati, e a tutte quelle fasi collaterali (pre-lavorazione del materiale, post lavorazione, controllo di qualità ...) che in molti casi ne condizionano l'attuabilità. Una mancata conoscenza sulle modalità di progettazione e l'incapacità di integrazione delle tecnologie da parte delle aziende sono fattori che incidono ulteriormente.

Indubbiamente, nonostante costituiscano una grande sfida per la ricerca, lo sviluppo tecnologico e l'innovazione, tali limitazioni possono ancora essere superate.

4. Materiali e sistemi di produzione impiegati

4.1. Ghisa

Con il termine ghisa si indica non solo il prodotto intermedio della produzione dell'acciaio in altoforno ma anche le ghise da fonderia, una delle classi di materiali metallici più utilizzate. Si possono definire come leghe ternarie ferro, carbonio e silicio, in cui il tenore di questi ultimi due elementi, di solito tra 2,5 e 4,5% per il carbonio e 0,5 e 2,5% per il silicio, è tale da saturare l'austenite alla temperatura eutettica. Sono caratterizzate da un punto di fusione non eccessivamente elevato, poco sotto 1200 °C, ottima colabilità, che permette la realizzazione di manufatti anche di geometria complessa, buona resistenza a corrosione in atmosfera o in ambienti di aggressività blanda, come le acque dolci. Dal punto di vista meccanico, si tratta di materiali con caratteristiche che variano in modo marcato con la composizione, la microstruttura e i cicli termici subiti, dotati di resistenza a trazione e compressione discreta, paragonabile a quella degli acciai, ma di maggior fragilità, per via dell'alto tenore di carbonio. Per questo non possono essere lavorate per deformazione plastica a caldo o a freddo. Le buone proprietà delle ghise, unite a un costo piuttosto contenuto, hanno portato queste leghe ad avere ampia applicazione per la realizzazione di tubazioni e componentistica idraulica o pneumatica, di macchinari e macchine utensili per la lavorazione dell'acciaio, per esempio per i cilindri di laminazione.
La più comune classificazione delle ghise è basata sul tipo di microstruttura. In funzione della morfologia della grafite, si suddividono in:

- Ghise bianche, in cui il carbonio precipita soltanto come fase metastabile di cementite e non come grafite;
- Ghise grigie o lamellari, nelle quali la quasi totalità del carbonio è sotto forma di grafite a lamelle;
- Ghise conchigliate o temprate, in cui si ha un cuore di ghisa grigia e uno strato corticale di ghisa bianca, dovuto al raffreddamento rapido in superficie durante la solidificazione;
- Ghise sferoidali, nodulari o duttili, in cui il carbonio dà luogo durante la solidificazione della lega a sferoidi più o meno regolari di grafite, per la presenza come il cerio e il magnesio;
- Ghise malleabili, ottenute dalle ghise bianche mediante trattamento termico, in cui il carbonio si presenta come grafite di ricottura, in forma di particelle tondeggianti e irregolari
- Ghise legate, caratterizzate da differenti microstrutture e morfologie di grafite, con tenori rilevanti di elementi alliganti al fine di ottenere proprietà specifiche.

Nel nostro specifico caso ci interessiamo alle ghise grigie, così chiamate per l'aspetto più scuro, rispetto a quelle bianche, della superficie di frattura, dovuta alla presenza di lamelle di grafite; sono anche dette lamellari. Per la loro economicità, per le proprietà meccaniche, d'interesse per molte applicazioni, e la lavorabilità alle macchine utensili, questo tipo di ghisa è uno dei materiali metallici di maggiore impiego.

4.2. Resina

Il materiale lavorato al CNC e utilizzato per realizzare il modello tradizionale in resina è OBOMODULAN 1200 GREEN, un prodotto a base di poliuretano la cui scheda tecnica è:

Densità approssimativa **kg/m^3**	1200
Resistenza alla compressione (DIN EN ISO 604) approssimativa **MPa**	90 - 95
Resistenza a flessione (DIN EN ISO 178) approssimativa **MPa**	95 - 100
Coefficiente Lineare di Espansione Termica con temperature da circa 25 fino a 70 °C (secondo DIN 53752) **$10^{-6}K^{-1}$**	70 – 75 x $10^{-6}K^{-1}$
Shore-D (DIN 53505) **Shore-D**	83 - 87
Deflection temperature **°C**	80 - 85

Tabella 1:Caratteristiche tecniche OBOMODULAN

4.3. ABS

In alternativa, per realizzare il modello tramite processo di additive manufacturing sono state eseguiti due diversi procedimenti, mantenendo come materiale in entrambi i casi l'ABSplus-P430.

Il file 3D del componente è stato inviato dalla modelleria all'università.

L'ABS è un copolimero derivato dallo stirene polimerizzato insieme all'acrilonitrile in presenza di polibutadiene, e perciò può essere definito come terpolimero.

Le proporzioni possono variare dal 15% al 35% di acrilonitrile, dal 5% al 30% di butadiene e dal 40% al 60% di stirene.

La scheda tecnica è la seguente:

PROPRIETA' MECCANICHE	TEST METHOD	XZ assi	ZX assi
Resistenza a trazione	ASTM D638	33 MPa	\
Resistenza a flessione	ASTM D790	58 MPa	35 MPa
Allungamento a rottura	ASTM D638	6%	\

Tabella 2:Proprietà meccaniche ABS

PROPRIETA' TERMICHE	TEST METHOD	SI
Temperatura di deflessione @66 psi	ASTM D648	96 °C
Temperatura di deflessione @240 psi	ASTM D648	82 °C
Coefficiente di Espansione Termica	ASTM E831	$8.82x10^{-6}$ mm/mm/°C

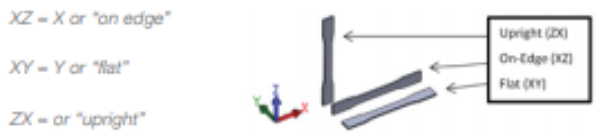
Tabella 3:Proprietà termiche ABS

ALTRO	TEST METHOD	VALORE
Durezza Hardwell	ASTM D785	109.5
Densità	\	1004 -1012 kg/m^3

Tabella 4:Altre proprietà ABS

* 1 psi = 0,00689476 MPa

Il valore della densità è incerto poiché è associato a diverse varietà di ABS.



4.4. Centro di Lavoro - CNC

Le macchine CNC sono macchine utensili i cui movimenti vengono controllati da un dispositivo elettronico integrato nella macchina detto controllo numerico. I movimenti e le funzioni di queste macchine sono prestabiliti, ovvero vengono pre-impostati a tavolino attraverso dei software specifici.
Queste caratteristiche le rendono ottime per svolgere lavorazioni ad alta precisione che richiedono lunghi tempi di lavorazione, ma impediscono alla macchina di interagire con l'ambiente esterno autonomamente in caso di collisioni o imprevisti. Per questo motivo devono essere controllate da un operatore, il quale ha il compito di impostare il programma, preparare i grezzi da lavorare e intervenire in caso di problemi o correzioni nella lavorazione.
I vantaggi delle macchine CNC su quelle manuali sono i tempi di lavoro molto ridotti e la precisa ripetibilità della lavorazione, che permette di abbassare molto i costi unitari e ottenere una qualità superiore e uniforme.
In parole povere, questi macchinari vengono principalmente utilizzati per esportare materiale e creare oggetti di qualsiasi tipo, dal tavolino di design a componenti meccanici di alta precisione.
Quindi si parte da un blocco di materiale grezzo, e attraverso un utensile, come per esempio una fresa, si asporta materiale fino all'ottenimento dell'oggetto finito.
Queste macchine sono molto diffuse nelle lavorazioni industriali per la loro capacità di lavorare tantissimi materiali come: legno, ferro, plastica, poliuretani, polistirolo EPS e XPS, metalli leggeri.



Figura 7: Centro di lavoro CNC generico

4.5. Stampanti 3D

In questo contesto di continua e progressiva evoluzione tecnologica, le stampanti 3D stanno diventando una presenza sempre più importante all'interno delle fabbriche e delle aziende. Il motivo della rapida diffusione delle stampanti 3D è fondamentalmente uno: la facilità d'uso.

Come per la realizzazione del tradizionale modello in resina, il processo di stampa 3D richiede l'utilizzo congiunto di software, hardware e materiali.

Questa nuova tipologia di macchinari sta sempre più prendendo piede, utile per replicare nel mondo reale qualsiasi modello in tre dimensioni: dai prototipi agli oggetti riprodotti in scala, fino a protesi mediche e addirittura armi.

Nel nostro specifico caso la tecnica di additive manufacturing è stata impiegata per realizzare un modello con un materiale innovativo, quale è l'ABS, valutandone le potenzialità e i limiti.

Sta di fatto che la tecnologia si è evoluta rapidamente nel corso degli ultimi anni, portando ad un abbattimento generale dei costi. Le capacità sono illimitate: spesso l'unico limite è rappresentato dalla fantasia.

La procedura prevede solitamente il posizionamento di uno strato sopra l'altro, procedendo per sezioni trasversali.



Figura 9:Fortus 250MC



Figura 8:Objet30

5. Procedure sperimentali

L'obiettivo è quello di realizzare un getto in ghisa grigia lamellare (GJL 250) mediante l'impiego di modello tradizionale in resina e in ABS tramite additive manufacturing.

In seguito sarà impostata l'analisi energetica, dei costi e dei benefici del processo.

Il suddetto getto da ottenere rappresenta la puleggia dell'albero T-TXII23 di una macchina per la lavorazione del legno, in grado di effettuare 10000 giri/min.

Il processo di ottenimento del getto, si scompone in più fasi, ognuna di vitale importanza per la sua perfetta esecuzione.

