

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali



Tesi di Laurea Magistrale

**STUDIO, ANALISI, VALIDAZIONE
SPERIMENTALE ED APPLICAZIONE INDUSTRIALE
DELLA SIMULAZIONE DEL PROCESSO DI
COLAGGIO A CERA PERSA DI METALLI PREZIOSI.**

Relatore

Prof. Marco Actis Grande

Tutor aziendale

Ing. Vera Benincasa

Candidata

Martina Angeloni

Anno accademico 2019/2020

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 – Tecnica di colaggio a cera persa	3
1.1 Considerazioni preliminari	3
1.2 Processo di microfusione a cera persa in oreficeria	7
1.2.1 Creazione del modello	7
1.2.2 Materiale refrattario	12
1.2.3 Processo di colata	16
1.2.4 Operazioni successive	19
Capitolo 2 - Impianto di microfusione a cera persa in Mattioli	21
2.1 Specifiche aziendali di processo	21
2.1.1 Creazione del modello	21
2.1.2 Materiale refrattario	26
2.1.3 Processo di colata	32
2.1.4 Operazioni successive	35
Capitolo 3 – Simulazione computerizzata applicata al processo di microfusione	39
3.1 Considerazioni preliminari	39
3.2 Studio del software e impostazione dei dati	41
3.2.1 Scelta design e creazione del modello CAD	42
3.2.2 Impostazione dei dati di input	46
3.2.3 Simulazioni impostate	50
3.3 Analisi risultati simulazioni	54
3.3.1 Verifica ciclo di cottura materiale refrattario	54
3.3.2 Analisi simulazioni prima e dopo inserimento dati	55
3.3.3 Analisi porosità	63
3.3.4 Analisi profili di solidificazione	71
3.3.5 Variazione dei parametri	73
3.3.6 Analisi albero di produzione	78
3.3.7 Aspetti fluidodinamici	80
Capitolo 4 – Caso Studio	84
4.1 Analisi del pezzo	84
4.2 Processo produttivo	85
4.2.1 Disegn e analisi della simulazione	85
4.2.2 Lavorazione del pezzo	87
4.3 Variazioni processo produttivo	89

4.3.1 Design e analisi della simulazione	89
4.3.2 Lavorazioni del pezzo	89
4.4 Risultati e confronto.....	91
4.4.1 Design e analisi simulazione	91
4.4.2 Lavorazione del pezzo.....	93
4.4.3 Considerazioni	100
Capitolo 5 - Conclusioni	102
Riferimenti.....	106
Ringraziamenti.....	109

Indice figure

Figura 1: Tipici passaggi di un processo di microfusione a cera persa [1]	4
Figura 2: Sequenza dei passaggi caratteristici di un processo di microfusione di tipo block mold	6
Figura 3: Tipica catena di processo della prototipazione rapida [2].	7
Figura 4: Modelli in resina (a) e in cera (b) con i loro supporti.....	8
Figura 5: Tipico difetto da ritiro della cera (a) che si ripropone sul pezzo in metallo (b)..	10
Figura 6: Possibile difetto di un pezzo prodotto da stampa 3D.	10
Figura 7: Schema della disposizione dei pezzi rispetto al canale principale	11
Figura 8: Esempi di disposizione delle riserve di metallo sul pezzo	11
Figura 9: Cilindri riempiti con miscela gesso-silice.	13
Figura 10: Diagramma P-T di trasformazione della silice nelle sue diverse forme.	13
Figura 11: Espansione termica delle differenti fasi della silice [3].	15
Figura 12: Granulati (a,b,c) e lastrine di oro puro (d) per formare le diverse leghe.	16
Figura 13: Diagramma ternario Au-Ag-Cu [8]	17
Figura 14: Schema funzionamento del forno per fusione della lega.....	17
Figura 15: Diagramma di fase binario Au-Cu [8].....	18
Figura 16: Disegno CAD di un gioiello su Rhinoceros nelle 4 viste.	21
Figura 17: Cere provenienti da stampante 3D con supporto (in bianco) (a)	22
Figura 18: Iniettore cera utilizzato in azienda.....	23
Figura 19: Cere utilizzate per la creazione dei pezzi. a) Cera iniettata nello stampo di gomma.....	23
Figura 20: Vulcanizzatore utilizzato in azienda.	24
Figura 21: Stampi in gomma vulcanizzata a caldo (sopra) e a freddo (sotto)	25
Figura 22: Alberi in cera.	25
Figura 23: Micrografia SEM della polvere iniziale fornita dal produttore.....	26
Figura 24: Miscele sottovuoto utilizzato in azienda.	27
Figura 25: Micrografia SEM della miscela dopo idratazione	28
Figura 26: Ciclo di cottura della miscela gesso-silice.....	29
Figura 27: Micrografia SEM della miscela di polvere dopo ciclo di cottura.....	30
Figura 28: Analisi TG-DTA del gesso usato in azienda [10].	31
Figura 29: Forno sottovuoto e in pressione usato in azienda (a) e suo meccanismo di funzionamento (b)	33
Figura 30: Sequenza di entrata e uscita dei gas nelle due camere durante la fase di colata	34
Figura 31: Operazione di spiantatura dell'albero in lega	35
Figura 32: Buratto ad aghi utilizzato in azienda.....	36
Figura 33: Macchina per elettrolucidatura usata in azienda (a,b). Gioiello prima e dopo il trattamento (c).....	36
Figura 34: Macchina usata per il processo di rodiatura in azienda.	37
Figura 35: Schema del processo di colata, riempimento e solidificazione [11]......	39
Figura 36: Schema di azioni da intraprendere per il corretto uso di un software [1]	40
Figura 37: Tre geometrie scelte per costruire un albero semplificato.....	42
Figura 38: Disposizione pezzi sull'albero (a) e del materiale refrattario che lo circonda (b)	43
Figura 39: Geometria albero di produzione	44
Figura 40: Alberi di produzione in cera.....	45
Figura 41: Disposizione termocoppie prova ciclo di cottura.....	50
Figura 42: Disposizione termocoppie all'interno del cilindro	50