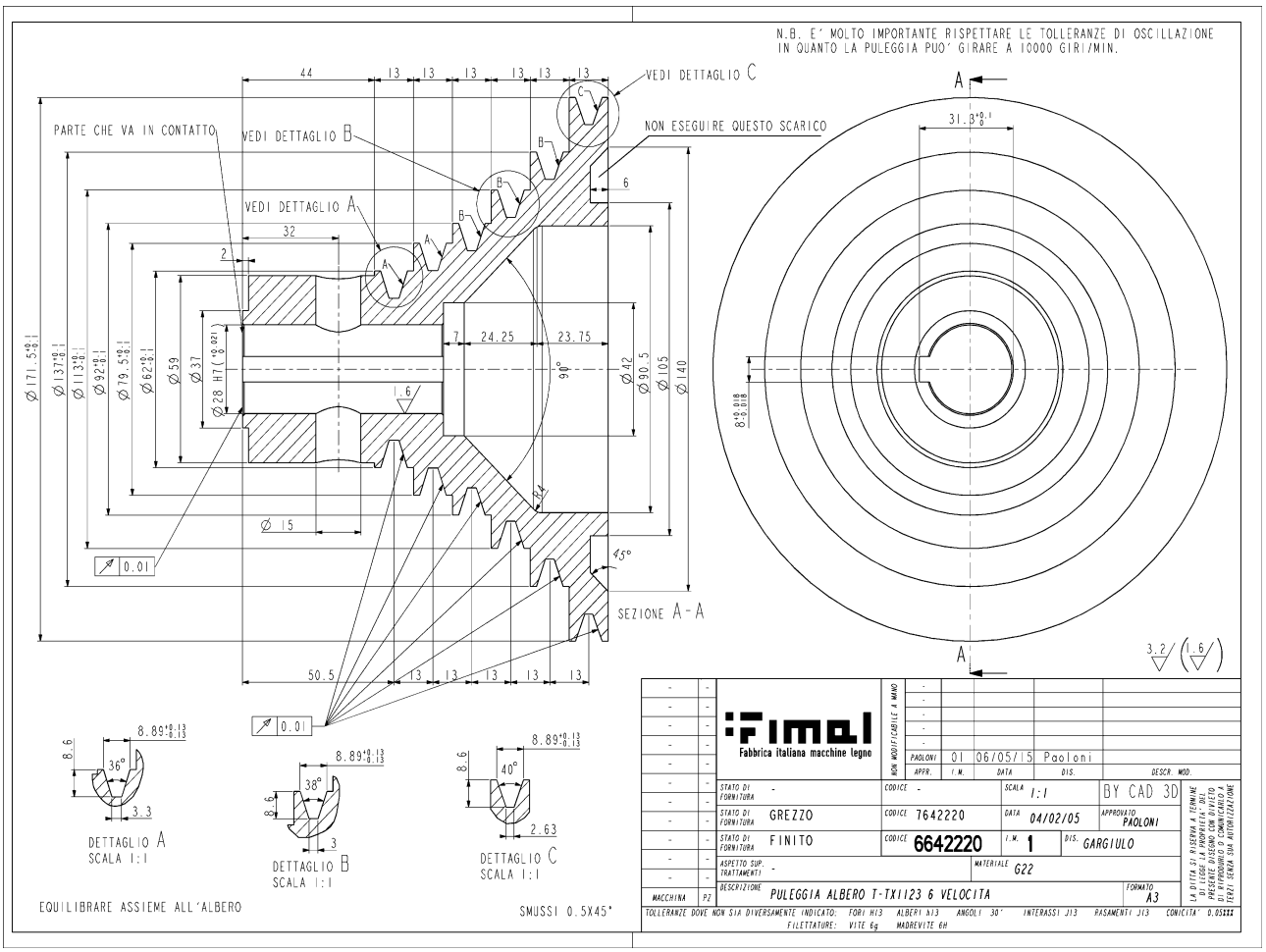


Figura 10: Disegno 2D

5.1. CAD–CAM

Il primo fondamentale step per l'esecuzione del modello è la lettura del disegno 2D, inviato dal cliente, con relativa costruzione in 3D. Il software utilizzato per realizzare la matematica del modello è il Cimatron (versione 14). In primis viene disegnato lo sketch prendendo dei riferimenti sul bidimensionale in formato .dxf, anche questo inviato dal cliente, mediante l'apposito comando "Aggiungi riferimenti" e, in secundis, viene effettuata la sua rivoluzione attorno all'asse del modello (componente simmetrico).



Figura 12:Sketch

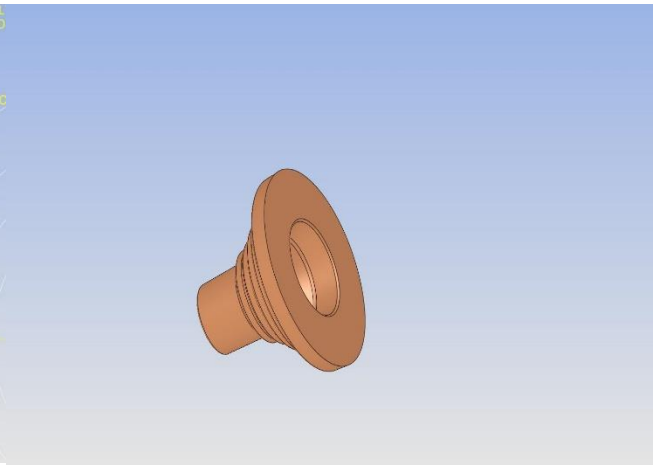


Figura 11:Rivoluzione

Quali accorgimenti sono stati presi?

- **Angolo di sformo:** in assenza dell'angolo di sformo, non si avrebbe la possibilità di estrarre il modello dalla forma in terra. Il suo valore viene scelto in base ad una tabella che lo lega all'altezza della parete;

Altezza della parete verticale (mm)		Modelli	Casse d'anima
Oltre	Fino a		
	5	10°	4°
5	10	7°	3°
10	15	5°	3°
15	30	3°	2°
30	50	2°	2°
50	70	2°	1° 30'
70		1° 30'	1° 30'

Tabella 5:Angolo di sformo

- **Sovrametallo:** viene introdotto un sovrametallo di 2.5 mm in tutte le superfici che dovranno subire ulteriori lavorazioni;

- **Angolo di raccordo:** di vitale importanza se si vuole evitare che la forma si rovini durante l'estrazione del modello. Seguendo sempre una dovuta specifica della fonderia, tutti gli spigoli dovranno essere arrotondati con un raggio di 2 mm, a differenza di tutti i raccordi che dovranno avere un raggio minimo di 5 mm.

- **Sovradimensionamento:** ultimo ma non per importanza, il sovradimensionamento permette di fronteggiare il problema legato al ritiro della lega allo stato liquido, durante la solidificazione e allo stato solido. La puleggia viene ottenuta colando all'interno della forma in terra della ghisa grigia (GJL-250), il cui ritiro è circa pari all' 1%. Di conseguenza al modello è stata introdotta una scala pari a 1,01:1. Se la ghisa fosse stata sferoidale, il suo ritiro sarebbe stato inferiore all'1%. In questo caso la FONDAR, avendo un forno rotativo, considera il ritiro pari allo 0,8%, mentre in altri casi può essere differente.

Per la tracciabilità del getto, vengono introdotti nel modello il marchio FONDAR, il codice e un'appendice rettangolare che rappresenta la base su cui attaccare una targhetta in alluminio. Su quest'ultima viene applicata la data di fusione (es. 18B9), dove il primo numero rappresenta il giorno, la seconda cifra il mese e la terza l'anno. Il font del codice è stato impostato pari a 7, altrimenti scritte troppo piccole renderebbero difficile la lettura sulla ghisa. Inoltre non è stato applicato alcun angolo di sformo dato che, al CNC, viene lavorato mediante un bulino per incisione la cui pareti sono inclinate di 45°; di conseguenza lo sformo si ottiene di macchina. Per quanto riguarda il marchio FONDAR è stato necessario applicarlo, in quanto per ottenere un'ottima risoluzione è necessario lavorarlo con una fresa sferica.

5.1.1. Procedura CAM

Lo stesso software con modellatore CAD da noi utilizzato, dispone al proprio interno del pacchetto CAM che consente di generare il percorso utensile; il passaggio pertanto è immediato premendo una semplice icona. Il centro di lavoro impiegato per la lavorazione del grezzo è il MAZAK VTC-300.



Figura 13: Centro di lavoro MAZAK VTC-300

5.2. Preparazione del modello

5.2.1. Modello in resina

La procedura CAM è stata effettuata sui seguenti particolari:

- Modello parte esterna

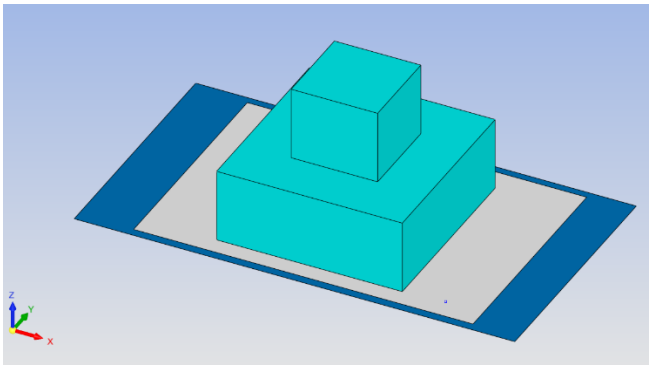


Figura 16:Grezzo CAM

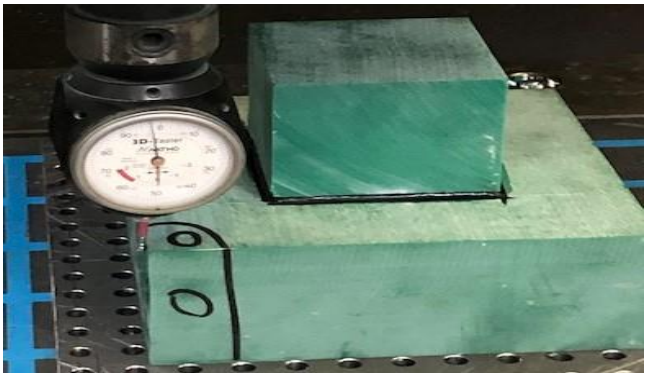


Figura 15:Grezzo CNC

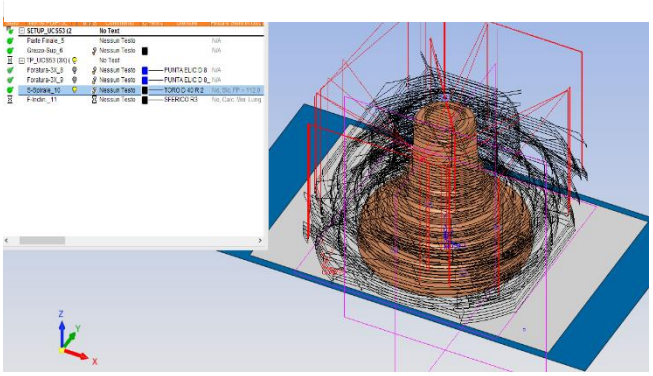


Figura 14:Sgrossatura CAM



Figura 19:Sgrossatura CNC

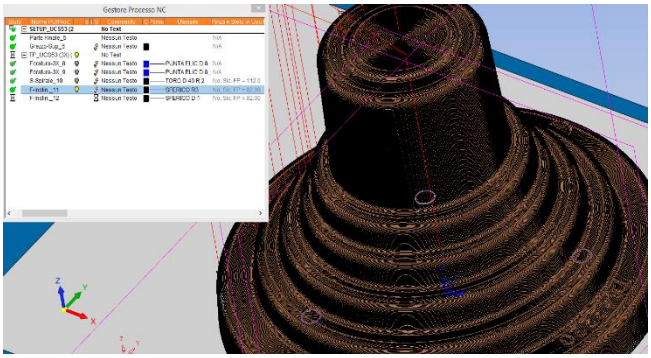


Figura 18:Finitura CAM

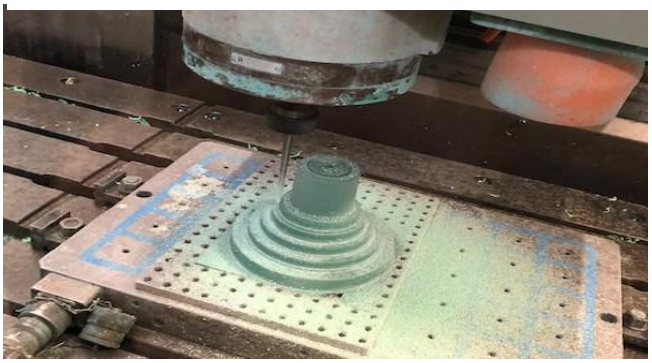


Figura 17:Finitura CNC

Il grezzo viene realizzato unendo due blocchi di resina verde, entrambi di altezza pari a 75 mm, con aree 88x88 e 189x189. Sono stati introdotti quattro fori di diametro 8, posti a distanza di 80 mm fra loro e 55 mm dai lati esterni del grezzo, utili per il fissaggio del modello nella placca. Il primo step del processo CAM è la FORATURA (immagine non presente); inizialmente viene effettuato un pre-foro, forando il grezzo di 10mm con una punta più corta e poi viene realizzato il vero foro scendendo di 150mm con una punta più lunga. In entrambi i casi è stata utilizzata una punta elicoidale di diametro 8.

Successivamente viene eseguita la SGROSSATURA utilizzando un utensile torico D40 R2; avendo tutto in positivo non sono necessarie più sgrossature. Successivamente vengono realizzate tre FINITURE: una sulla superficie esterna del modello mediante un utensile sferico D6 R3, una per ottenere il marchio FONDAR mediante una fresa sferica D1 R0.5 e infine un'ultima finitura per realizzare il codice mediante un bulino per incisione. Attraverso il software siamo stati in grado di simulare il processo e ricavare il tempo stimato di lavorazione, pari a 2 ore e 15 minuti.

- Modello parte interna ("Maschietto")

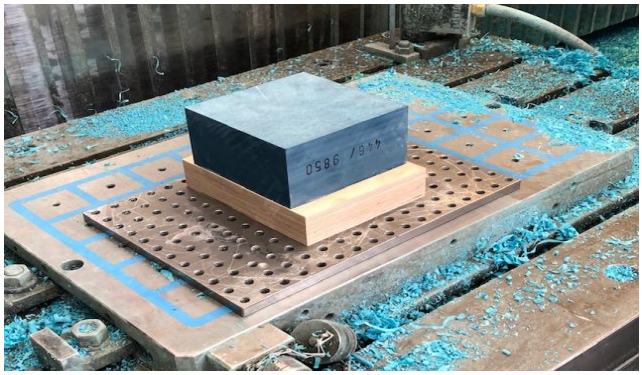


Figura 20:Grezzo Maschietto CNC

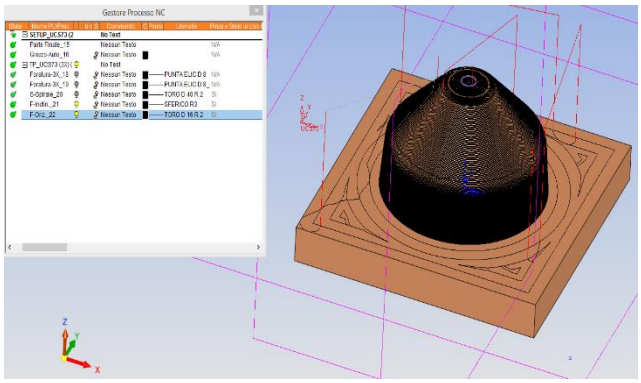


Figura 22:Finitura Maschietto CAM

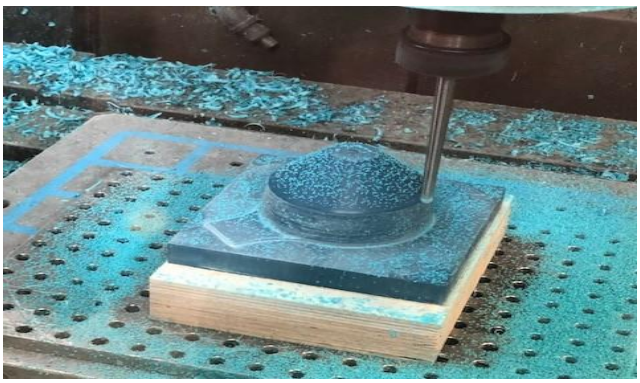


Figura 21:Finitura Maschietto CNC

In questo caso il grezzo utilizzato è un blocchetto di resina blu (con minor porosità rispetto a quella verde) di dimensioni 140x140x75 mm^3.

Nel software il modello è stato "spogliato" delle proprie superfici esterne, per poi ottenerne la parte interna.

E' stato sempre effettuato il foro di centratura sopra il grezzo con un diametro pari a 8 mm.

Le lavorazioni seguenti sono le stesse di quelle della parte esterna a differenza che, dopo la finitura (unica) mediante un utensile sferico D6 R3, viene utilizzato un utensile torico di diametro 16 per lavorare i piani orizzontali e quindi diminuire il tempo macchina.

- Sede per controfigura incassata in resina parte interna



Figura 23:Sede Controfigura

Alla placca modello inferiore è stato incollato un cassonetto, sempre in legno, di altezza 56 mm che ci permette di ottenere la sede della controfigura, quest'ultima realizzata mediante un utensile torico D40 R2.
Precedentemente è stato compiuto il foro di centratura grazie ad una punta elicoidale da 8.

Il fissaggio dei grezzi (in legno o resina) sul centro di lavoro viene ottenuto mediante l'apposizione di un piano in acciaio avvitato a questi ultimi che, di volta in volta, viene ancorato al piano magnetico in dotazione al CNC.

Colata in resina per la controfigura

L'operazione successiva è quella di accoppiare la placca inferiore in cui è stata realizzata la sede della controfigura con il modello parte interna.

Il primo step eseguito consiste nella realizzazione di tanti fori, attorno a quello di centratura della placca inferiore, che permettono la colata della resina all'interno della sede e la fuoriuscita dei gas.

Per mantenere uniti i due componenti sono stati utilizzati quattro morsetti.

In seguito sono stati miscelati resina poliuretanica bicomponente 0,5 kg con un catalizzatore (20% della resina), per poi colare tutto all'interno dei fori.



Figura 24:Foratura



Figura 25:Colata Resina



Figura 26:Controfigura Scavata

Calotta: dispositivo a forma di cupola che impedisce la formazione di moto turbolento della ghisa fusa durante la colata.

Montaggio in placca

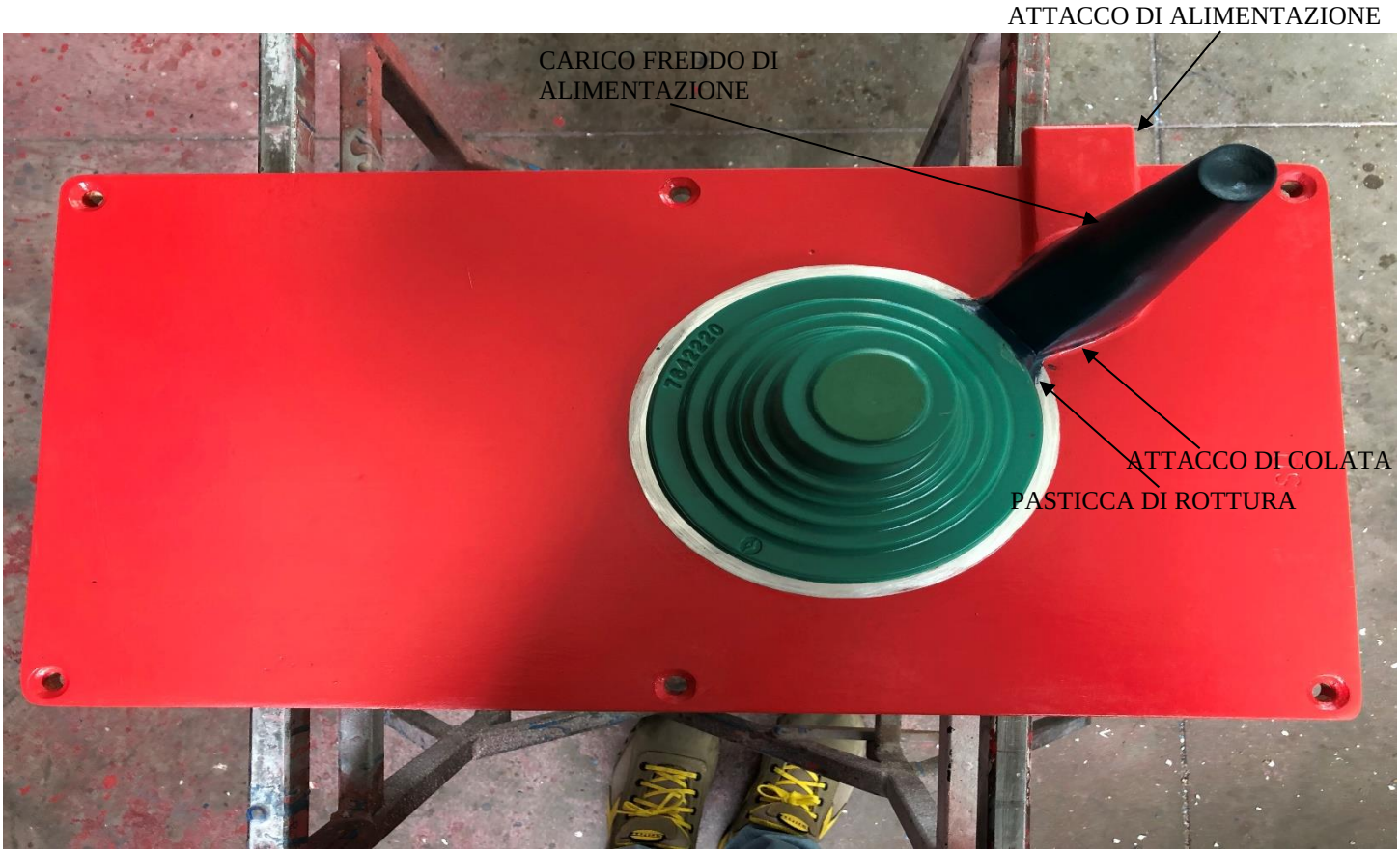


Figura 27:Placca Modello

Pasticca di rottura: una volta avvenuta la solidificazione del getto, in assenza della pasticca di rottura il distacco tra getto e attacco di colata avverrebbe nella loro interfaccia, provocando dei difetti nella superficie del getto. La pasticca viene introdotta per evitare tale problema e verrà eliminata in seguita mediante sbavatura.

Attacco di colata: permette al flusso di ghisa fusa di entrare all'interno della forma in terra.

Attacco di alimentazione: preleva la ghisa fusa dal canale di alimentazione centrale e alimenta l'attacco di colata.

Carico freddo di alimentazione: ha lo scopo di garantire ghisa liquida al getto durante la solidificazione.

5.2.2. Modello in ABS tramite tecnica PolyJet

La tecnologia PolyJet è un metodo di fabbricazione additiva che permette di realizzare prototipi e parti con superfici lisce e dettagli accurati.
Il processo adottato da una stampante 3D PolyJet è semplice:

- Processo preliminare: Il software di preparazione alla creazione calcola automaticamente il posizionamento dei fotopolimeri e del materiale di supporto tramite un file CAD 3D.
- Produzione: La stampante 3D deposita e immediatamente polimerizza a raggi UV minuscole gocce di fotopolimeri liquidi. Strati sottili vengono accumulati uno sopra l'altro sul vassoio creando un modello o un pezzo tridimensionale preciso. Quando vi siano sporgenze o forme complesse che richiedono un sostegno, la stampante 3D deposita un materiale di supporto rimovibile simile a un gel.
- Rimozione del supporto: L'utente rimuove facilmente i materiali di supporto con le mani o con dell'acqua. I modelli e gli oggetti sono pronti alla manipolazione o all'uso appena usciti dalla stampante 3D, senza bisogno di altri trattamenti.

Molte delle tecnologie di stampa 3D (soprattutto quelle che si servono di filamenti di plastica) necessitano dell'uso di strutture di supporto, le quali vengono inserite laddove vi siano spazi vuoti o sporgenze.
Le strutture di supporto sono solitamente realizzate con lo stesso materiale del prototipo, sebbene vi siano stampanti 3D in grado di utilizzare due materiali contemporaneamente:
uno per il prodotto e un altro, solitamente solubile, per le strutture di supporto.
Poiché l'unica funzione delle strutture di supporto è quella di sorreggere i primi strati "sospesi" del modello, vengono costruite con una quantità inferiore di materiale e risultano essere più leggere. Inoltre, una volta rimosse non lasceranno tracce sul pezzo. Uno svantaggio che caratterizza la stampa 3D è il costo del materiale.
Quando parliamo di riempimento ci riferiamo alla struttura interna dell'oggetto.
Ad esempio, nel nostro specifico caso, le facce esterne verranno stampate integralmente e con un
certo spessore, la parte interna, però, non verrà riempita per intero; sarà necessario scegliere la percentuale di riempimento e persino la forma geometrica dello stesso.
Si può anche scegliere il motivo geometrico del riempimento.
Alcuni di questi sono più resistenti di altri, ma generalmente è possibile selezionare il modello di default del software. La percentuale e la forma del riempimento saranno scelte in base a diversi aspetti: peso totale del pezzo, materiale utilizzato, resistenza da raggiungere, tempo di stampa e decorazioni (ove previste).