Figura 43: Disposizione termocoppie per studiare il profilo.....	51
Figura 44: Disposizione termocoppie su albero di produzione.....	53
Figura 45: Grafico ciclo termico di cottura a confronto con analisi termocoppie	54
Figura 46: Grafici inseriti in ProCAST al variare della temperatura di calore specifico (sopra)	55
Figura 47: Grafici inseriti in ProCAST al variare della temperatura di calore specifico (sopra)	56
Figura 48: Grafico della conduttività termica del gesso.....	56
Figura 49: Grafici di confronto lega in oro rosso prima (curve tratteggiate).....	58
Figura 50: Grafici di confronto frazione solida per la lega in oro rosso prima (curve tratteggiate).....	59
Figura 51: Confronto del tempo di solidificazione per le simulazioni ottenute.....	60
Figura 52: Grafici di confronto lega in oro giallo prima (curve tratteggiate)	61
Figura 53: Grafici di confronto frazione solida per la lega in oro giallo prima (curve tratteggiate).....	62
Figura 54: Tempo di solidificazione a confronto per la leghe in oro giallo prima (sinistra)	63
Figura 55: Tempo di solidificazione dell' albero semplificato in OR (a),	64
Figura 56: Tempo di solidificazione(a), (b), (c) e.....	65
Figura 57: Porosità riscontrata nel pezzo 1(a), nel pezzo 2 (b) e nel pezzo 3 (c)	66
Figura 58: : Tempo di solidificazione dell' albero semplificato in OG (a),.....	67
Figura 59: Tempo di solidificazione(a), (b), (c) e.....	68
Figura 60: Porosità riscontrata nei pezzi 1(a), pezzo 2(b, c) e pezzo 3(d, e, f)	69
Figura 61: Profili di temperatura a confronto nelle 4 zone analizzate per la lega in oro rosso.....	71
Figura 62: Tempo di solidificazione (sopra) e porosità (sotto).....	74
Figura 63: Tempo di solidificazione (sopra) e porosità (sotto).....	75
Figura 64: Porosità riscontrate in elementi ricavati da una colata	76
Figura 65: Tempo di solidificazione (sopra) e porosità (sotto).....	77
Figura 66: Profili di temperatura a confronto nelle 4 zone.....	78
Figura 67: Tempo di solidificazione (a) e porosità dell'albero di produzione (b)	80
Figura 68: Tempi di riempimento per portate crescenti da sinistra a destra.....	81
Figura 69: Bracciale rigido in oro rosso preso in analisi	84
Figura 70: Parti costituenti il bracciale (verde) e loro sistema di alimentazione originale (grigio).....	85
Figura 71: Geometria albero originale.....	86
Figura 72: Tempo di solidificazione (a sinistra) e porosità (a destra)	86
Figura 73: Bracciale appena spiantonato (a), dopo carta smeriglio 400 (b) e dopo lucidatura (c)	88
Figura 74: Nuovo sistema di alimentazione per le fodere (a) e geometria del nuovo albero (b).....	91
Figura 75: Tempo di solidificazione e porosità per le tre simulazione	93
Figura 76: Grafico rugosità relative per i diversi macchinari di finitura superficiale analizzati	95
Figura 77: Tolleranza tra sedi e perni del bracciale prima(a) e dopo (b) la modifica	97
Figura 78: Tempi di lavorazione al banco a confronto per i due processi	99