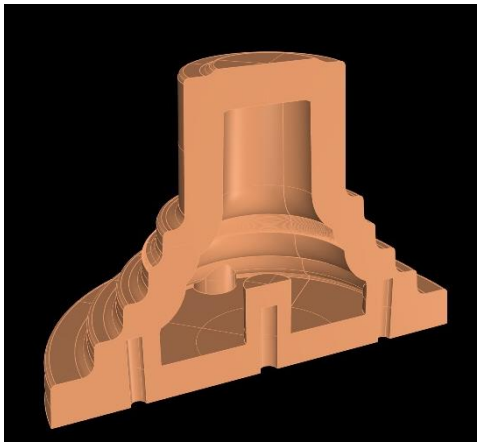


Figura 28:Cavità PolyJet

In generale, maggiore è la percentuale di riempimento, maggiore sarà la resistenza, ma più lunghi saranno i tempi di stampa. In linea di massima è sufficiente un riempimento di circa il 10-15-20%.

Nel nostro caso la cavità è stata riempita con un materiale di supporto, maggiormente gommoso di quello che caratterizza le pareti, che esercita un'azione di contropressione quando il modello subisce un carico esterno.

Per cui questo materiale garantisce una maggiore resistenza alla pressione durante la formatura in fonderia.

A differenza del modello ottenuto tramite tecnica FDM non sono stati necessari ulteriori processi post-lavorazione per migliorare la qualità superficiale, già ottima.

Una volta realizzata la filettatura nei quattro fori alla base del modello, è possibile accoppiarlo con la placca-modello utilizzata per quello in resina.



Figura 29:Modello PolyJet



Figura 30:Placca Modello PolyJet

5.2.3. Modello in ABS tramite tecnica FDM

In questo secondo procedimento di additive manufacturing, in primis è stato inviato il file 3D del modello alla stampante, la STRATASYS OBJECT 30.
Il sistema prevede almeno 2 bobine di materiale che alimentano una testa di estrusione. Il processo prevede che siano sempre presenti 2 materiali:

- materiale di "Modello" (necessario a generare il pezzo)
- materiale di "Supporto" (necessario a sostenere le parti in sottosquadra del pezzo)

Questa tecnologia di stampa 3D viene chiamata Modellazione a Deposizione Fusa (FDM) ed è una tecnica di produzione additiva che, attraverso un ugello, estrude materiale polimerico termoplastico, depositandolo strato dopo strato su un piano di costruzione, per la creazione di oggetti solidi a partire da un modello digitale. Un filamento di plastica viene condotto da una bobina e spinto attraverso l'ugello di estrusione, che lo fonde e lo deposita sulla piattaforma. Quando il filamento sciolto entra a contatto con il piano di costruzione si indurisce e il resto del materiale viene gradualmente rilasciato seguendo una struttura predeterminata fino al raggiungimento della forma desiderata. Quado uno strato si deposita, la piattaforma si abbassa dello spessore di uno strato per permettere all'estrusore di rilasciare lo strato successivo di materiale.
La testa è dotata di 2 estrusori calibrati riscaldati che sciolgono il materiale e lo depongono sul piano di lavoro con un movimento X-Y.
Molti pezzi finiti richiedono delle operazioni di rifinitura, che varia ancora una volta in base alla tecnologia impiegata e al tipo di stampante. Per alcune di esse questo passaggio è sempre necessario.
All'università è avvenuta la rimozione delle strutture di supporto, le quali vengono inserite laddove vi siano spazi vuoti o sporgenze. Questo é stato fatto attraverso l'immersione in un solvente.
Come nel caso precedente, il materiale di supporto consiste in un sottilissimo strato nella parte inferiore del pezzo.

Per quanto riguarda l'accuratezza, le stampe 3D tramite tecnica FDM non raggiungono lo stesso livello di accuratezza e qualità degli altri oggetti che vengono invece prodotti attraverso l'uso della tecnica PolyJet o attraverso l'uso del CNC.
In un primo momento il modello è stato tornito poiché presentava alla propria base un leggero raggio di curvatura.



Figura 31:Modello FDM

In un secondo momento è stato necessario migliorare la qualità superficiale del modello, in primis effettuando una finitura con tela abrasiva grana 240 e poi una seconda finitura con una spugna abrasiva grana 400.
Ottenuta la giusta qualità superficiale, il modello ottenuto tramite processo FDM è stato accoppiato con la corrispettiva placca-modello.



Figura 32:Placca Modello FDM

5.3. Formatura

Il primo importante step del processo di formatura è il fissaggio delle placche modello nei corrispettivi porta-placca. Una volta che le due placche sono state fissate avviene la compattazione della terra attorno ad esse, con conseguente formazione del negativo all'interno della forma.

Il processo di formatura viene reso possibile grazie ad un sistema AIRIMPRESS, il cui funzionamento si basa su più fasi: inizialmente le staffe vengono riempite con la terra, in seguito avviene una pre-compressione mediante impulsi d'aria e, infine, la formatura finale con testa a pestelli.

L'utilizzo dei pestelli multipli permette di rendere uniforme la compattazione della terra attorno a tutto il modello eliminando il problema legato alle variazioni di altezza.

Prima di effettuare lo stampaggio viene spruzzato su entrambe le placche modello del distaccante a base di teflon, il cui scopo è favorire l'estrazione della placca modello dalla forma in terra.

Nel nostro specifico caso si tratta di un processo in terra verde: si tratta di una formatura naturale, in cui sono presenti sabbia silicia, bentonite (argilla naturale che garantisce la resistenza meccanica), nero minerale e acqua.

Una volta realizzate, le due forme dovranno essere accoppiate, inizialmente traslando una staffa poi ruotando l'altra di 180° per poi disporla al di sopra della prima; a questo punto quella inferiore verrà "sporcata" con del licopodio per ottenere l'impronta su quella superiore verificando il giusto accoppiamento e la mancanza di schiacciamento. D'ora in poi si è pronti per la colata all'interno della forma.

Contemporaneamente al processo di formatura avviene la fusione nel forno rotativo.



Figura 33:Impianto AIRIMPRESS



Figura 34:Negativo



Figura 35:Accoppiamento

5.4. Fusione e Colata

La ghisa grigia lamellare è una lega Fe-C la cui ricetta è composta principalmente da: rottami di ghisa, acciaio, grafite, silicio (Si) e manganese (Mn). Il cambiamento di stato della ghisa avviene attorno ai 1150°C (all'aumentare del tenore di carbonio, la temperatura di fusione tende a variare) all'interno di un forno rotativo; successivamente, la temperatura viene innalzata per poi spillare la ghisa, tra i 1485-1515°C, all'interno di un forno di mantenimento mediante un apposito canale. Non appena si è pronti ad eseguire la colata nelle staffe, la ghisa fusa viene versata in un primo momento in una siviera che, successivamente, verrà spostata grazie ad un carroponte in prossimità del forno di colata.

Aprendo semplicemente quest'ultimo, il liquido caldo avrà l'opportunità di entrare all'interno della forma grazie all'apposito sistema di canalizzazione (o di alimentazione).

Oltre ai singoli getti è necessario ricavare dei provini sui cui in seguito verrà effettuata la prova di trazione, una medaglia su cui verrà effettuata l'analisi spettrometrica e due campioni che daranno l'opportunità di seguire l'analisi termica.



Figura 36:Collegamento dal forno rotativo a quello di mantenimento



Figura 37:Versamento ghisa nella siviera



Figura 38:Passaggio dalla siviera al forno di colata

5.5. Solidificazione e Sterro-Granigliatura

Una volta che il getto raggiunge una temperatura tra i 200 e i 400 °C (dipende dalla massività del pezzo), la forma viene fatta passare all'interno di un tamburo rotante di raffreddamento e, all'uscita, separata dal getto e dai vari colatoi. All'interno di questo impianto sono presenti degli spruzzatori d'acqua che abbassano la temperatura della ghisa.

Una volta uscito dal tamburo rotante di raffreddamento il materiale da trattare viene posizionato sopra un nastro trasportatore a velocità variabile e trasferito in camera di granigliatura: tre turbine, posizionate in prossimità del tappeto, determinano il trattamento di tutte le superfici esposte.

La macchina granigliatrice è composta da:

- sistema di lancio della graniglia a turbina che scaglia la graniglia contro la superficie da trattare;
- camera di granigliatura, all'interno della quale avviene il processo;
- sistema di circolazione e recupero dell'abrasivo: la sua funzione è quella di raccogliere la graniglia una volta effettuato il trattamento della superficie e ricondurla ai sistemi di getto;
- filtro per la raccolta delle polveri che vengono prodotte durante il processo;
- sistema di movimentazione dei getti;

Il procedimento di granigliatura consiste tecnicamente nello scagliare la graniglia, acciaio fuso con caratteristiche specifiche, contro la superficie metallica che deve essere rifinita.

I benefici che questo processo ci permette di ottenere sono:

- rimuovere piccole bave;
- dare un aspetto più uniforme al pezzo;
- preparare le superfici ad un ulteriore trattamento;
- rimuovere sostanze estranee dalla superficie.

E' un trattamento superficiale che ha il vantaggio di raggiungere risultati visibilmente migliori rispetto a quelli ottenuti con la pulitura manuale molto più blanda e sicuramente meno efficace.

In uscita dalla granigliatrice si avranno dei getti esenti dalla terra da fonderia e pronti per il processo di sbavatura, che solitamente non viene effettuata in sede.



Figura 41:Rottura della forma prima del tamburo



Figura 39:Getto all'uscita dalla granigliatrice



Figura 40:Getto prima della granigliatrice

6. Controlli e Risultati

6.1. Controlli Dimensionali

In termini di dimensioni si è riscontrato che il getto rispecchia le misure previste e quindi non sono presenti difetti legati al ritiro eccessivo, al montaggio errato dello stampo o al ritiro disomogeneo.
La massa di una singola puleggia è pari a 6,750 kg.



Figura 42:Peso del getto

6.2. Controlli Distruttivi

I controlli distruttivi si scompongono in due tipologie:

6.2.1. Sezione

Ha lo scopo di mettere in risalto la presenza di difetti (cavità) all'interno del getto.
La puleggia è stata sezionata in 4 parti effettuando due tagli ortogonali, dalle quali non è stato riscontrato nessuno difetto; di conseguenza il getto può essere ritenuto integro.
La sezione è stata realizzata utilizzando una sega a nastro a denti grandi (la scelta del dente è legata al materiale da tagliare, nel caso dell'acciaio si parlerebbe di denti piccoli).
La suddivisione in poche parti viene eseguita quando il getto in ghisa non è destinato ad elevate prestazioni; difatti, eseguendo solamente 4 sezioni, può capitare che all'interno di una delle parti piene sia presente un difetto che durante le successive lavorazioni rimanga occulto.



Figura 43:Sezione

Se il getto è destinato ad alte prestazioni solitamente vengono realizzate più sezioni, sia verticalmente che orizzontalmente, sulle parti maggiormente massive per mettere in risalto possibili difetti; in alternativa il cliente potrebbe richiedere la radiografia del getto: il principio di funzionamento di tale tecnica si basa sulle alterazioni che le radiazioni elettromagnetiche subiscono non appena incontrano un difetto nel loro percorso all'interno del materiale (si parla però in questo caso di controlli non distruttivi).

6.2.2. Prova di Trazione

La lega che compone il provino deve restare identica a quella con la quale sarà realizzato il provino.
Durante la fase di colata, dal forno vengono prelevate, mediante un crogiolino in materiale refrattario, tre quantità di ghisa fusa da versare all'interno di un porta-provini. In questo contenitore verranno introdotti tre filtri con lo scopo di bloccare le scorie contenute all'interno del liquido. Una volta solidificato, il provino avrà una forma tronco-conica e, quindi, dovrà essere lavorato per conferirgli l'aspetto finale.



Figura 44:Portaprovini

In primis, utilizzando un'apposita segatrice a nastro, il provino viene privato della propria testa (in cui è presente il filtro) e di parte della propria base (maggiormente dura rispetto alle altre zone).
Una volta asportate entrambe le parti, viene eseguito il processo di tornitura, garantendo al provino una forma cilindrica e portandolo a misura.
Prima di tale lavorazione, è necessario effettuare un foro di centratura conico grazie alla quale, usando una contropunta durante la tornitura, è possibile evitare che il provino subisca ingenti spostamenti durante la rotazione.



Figura 45:Forma iniziale provino con filtro

Il provino dovrà rispettare queste dimensioni:

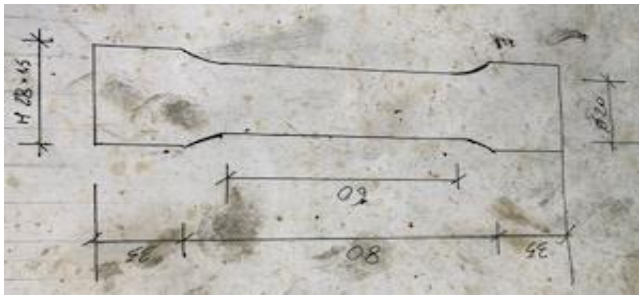


Figura 46:Dimensioni provino secondo Normativa

Durante la lavorazione è necessario raffreddare il materiale con dell'acqua poiché scaldandolo troppo si corre il rischio di alterare le sue proprietà (non deve accadere, dato che dal provino si ricavano le proprietà del getto in ghisa).
Osservando le misure poste precedentemente, è facile notare che le due testine dovranno avere un diametro pari a 28.
A differenza di quanto scritto, si realizzano di due decimi più piccole poiché, durante la filettatura (ultimo step per ottenere il provino) il materiale potrebbe subire un rigonfiamento.



Figura 47:Tornitura Provino

L'importante è rendere veritiere la lunghezza e il diametro del tratto centrale, su cui si dovrà effettuare la misurazione; le due testine fungono solamente da fissaggio per la macchina oleodinamica con cui effettuare la prova di trazione.
L'informazione 1,5 presente sulla testina non è altro che il passo della filettatura. Una volta realizzata la provetta si è pronti per eseguire la prova di trazione, che consiste nel sottoporre il provino ad uno sforzo di trazione (fino alla rottura) allo scopo di determinare una serie di caratteristiche meccaniche.



Figura 48:Forma finale provino

La macchina utilizzata per eseguire la prova, coadiuvata da un software, ci permette istante per istante di misurare sia il carico applicato al provino che il suo allungamento (nel caso della ghisa grigia l'allungamento è infinitesimo).
Si è in grado di accoppiare la macchina al provino, grazie alla filettatura eseguita su entrambe le testine.
Il carico va applicato gradatamente e con continuità sino a provocarne la rottura.
La macchina è costituita da una robusta incastellatura a portale con la traversa e i tiranti collegati al pistone; inoltre è completata dal quadro di comando con i pulsanti di avviamento e di arresto della pompa, le manopole e le leve per la regolazione dei carichi e della portata dell'olio e il dinamometro per l'indicazione del carico applicato.



Figura 49:Macchina prova di trazione

Una volta portato a rottura il provino, il software ci restituirà un diagramma (carico/deformazione) da cui

leggere le principali proprietà meccaniche della ghisa.

Tipo sez.:	Circolare
Diametro:	20 [mm]
Sez.:	314.159 [mm²]
Lo:	65 [mm]
Prova:	Trazione
Fm:	82.71 [kN]
Rm:	263.3 [N/mm²]
Fu:	81.92 [kN]
Metodo di prova:	
Macchina di prova:	Metro Com
Data taratura:	21/11/2017

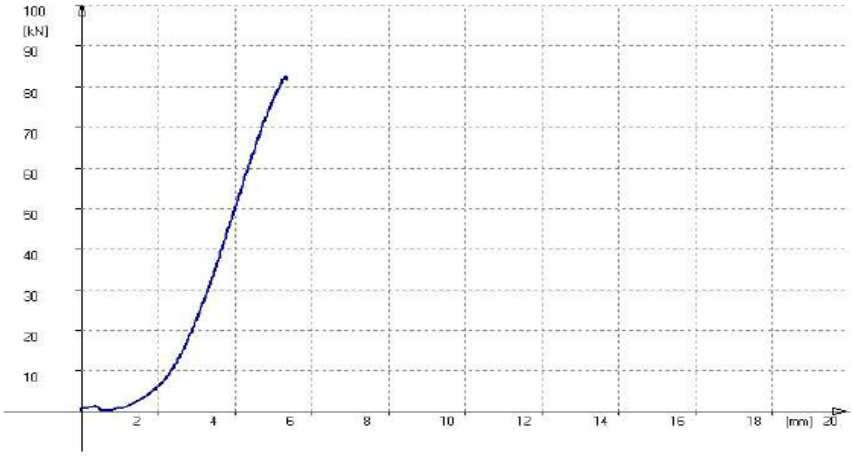


Figura 50:Grafico prova di trazione

In base ad alcune osservazioni sul grafico e sui valori riportati è possibile affermare che la ghisa rispetti chiaramente le proprie specifiche; difatti il nostro provino è stato portato a rottura applicando un carico pari a 263.3 MPa. Nel caso in cui valore ottenuto fosse stato minore di 250 MPa sarebbe stato sbagliato parlare di ghisa GJL 250. Fm e Fu sono rispettivamente il carico massimo di rottura e il carico totale a rottura.

Benché la ghisa grigia non subisca ingenti allungamenti, comunque è soggetta a una leggera deformazione, una volta arrivati al carico di 82.71 kN; per cui la sezione del provino tenderà a decrescere, anche se di poco, e il carico subirà una piccola diminuzione portando poi il materiale a rottura.

Per questo motivo Fm e Fu non coincidono tra loro.

Successivamente è stata effettuata un'analisi microscopica nel punto di rottura del provino riscontrando: nella prima immagine si nota la disposizione delle lamelle, diversamente la seconda ha lo scopo di risaltare la struttura ferritico-perlitica della ghisa (bagnando il provino con il Nital, una soluzione acida).



Figura 52:Disposizione lamelle



Figura 51:Struttura ferritico-perlitica

I risultati ottenuti hanno tenuto conto della normativa di riferimento alla prova di trazione, la UNI EN 10002/1 che fissa in modo rigoroso le proporzioni tra gli elementi geometrici del provino (lunghezza L0 del tratto utile, diametro della sezione circolare d, area della sezione S0) e la modalità di esecuzione della prova.

6.3. Controlli non distruttivi – Prova di durezza

I controlli non distruttivi sono il complesso di prove condotte impiegando metodi che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura in esame, finalizzati alla ricerca e identificazione di difetti della struttura stessa.

La PROVA DI DUREZZA appartiene a uno di questi controlli e si pratica su un campione, di cui si vuole rilevare la durezza.

Per eseguire la prova si aveva a disposizione un durometro Reicherter, una macchina composta da una base di appoggio per il materiale da testare e una parte mobile con un penetratore costituito da una sfera di dimensioni standard. Una manopola permette di dare un precarico specifico a secondo del diametro della sfera.

Successivamente si andrà a misurare la grandezza dell'impronta usando un apposito visore graduato. La prova è stata effettuata sia nella testa della puleggia che nella propria base.

Utilizzando inoltre due apposite tabelle è possibile associare il diametro dell'impronta alla durezza del materiale e, in seguito, capire se il getto in ghisa ottenuto rispetta determinate specifiche.

Tipo Ghisa secondo UNI EN 1561	Spessore di parete [mm]	HB
200-250	3.5-15	180-220
300-350	3.5-15	210-240
200-250	15-30	180-220
300-350	15-30	210-240
200-250	30-60	180-220
300-350	30-60	210-240

Tabella 6:Tipo Ghisa-Durezza

Diam.	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85	2,90	2,95	3,00	3,05	3,10	3,15
HB	308	297	285	274	264	254	245	236	228	220	212	204	197	190
Diam.	3,20	3,25	3,30	3,35	3,40	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	3,70	3,75	3,80	3,85
HB	184	178	172	167	162	157	152	147	142	138	134	130	126	122

Tabella 7:Diametro-Durezza

Nella testa della puleggia si è riscontrato un diametro dell'impronta pari a 3.15mm a cui è stata associata, osservando la relativa tabella, una durezza di 190 HB; nel secondo caso il diametro è pari a 3.2mm, per cui la durezza è di 184 HB.

A questo punto, osservando la tabella superiore, si è notato che in entrambe le prove la durezza rientra nel range 180-240, per cui è possibile ritenere il getto valido e funzionale.

Nel caso in cui i due valori ottenuti non avessero rispettato la specifica, era necessario contattare il cliente per ottenere il suo benestare, altrimenti sarebbe stato obbligatorio eseguire una seconda colata.

I risultati conseguiti mediante la prova di durezza hanno tenuto conto della normativa di riferimento ISO 6506/1.

6.4. Analisi Spettrometrica

L'analisi spettrometrica ad emissione atomica consente di individuare e quantificare all'interno di un materiale una serie di elementi, presenti entro certi intervalli di concentrazione.

Il provino, a forma di medaglia, viene prelevato durante la colata per poi solidificare istantaneamente all'interno di una conchiglia. Successivamente viene opportunamente lapidato per ottenere una superficie lucida e analizzato attraverso la generazione di un arco elettrico scoccato sulla propria superficie dall'elettrodo dello spettrometro e la successiva emissione luminosa.

Gli spettri atomici, diversi per ogni elemento, provocano l'emissione di determinate lunghezze d'onda, consentendo la quantificazione della composizione chimica del materiale.

Per ovviare al possibile problema dell'assorbimento di radiazione attraverso l'aria, all'interno della camera di scintillazione viene creato il vuoto.



Figura 53:Spettrometro

Normalmente uno stesso provino viene sottoposto a più analisi, ovvero vengono generate più scosse elettriche in diversi punti della superficie del campione da analizzare.

Viene eseguita tale analisi per confrontare i valori ottenuti con le quantità di elementi introdotte dagli addetti alla colata durante la preparazione della ghisa, in modo tale da correggerne le dosi nelle prossime fusioni.

Nel nostro caso, i valori ideali per gli elementi che compongono la ghisa GJL 250 sono:

- Carbonio (C) tra 3.10 e 3.25 %
- Silicio (Si) tra 1.85 e 2.05 %
- Manganese (Mn) attorno a 0.850 %
- Rame (Cu) attorno a 0.300%
- Zolfo (S) tra 0.04 e 0.05%
- Fosforo (P) attorno a 0.110%
- Cromo (Cr) inferiore a 0.1% altrimenti i getti ottenuti risulterebbero troppo duri e difficilmente lavorabili

L'alluminio non dovrà essere presente poiché causerebbero dei difetti nel getto.

Effettuando più analisi sul provino sono stati ottenuti i seguenti risultati:

	|-|Fe	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V
Media	42257	3,13	2,23	1,038	0,115	0,053	<0.001	0.073	0.030	0.009	0.399	<0.001	0.020	0.018
1	41724	3,14	2,24	1,038	0,116	0,056	<0.001	0.073	0.030	0.009	0.398	<0.001	0.020	0.018
2	42800	3,12	2,23	1,038	0,114	0,052	<0.001	0.073	0.030	0.010	0.398	<0.001	0.020	0.018
3	42277	3,13	2,22	1,037	0,114	0,051	<0.001	0.073	0.030	0.009	0.400	<0.001	0.020	0.018

Tabella 8:Analisi spettrometrica

Eccessi di carbonio o di silicio possono portare alla comparsa di grafite piuttosto grossolana nei getti di grandi dimensioni, causando un drastico calo di resistenza a trazione, durezza e tenacità delle aree interessate. Dato che carbonio e silicio tendono ad agire sulla microstruttura della ghisa in modo combinato, si è soliti ricorrere ad un parametro di comodo quale il "carbonio equivalente", calcolato nel seguente modo:

$$CE = \%C + 0{,}33\%Si + 0{,}33\%P + 0{,}027\%Mn + 0{,}4\%S$$

Tanto più il tenore di carbonio equivalente aumenta e tanto più diminuisce la durezza del getto, diminuisce la probabilità di ottenere dei microrisucchi interni e migliora la colabilità per sezioni piccole; se il CE decresce allora la durezza aumenta, ma si potrebbero verificare più risucchi.

Il software utilizzato dall'azienda lega il tenore di carbonio equivalente alla temperatura di liquidus (T_{liq}), ovvero la temperatura in cui si verifica l'avvio delle precipitazioni delle prime particelle solide, attraverso la seguente legge:

$$CE=14.45-0,0089T_{liq}$$

6.5. Analisi Termica

Consiste nella registrazione mediante software dell'andamento della temperatura nel tempo di un campione di metallo, colato solitamente in un crogiuolo di sabbia contenente una termocoppia.

Il risultato è una curva che, a seconda del tipo di crogiuolo adoperato, può fornire informazioni sia del tipo compositivo che comportamentale.

L'analisi termica attraverso l'elaborazione della curva di solidificazione di raffreddamento ci consente di valutare la qualità metallurgica del bagno in base a 4 parametri: il sottoraffreddamento, la recalescenza, la temperatura di fine solidificazione e l'angolo di chiusura a essa associato.

L'angolo di chiusura della curva alla fine del processo è un indicatore della tendenza alla formazione di porosità o anche di microcavità.

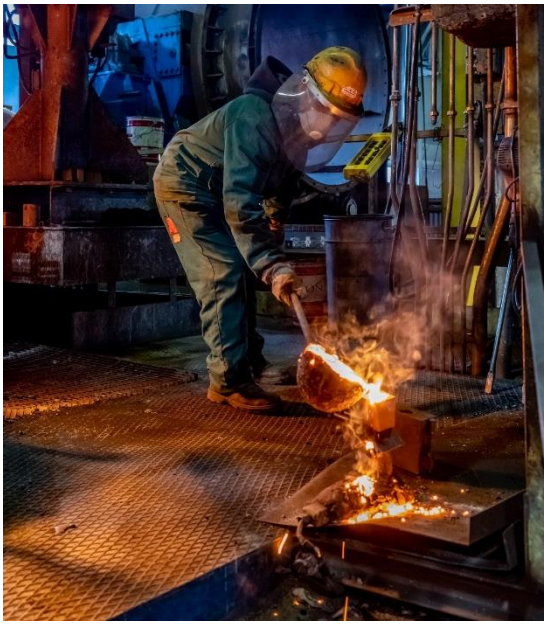


Figura 54:Crogiolo con termocoppia

Il sottoraffreddamento (ΔT) è la differenza fra la temperatura ideale di solidificazione e la temperatura minima raggiunta del liquido prima dell'avvio della solidificazione vera e propria. La recalescenza R è invece la differenza fra la temperatura massima raggiunta e quella minima.

L'analisi termica viene eseguita mediante Itaca8, un software che permette di controllare dinamicamente il processo fusorio.

Il controllo è stato effettuato su due campioni, dove su uno è stato introdotto dell'inoculante mentre l'altro è "puro". L'inoculazione non è altro che quel processo consistente nell'aggiungere piccole quantità di sostanze, in grani o in polvere, al metallo liquido prima della colata. Tali sostanze modificano la struttura del metallo e i cambiamenti fisici e meccanici non sono spiegabili con la variazione, generalmente trascurabile, della composizione chimica del metallo di partenza, ma piuttosto con il fatto che la loro introduzione promuove la formazione di germi di cristallizzazione.

Un'applicazione dell'inoculazione difatti interessa la forma e la distribuzione della grafite nella ghisa grigia. Solitamente la qualità della ghisa con introduzione di inoculante è maggiore.

Durante l'analisi termica è di vitale importanza la rilevazione del solidus, ovvero la temperatura alla quale l'ultima goccia di liquido cristallizza (temperatura di fine solidificazione).

Dalle due analisi termiche, eseguite sui differenti provini, sono scaturiti due grafici:



Figura 55:Analisi termica su campione in assenza di inoculante

In questa prima analisi i valori ottenuti sono:

- Tliq 1186,32 °C
- TeStart 1160,41 °C
- TeMin 1141,73 °C
- TeMax 1144,98 °C
- Tsolidus 1089,91 °C
- Qualità della ghisa 80%

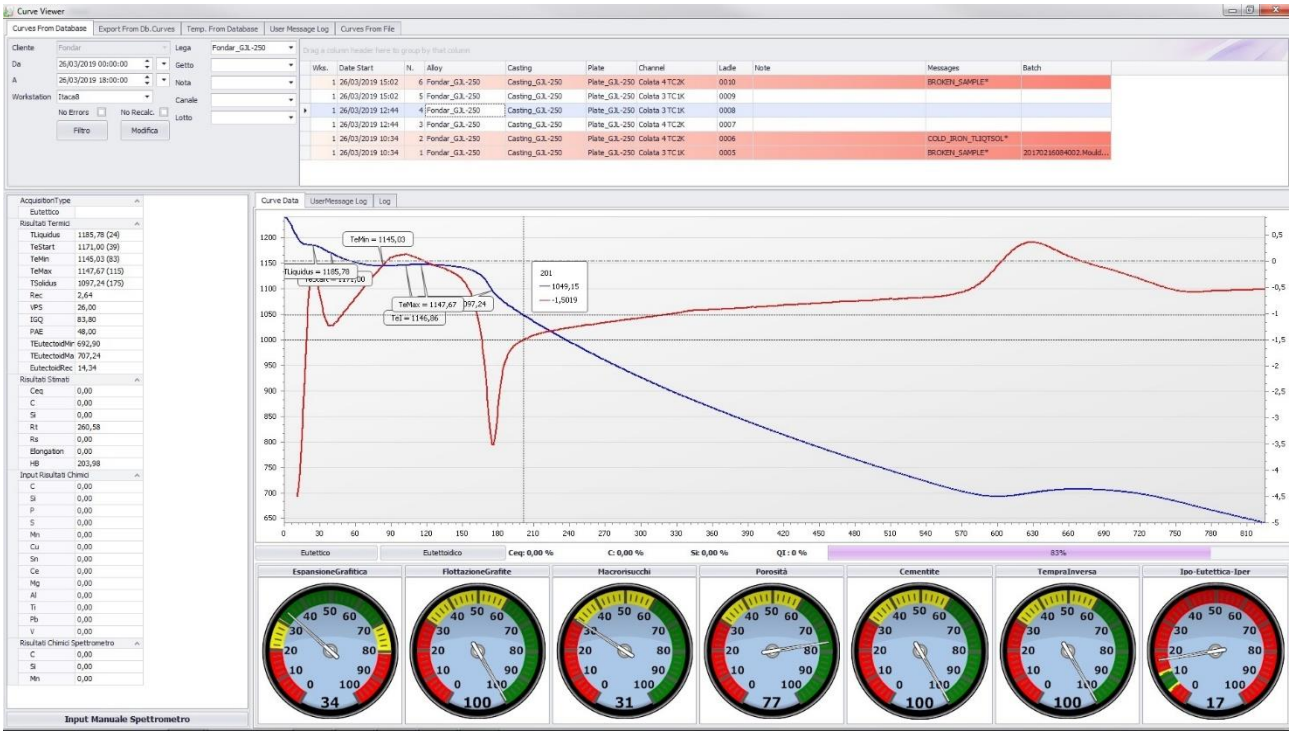


Figura 56:Analisi termica su campione in presenza di inoculante

In questa seconda analisi i valori sono:

- Tliq 1185,78 °C
- TeStart 1171,00 °C
- TeMin 1145,03 °C
- TeMax 1147,07 °C
- Tsolidus 1097,24 °C
- Qualità della ghisa 83%

I dati hanno dimostrato che la ghisa in presenza di inoculante presenta una qualità maggiore, anche se la differenza non è elevata (caso particolare).

Mediante la registrazione della curva di raffreddamento della ghisa (curva blu) e della sua derivata prima (curva rossa) con strumenti quali Itaca8, software per l'analisi termica della ghisa, è possibile identificare le temperature principali che permettono di determinare le fasi più importanti dell'andamento di solidificazione della ghisa stessa**.**

Monitorando l'andamento di solidificazione della ghisa in tempo reale, in fase di produzione della ghisa stessa, è possibile controllare in maniera mirata la qualità della ghisa prodotta e correggere tempestivamente la relativa produzione nel caso in cui gli obiettivi di produzione prefissati dalla fonderia non vengano raggiunti prima della fase di produzione del getto**.**

6.6. Confronti economici

6.6.1. Analisi dei costi e benefici dei tre modelli

Il confronto economico fra i tre differenti modelli è stato realizzato tenendo conto del preventivo fornito dalla modelleria per la realizzazione della placca-modello ottimizzata con 8 modelli in resina e di quella comprensiva di cassonetto, sede delle controfigure scavate.

Il preventivo è stato adattato ai due modelli in ABS per il calcolo dei corrispettivi costi.

MODELLO IN RESINA

Il volume di resina grezza impiegata per ottenere il modello parte esterna e parte interna corrisponde a 5,5 dm^3, dove il costo unitario per dm^3 è di 9 €/ dm^3.

Per ottenere la controfigura sono stati utilizzati 6 kg di resina G26, mentre 12 kg di resina CAMATTINI MC153 per realizzare i 7 modelli parte esterna grazie alle controfigura.

Il costo macchina orario coincide a 35 €/h.

Sono state introdotte 3 maniche e 1 supporto per filtri per un ammontare di 120€.

MODELLO IN ABS TRAMITE TECNICA FDM

Tempo macchina: 55:21 h

Materiale modello: 1220 cm^3

Materiale di supporto: 22.6 cm^3 (per i fori)

Il costo di una singola cartuccia è di 240€ + IVA(22%) per 1000 cm^3, per cui 292,8 € .

Per il modello sono stati impiegati 1220 cm^3 + 22.6 cm^3 (il materiale di supporto è lo stesso che compone il modello), per cui il volume totale corrisponde a 1242.6 cm^3.

La realizzazione dell'intero modello presuppone l'impiego di due cartucce, per un ammontare di 585.6 €.

Dato che non tutto il materiale delle cartucce viene utilizzato, è necessario impostare una proporzione per calcolare il costo effettivo del grezzo, ottenendo:

$$Costo = \frac{1242{,}6 \text{ x } 585{,}6}{2000} = 364 \text{ €}$$

Il costo macchina orario calcolato dall'università è 5 €/h, da cui si ricava il costo totale macchina di 276,05 €.

A tutto ciò è necessario aggiungere 1h per realizzare il maschietto a 35 €/h (costo fornito dalla modelleria), ottenendo un costo totale macchina di 311,05€.

Una volta realizzati modello parte esterna e parte interna sarà necessario far ricorso alle controfigure per ottenere gli altri 7 modelli.

MODELLO IN ABS TRAMITE TECNICA POLYJET

Tempo macchina: 35:24h

Materiale modello: 1630g

Materiale di supporto: 414g (per i fori e materiale interno)

Il costo di una singola cartuccia con 2 kg di modello e 2kg di supporto ammonta a 640€.

Il pezzo realizzato è di circa 2 kg e, se avessimo preso la decisione di riempirlo interamente con il materiale del modello, non ci sarebbe bastata una cartuccia.

Come mostrato sopra, sono stati utilizzati 1.63 kg di materiale modello e 0.414 kg di materiale di supporto.

Impostando due differenti proporzioni, si è in grado di ricavare il costo effettivo di materia prima impiegata:

$$X = \frac{320x1{,}63}{2} = 260{,}8€ \qquad Y = \frac{320x0{,}41}{2} = 66{,}24€$$

dove:

- X è il costo del materiale per il modello;
- Y è il costo del materiale di supporto.

Sommando i due valori, otteniamo un totale di 327€.

Il costo macchina orario calcolato dall'università è 5 €/h, da cui si ricava il costo totale macchina di 176,2€, a cui andranno sommati i 35€ per realizzare il maschietto, per un ammontare di 211,2€.

Nella pagina seguente viene riepilogato il confronto tra i tre differenti modelli.

	RESINA		ABS (POLYJET)		ABS (FDM)	
DESCRIZIONE TIPO DI COSTO	QUANTITA'	IMPORTO	QUANTITA'	IMPORTO	QUANTITA'	IMPORTO
CAD+CAM	ORE 4	140 €	ORE 4	140 €	ORE 4	140 €
MATERIALE LAVORABILE	Dm^3 5.5	50 €	g 2044 Dm^3 1.5	327 € 14 €	Cm^3 1242,6 Dm^3 1.5	364 € 14 €
PREPARAZIONE GREZZO	ORE 1	35 €	\	\	\	\
TEMPO MACCHINA PER MODELLO	ORE 3	105 €	ORE 36:24	211,2 €	ORE 56:21	311 €
REALIZZAZIONE CONTROFIGURA	ORE 3	105 €	ORE 3	105 €	ORE 3	105 €
RESINA PER CONTROFIGURA G26	KG 6	40 €	KG 6	40 €	KG 6	40 €
TEMPO PER RIPRODUZIONI	ORE 8	280 €	ORE 8	280 €	ORE 8	280 €
RESINA CAMATTINI MC153	KG 12	180 €	KG 12	180 €	KG 12	180 €
FINITURA, CENTRAGGIO, CODICI	ORE 1	35 €	\	\	ORE 1	35 €
PLACCHE LEGNO N°2 MM 700x800 CASS. H. 40		230 €		230 €		230 €
MONTAGGIO IN PLACCA CON CONTROFIGURE SCAVATE	ORE 18	630 €	ORE 18	630 €	ORE 18	630 €
SUPP.MANICHE/FILTRI	NR. 3+1	120 €	NR. 3+1	120 €	NR. 3+1	120 €
IMPORTO CALCOLATO		**1950 €**		**2277 €**		**2449 €**
IMPORTO DEFINITIVO		**2100 €**		**2500 €**		**2700 €**

Tabella 9:Confronto economico modelli

L'importo definitivo è stato ricavato sommando all'importo calcolato il suo 10%.

I dati ricavati sono sperimentali e si potrebbero avere informazioni migliori con ulteriori prove.
E' necessario tener conto di due considerazioni:

- Il modello parte interna in tutti e tre i casi è stato realizzato in resina al CNC, per cui il suo costo ha un impatto pressoché trascurabile sull'importo definitivo dei due preventivi con modello in ABS.
  Per rendere il paragone più realistico è necessario stampare il "maschietto" sia con la tecnica PolyJet che con quella FDM.
- Sono stati considerati due differenti costo orario macchina: 5€/h per i processi di additive manufacturing (fornito dall'università) e 35 €/h fornito dalla modelleria, che tiene conto delle varie spese legate all'elettricità, manodopera, ammortamenti ecc.
  Nel caso in cui le stampanti 3D fossero appartenute alla modelleria, il costo orario macchina non avrebbe combaciato con quello dell'università.

6.6.2. Analisi di costi e benefici tra barra e fonderia

La necessità di valutare nuove modalità di produzione e di mettere in evidenza i vantaggi e svantaggi del processo di fusione in terra ci ha permesso di realizzare un confronto tra il costo di una singola puleggia realizzata mediante un processo di fonderia in terra con quello di una puleggia ottenuta per sottrazione di materiale da una barra in ghisa.
Sia per la barra che per la fusione il materiale dovrà essere identico, quindi ghisa grigia GJL 250, altrimenti il confronto non avrebbe alcuna efficacia.

BARRA

Le dimensioni delle barre sono standardizzate e, ricercando sul sito della Musola Metalli, noto fornitore di semilavorati di metalli non ferrosi, se ne è scelta una con diametro di 180mm e lunghezza 3000mm.
La massa per unità di metro è pari a 188,22 kg/mt, per cui la massa totale di una singola barra è 564,66 kg.
Con approfondite ricerche il sito ha evidenziato una promozione riguardante la ghisa GJL 250, il cui prezzo per unità di massa è di 1,18 €/kg.
Essendo il prezzo un valore temporale, questa analisi ha una validità limitata.
Per cui si ricava che il costo di una singola barra in ghisa ammonta a 666,3€.
Osservando attentamente il prodotto finito nel bidimensionale alto 122mm e aggiungendo 3mm e 2mm da entrambe le parti rispettivamente per taglio e successive lavorazioni, è necessario effettuare la sottrazione da pieno su un materiale cilindrico alto 132mm.
Da una singola barra in ghisa è possibile ottenere, effettuando più tagli, ben 22,7 pulegge $\simeq$ 22 per una lunghezza totale di 2904mm. Ciò significa che non tutta la barra verrà impiegata per ottenere più pulegge e, quindi, che una parte di materiale (96mm) verrà scartata.
Naturalmente ad una quantità di materiale sprecato corrisponde una quantità di denaro perso (0,096m*188,28 kg/mt*1,18€/kg = 21,3€). Parte di questo scarto verrà poi recuperato (rivenduto), per la precisione 0,2*€persi.
In primis si era deciso di realizzare l'analisi su un lotto di 200 pulegge ma dividendolo per 22 (pulegge ottenibili da una singola barra) si sarebbe calcolato un valore pari a 9.09 $\simeq$ 10 barre.
Per cui, anziché scartare quasi una barra intera (2730mm), impattando negativamente sull'analisi dei costi, si è preferito ottimizzare il lotto portandolo a 220 pulegge.
A questo punto è possibile ricavare il costo di tutte le pulegge, per un ammontare di 6663€.
Naturalmente a questo primo importo è obbligatorio aggiungere il prezzo del trasporto che, in media per questi materiali, è di 100€ ogni 1000kg; essendo la massa di tutte e dieci le barre pari a 5646,6 kg, il costo del trasporto risulta essere di 564,7€.
A queste cifre andranno sottratte quelle legate al materiale di scarto che potrà essere rivenduto. Dato che per ogni barra vengono sprecati 18 kg, quindi un totale di 180kg, la ghisa che subirà una vendita avrà il valore di 0,2*180kg*1,18€/kg = 42,48.
Infine è necessario considerare l'aspetto legato alle lavorazioni meccaniche (eseguite dalla Senamek Srl).

Ci è stato preventivato il costo di ogni singolo taglio pari a 0,5€, per cui per realizzarne 220 è necessario spendere 110€. Inoltre ci è stato garantito, sempre secondo preventivo, che per ottenere una puleggia per sottrazione da pieno ci vorranno mediamente 13 minuti, con un importo di 40 €/ora.
Per lavorare 220 pulegge saranno necessari 2860 minuti (47,7 ore) di lavorazione, con una spesa totale di 1908€.
Tirando le somme l'importo da pagare ammonta a 2018€+7186€=9204€.

FONDERIA

In questo differente caso è stato realizzato un primo preventivo dalla fonderia per esprimere il costo per unità di massa del getto, pari a 1,75€/kg.
Una singola puleggia pesa 6,75kg, per cui il suo prezzo ammonta a 11,8€, per un totale di 2596€.
A questa cifra si dovrà aggiungere quella legata alle lavorazioni meccaniche e all'attrezzatura (placca modello).
Diversamente dal caso precedente, il tempo di lavorazione di un'unica puleggia viene preventivato a 10 minuti, ottenendo un tempo totale di 36,7 ore (40€/ora per cui 1468€).
Per quanto riguarda la modelleria, la costruzione di 8 modelli in resina da produzione con densità 1,2 g/cm^3 e montaggio su 2 placche mm. 700x800 in multistrato, di cui una con castello per controfigure in resina, e complete di sistema di alimentazione per la ghisa ammonta, sempre secondo preventivo, a 2100€.
La spesa totale in questo caso è pari a 2100€+1468€+2596€= 6164€.

Nella pagina seguente sarà presente sia il resoconto che il confronto dei due differenti casi.

	FUSIONE	BARRA
Lotto Pulegge [nr.]	220	220
Dimensione barra	\	Diam.180mm x 3000mm
Massa barra [kg]	\	564,66
Costo barra [€/kg]	\	1,18
Costo totale barra [€]	\	666,3
Nr. Pulegge per barra [nr.]	\	22
Barre totali [nr.]	\	10
Costo totale barre [€]	\	6663
Massa totale barre [kg]	\	5646,6
Costo trasporto [€]	\	565
Scarto rivenduto [€]	\	-42,5
Costo al kg getto [€/kg]	1,75	\
Massa getto puleggia [kg]	6,75	\
Costo singola puleggia [€]	11,8	\
Costo totale pulegge [€]	2596	\
Lavorazione singola [minuti]	10	13
Costo lavoraz. su ora [€/ora]	40	40
Ore totali lavorazione [ora]	36,7	47,7
Costo lavorazione [€]	1468	2018
Costo attrezzatura [€]	2100	\
Spesa totale [€]	6164	9204
Costo tot. singola puleggia [€]	**28**	**41,8**

Tabella 10:Confronto economico barra-fusione con modello in resina

Dividendo il costo dell'attrezzatura per la differenza di costo unitario si è in grado di calcolare il numero necessario di pulegge da realizzare per ripagare le placche modello; per la precisione 2100/13.8= 152 getti per il modello in resina, 2500/11.8= 212 getti per il modello in ABS tramite tecnica PolyJet e 2700/10.8= 250 getti per il modello in ABS tramite tecnica FDM.

Solitamente la resina del modello ha una validità di 8000 stampate, in seguito non sarà più possibile eseguire il processo di formatura poiché troppo usurata. Avendo ottimizzato la placca-modello introducendo 8 figure in resina, con 8000 stampate è possibile realizzare 64000 pulegge.

Per cui fra 152 e 64000 getti l'attrezzatura sarebbe già stata pagata; una volta superato il limite si ricomincia il ciclo con una nuova placca-modello e con differenti costi.

Nel caso del modello in ABS, ipotizzando lo stesso numero di stampate di quello in resina (cifra non attendibile essendo un materiale di prova e non utilizzato nel campo della fonderia), l'intervallo dei grezzi corrisponde a 212-64000 per la tecnica PolyJet e 250-64000 per la tecnica FDM.

Si è comunque notato che, dal punto di vista economico, il confronto fra i due processi ha messo in evidenza la maggior convenienza di quello con fusione in terra da fonderia (differenza di 13.8€, 11.8€ e 10.8€ per ogni singola puleggia rispettivamente per modello tradizionale al CNC, PolyJet e FDM).

6.7. Analisi Energetica

Anche in termini energetici l'obiettivo è realizzare un confronto e individuare il processo maggiormente conveniente tra la fusione di 220 pulegge in terra verde e la fusione di 10 barre, sempre in ghisa GJL 250.
In entrambi i casi, il calore sviluppato per fondere la ghisa è dato dalla somma di tre diversi contributi, rispettando la seguente legge:

$$Q = Q_R + Q_F + Q_S$$

dove:

- Q_R rappresenta il calore di riscaldamento: quantità di calore necessaria per portare la ghisa dalla temperatura ambiente a quella di fusione;
- Q_F rappresenta il calore latente di fusione: quantità di calore necessaria per fondere la ghisa una volta arrivati alla temperatura di fusione;
- Q_S rappresenta il calore di surriscaldamento: quantità di calore necessaria per innalzare la temperatura da quella di fusione a quella di surriscaldamento (o di spillamento).

In entrambi casi la temperatura ambiente (T_{amb}) viene assunta pari a 25 °C, quella di fusione (T_{fus}) pari a 1175 °C e quella di surriscaldamento (T_{surr}) del valore di 1485 °C.
Per eseguire il calcolo è necessario introdurre il calore specifico della ghisa c=0,44 $^{KJ}/_{kg°K}$ e il calore latente di fusione λ=0,13 $^{Kcal}/_{kg}$
Per ogni singolo calore sono state usate le seguenti formule:

$Q_R = m*c*(T_{fus} - T_{amb})$

$Q_F = m* \lambda$

$Q_S = m*c*(T_{surr} - T_{fus})$

FONDERIA

Nel caso specifico della fusione in terra verde, per la massa non si dovrà considerare solamente quella delle pulegge, ma è presente un contributo legato alla canalizzazione. La massa dei colatoi viene assunta pari al 30% di quella dei getti. Per cui la massa totale è m = 1485 kg (pulegge) + 446 kg (30% massa pulegge) = 1931 kg.

$Q_R = m*c*(T_{fus} - T_{amb}) = 1931\ kg * 0{,}44\ ^{KJ}/_{kg°K} * (1175-25)\ °K = 0{,}9\ GJ$

$Q_F = m* \lambda = 1931\ kg * 0{,}13\ ^{Kcal}/_{kg} = 1\ MJ$

$Q_S = m*c*(T_{surr} - T_{fus}) = 1931\ kg * 0{,}44\ ^{KJ}/_{kg°K} * (1485-1175)\ °K = 263\ MJ$

Per cui il calore totale sviluppato dalla fusione delle 220 pulegge è $Q=1{,}164\ GJ$.

BARRE

In questo caso la massa delle barre è m= 5647 kg, mentre tutti gli altri parametri sono identici a quelli del caso precedente.

$Q_R = m*c*(T_{fus} - T_{amb}) = 5647\ kg * 0{,}44\ ^{KJ}/_{kg°K} * (1175-25)\ °K = 2{,}9\ GJ$

$Q_F = m* \lambda = 5647\ kg * 0{,}13\ ^{Kcal}/_{kg} = 3\ MJ$

$Q_S = m*c*(T_{surr} - T_{fus}) = 5647\ kg * 0{,}44\ ^{KJ}/_{kg°K} * (1485-1175)\ °K = 770\ MJ$

Il calore sviluppato per la fusione delle 10 barre è $Q= 3{,}673\ GJ$.

Anche dall'analisi energetica si evince che il processo maggiormente conveniente risulta essere quello della fusione in terra verde.

7. Conclusioni

Non è ancora chiaro fino a che punto la stampa 3D potrà integrare o addirittura rimpiazzare i metodi di produzione attuali, ma per ora svolge appieno il suo compito nella prototipazione rapida, precisa e funzionale.
In un'epoca in cui il progresso tecnologico sembra non avere freni e limiti, possiamo aspettarci di tutto anche per quel che riguarda la stampa 3D con un suo uso sempre più massiccio nell'industria e nel privato e con delle funzionalità e delle possibilità progettuali e produttive sempre più sofisticate ed efficaci che porteranno notevoli agevolazioni in ogni settore produttivo.
Confrontando i preventivi dei 3 differenti modelli è possibile mettere in evidenza alcuni limiti della stampa 3D.
In primis, se si stanno cercando delle proprietà specifiche, alcuni materiali possono risultare piuttosto costosi (differenza di centinaia di euro con il modello in resina).
In aggiunta, per determinate tecnologie come la tecnica FDM, le parti possono richiedere operazioni di post-lavorazione e utilizzo di macchinari aggiuntivi.
In conclusione, come ultimo limite, possiamo annoverare tempi macchina piuttosto elevati per la produzione di modelli di grandi dimensioni, rendendola estremamente inconveniente.
D'altro canto è possibile evidenziare anche dei grossi vantaggi come lo spreco quasi nullo di materiale, Minore quantità di risorse umane impiegate grazie ad un alto livello di automazione e assenza di costi aggiuntivi legati alla riparazione e/o sostituzione di utensili usurati dalla produzione.
Anche per la produzione mediante fusione è possibile evidenziarne la potenzialità e i principali limiti.
I vantaggi possono essere così riassunti:

- Per realizzare le successive lavorazioni meccaniche si parte da un componente grezzo più leggero, in confronto ad esempio al metodo con la barra in ghisa.
- Permette di ottenere cavità interne che attraverso l'uso delle lavorazioni meccaniche non sarebbe possibile eseguire (caso dei distributori oleodinamici, voluta dei diffusori di acqua, ecc)
  Per questo specifico vantaggio è necessario l'impiego di anime, particolari dispositivi in sabbie pre-rivestite che permettono di ottenere quelle cavità che non dovranno essere riempite durante il processo di colata.
- Elevata convenienza per volumi di produzione rilevanti, garantendo minori costi e minori tempi di produzione.
- Gli scarti di materia prima sono relativamente bassi e, in parte, riutilizzabili/rivendibili.
- Permette di ottenere componenti con forme complesse.
- Permette di realizzare un'ampia gamma di componenti, dalle piccole (per esempio la puleggia) alle grandi dimensioni.

I principali svantaggi sono i seguenti:

- Finitura superficiale dei getti nettamente inferiore rispetto a quella ottenuta mediante il processo di fusione a cera persa (utile per le micro-fusioni) o mediante il processo “replicast” (esclusivo processo utilizzato per ottenere fusioni a partire da modelli a perdere in polistirolo espanso).
- Presenza di difettosità (porosità, ritiri, cricche, ecc.)
- Sono richieste post-lavorazioni (distaffaggio, pulitura dal materiale di formatura, ecc.)
- Bassa convenienza per volumi di produzione limitati.

Bibliografia e sitografia

- Cigada A., Pastore T., *"Struttura e proprietà dei materiali metallici"*, Milano, McGraw-Hill,2012
- Forcellese A., *"Processi di fonderia"*, [https://learn.univpm.it/pluginfile.php/72739/mod_resource/content/1/FONDERIA%202018-19.pdf]
- ERASMUS3D+, *"GUIDA TECNICA PER LA STAMPA 3D"*, https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-IT.pdf
- Assofond, *"Documento guida per la valutazione dei rischi e la sorveglianza nelle fonderie di ghisa"*, http://public.assofond.it/09%20Progetti/Area%20Tecnica/Assofond_Doc.%20Guida%20Valutazione%20Rischio%20e%20Sorveglianza%20Sanitaria_Ed%2009%202017.pdf
- Musola Metalli, *"Ghisa"* https://www.musolametalli.it/prodotti/ghisa
- ProServiceTech, *"Itaca8"*, http://www.proservicetech.it/itaca8-cast-iron-thermal-analysis/
- STAMPA3Dstore, *"Guida completa alle tecnologie di Stampa 3D"*, https://www.stampa3dstore.com/guida-completa-alle-tecnologie-di-stampa-3d-da-seltek/

Normative

ISO 6506-1, *" Metallic materials—Brinell hardness test"*

UNI EN 10002, "Materiali metallici—Prova di trazione"

Indice delle figure

Figura 1: Sistema di canalizzazione ..... - 10 -
Figura 2: Indice di fluidità ..... - 12 -
Figura 3:Cono di ritiro ..... - 14 -
Figura 4:Cavità di ritiro ..... - 14 -
Figura 5:Microcavità inter-dendritiche ..... - 14 -
Figura 6:Prototipazione rapida ..... - 17 -
Figura 7: Centro di lavoro CNC generico ..... - 24 -
Figura 8:Objet30 ..... - 25 -
Figura 9:Fortus 250MC ..... - 25 -
Figura 10: Disegno 2D ..... - 26 -
Figura 11:Rivoluzione ..... - 27 -
Figura 12:Sketch ..... - 27 -
Figura 13: Centro di lavoro MAZAK VTC-300 ..... - 28 -
Figura 14:Sgrossatura CAM ..... - 29 -
Figura 15:Grezzo CNC ..... - 29 -
Figura 16:Grezzo CAM ..... - 29 -
Figura 17:Finitura CNC ..... - 29 -
Figura 18:Finitura CAM ..... - 29 -
Figura 19:Sgrossatura CNC ..... - 29 -
Figura 20:Grezzo Maschietto CNC ..... - 30 -
Figura 21:Finitura Maschietto CNC ..... - 30 -
Figura 22:Finitura Maschietto CAM ..... - 30 -
Figura 23:Sede Controfigura ..... - 31 -
Figura 24:Foratura ..... - 32 -
Figura 25:Colata Resina ..... - 32 -
Figura 26:Controfigura Scavata ..... - 32 -
Figura 27:Placca Modello ..... - 33 -
Figura 28:Cavità PolyJet ..... - 34 -
Figura 29:Modello PolyJet ..... - 35 -
Figura 30:Placca Modello PolyJet ..... - 35 -
Figura 31:Modello FDM ..... - 36 -
Figura 32:Placca Modello FDM ..... - 37 -
Figura 33:Impianto AIRIMPRESS ..... - 38 -
Figura 34:Negativo ..... - 38 -
Figura 35:Accoppiamento ..... - 38 -
Figura 36:Collegamento dal forno rotativo a quello di mantenimento ..... - 39 -

Figura 37:Versamento ghisa nella siviera ..... - 39 -
Figura 38:Passaggio dalla siviera al forno di colata ..... - 39 -
Figura 39:Getto all'uscita dalla granigliatrice ..... - 41 -
Figura 40:Getto prima della granigliatrice ..... - 41 -
Figura 41:Rottura della forma prima del tamburo ..... - 41 -
Figura 42:Peso del getto ..... - 42 -
Figura 43:Sezione ..... - 42 -
Figura 44:Portaprovini ..... - 43 -
Figura 45:Forma iniziale provino con filtro ..... - 43 -
Figura 46:Dimensioni provino secondo Normativa ..... - 43 -
Figura 47:Tornitura Provino ..... - 44 -
Figura 48:Forma finale provino ..... - 44 -
Figura 49:Macchina prova di trazione ..... - 44 -
Figura 50:Grafico prova di trazione ..... - 45 -
Figura 51:Struttura ferritico-perlitica ..... - 45 -
Figura 52:Disposizione lamelle ..... - 45 -
Figura 53:Spettrometro ..... - 48 -
Figura 54:Crogiolo con termocoppia ..... - 50 -
Figura 55:Analisi termica su campione in assenza di inoculante ..... - 51 -
Figura 56:Analisi termica su campione in presenza di inoculante ..... - 52 -

Indice delle tabelle

Tabella 1:Caratteristiche tecniche OBOMODULAN ..... - 22 -
Tabella 2:Proprietà meccaniche ABS ..... - 23 -
Tabella 3:Proprietà termiche ABS ..... - 23 -
Tabella 4:Altre proprietà ABS ..... - 23 -
Tabella 5:Angolo di sformo ..... - 27 -
Tabella 6:Tipo Ghisa-Durezza ..... - 47 -
Tabella 7:Diametro-Durezza ..... - 47 -
Tabella 8:Analisi spettrometrica ..... - 49 -
Tabella 9:Confronto economico modelli ..... - 55 -
Tabella 10:Confronto economico barra-fusione con modello in resina ..... - 59 -

Ringraziamenti

Dopo tre lunghi ed intensi anni, finalmente il giorno è arrivato: scrivere queste frasi di ringraziamento è il tocco finale della mia tesi. E' stato un periodo di profondo apprendimento, non solo a livello scientifico, ma anche personale. Scrivere questa tesi ha avuto un forte impatto sulla mia personalità. Vorrei spendere due parole di ringraziamento nei confronti di tutte le persone che mi hanno sostenuto e aiutato durante questo periodo.

Prima di tutto vorrei ringraziare il professore El Mehtedi, relatore di questa tesi, e l'ingegner Mancia per avermi seguito costantemente, per la loro disponibilità e che mi hanno fornito indicazioni e correzioni preziose.

Un ringraziamento speciale va alla FONDAR e alla Modelleria G.R. per l'opportunità donata di affacciarmi sul mondo del lavoro e per avermi fatto apprendere nuove conoscenze. Senza di loro questo lavoro non avrebbe preso vita.

Il ringraziamento più grande va ai miei genitori e a mia sorella Giulia; in parte per il finanziamento degli studi, e quindi senza i loro sacrifici non potrei certamente essere qui, un po' per avermi sempre sostenuto, anche nei momenti di difficoltà e non mi hanno mai fatto mancare il loro appoggio durante l'intero percorso di studi.

Un ulteriore pensiero devo riservarlo alla mia ragazza Asia che mi ha supportato e sopportato in questi lunghi mesi e mi ha fatto mantenere la calma quando l'ansia prendeva il sopravvento.

Tengo a ringraziare anche i miei colleghi con cui ho condiviso questa incredibile esperienza.

Un ultimo ringraziamento, ma non per importanza, va alla mia seconda famiglia, ovvero a tutti i miei amici che mi hanno sempre incoraggiato e con cui ho scherzato e scherzerò nel futuro.