Indice Tabelle

Tabella 1: Composizione chimica della miscela fornita dal produttore.....	26
Tabella 2: composizione chimica delle principali leghe usate in azienda.....	32
Tabella 3: Temperatura di solidus, Temperatura di liquidus e densità delle tre leghe.	32
Tabella 4: Parametri di colata usata per lega di oro giallo e rosso.....	34
Tabella 5: Proprietà termiche e fluidodinamiche richieste dal software	46
Tabella 6: Composizioni delle leghe J e K [14]	47
Tabella 7: Alcune proprietà termiche delle leghe J e K [14]	47
Tabella 8: Proprietà termiche delle leghe usate in azienda ricavate da analisi	48
Tabella 9: Quantità di metallo necessarie prima e dopo la modifica	92
Tabella 10: Successione dei passaggi e dei tempi di lavorazione	94
Tabella 11: Dati rugosità raccolti per pezzi trattati con i macchinari presenti in azienda	95
Tabella 12: Successione dei passaggi e dei tempi di lavorazione	98

Introduzione

Il seguente lavoro di tesi è stato svolto presso Mattioli S.p.A., azienda situata a Torino e specializzata da anni nella produzione di oreficeria di alta qualità.

In particolare, lo scopo di questa analisi in un primo momento è stato quello di approfondire il processo di microfusione a cera persa che caratterizza la produzione orafa, concentrandosi sulle specifiche dello stesso in Mattioli. Il mondo dell'oreficeria nel corso dei secoli ha sempre destato molto interesse in quanto la scelta di un gioiello è stata sempre associata alla ricerca di bellezza ed estetica. Ovviamente nel tempo le tecniche di produzione hanno subito dei cambiamenti, spinte da un miglioramento continuo, fino ad arrivare a quelle che sono le realtà industriali di oggi in questo campo. La complessità delle geometrie e le ridotte dimensioni dei gioielli, sono gli ostacoli che più possono minare il raggiungimento di un'elevata qualità finale del prodotto: ogni elemento ha caratteristiche proprie che vanno di volta in volta adattate al processo di produzione al fine di ottenere il miglior risultato.

Successivamente è stata approfondita la fase di progettazione del gioiello operando un'analisi dettagliata di un software, ProCAST, che, a partire da un disegno CAD dello stesso, permette di simulare il processo di colata e quindi la fase di solidificazione. La sua introduzione nella catena di produzione del settore orafo e non solo, ha destato molto interesse negli anni: il suo utilizzo offre notevoli vantaggi sia dal punto di vista della qualità finale dell'oggetto, che sul tempo di produzione. L'originarsi di eventuali difetti nei pezzi prodotti, quale la presenza di porosità e ritiri, e la ricerca delle condizioni ottimali di processo, sono aspetti facilmente valutabili tramite l'uso del software.

Ciò che si è approfondito in merito all'utilizzo di ProCAST nel seguente lavoro di tesi è stata la fase di solidificazione del processo di microfusione a cera persa. Dopo aver inserito in un primo momento dati e proprietà relativi alle condizioni di processo e ai materiali utilizzati in azienda, è stato necessario verificare la bontà dei risultati ottenuti tramite simulatore, sottolineando punti di conformità e punti di discordanza con i casi reali. Successivamente si sono variati diversi parametri di colata in modo da simulare il processo a parità di altre condizioni, al fine di ottenere quelle ottimali.

Nell'ultima parte dello studio è stato proposto un caso studio, volto all'ottimizzazione dell'intero processo di produzione.

Capitolo 1 – Tecnica di colaggio a cera persa

1.1 Considerazioni preliminari

Il processo di microfusione a cera persa, noto anche come investment casting, è una delle più antiche tecniche di produzione nella formatura di materiali metallici, risalente a più di 6000 anni fa. Il nome deriva dall'azione di "rivestire", ovvero ricoprire dei modelli in cera, con un materiale refrattario, che vada a riprodurre esattamente la forma degli stessi a seguito di un suo processo di indurimento [1].

Questa tecnologia viene ampiamente usata laddove si necessiti di produrre oggetti con forme complicate, che abbiano un'ottima finitura superficiale, riuscendo contemporaneamente a mantenere delle buone tolleranze dimensionali. Il campo di utilizzo è molto vasto, dalla fabbricazione di componenti per automobili all'odontoiatria, dalla produzione di palette di turbine al settore orafa [2]. Unitamente a questo, il processo di microfusione a cera persa permette anche di ottenere una certa flessibilità in termini di forme riproducibili, ma anche di giungere a manufatti che non richiedono costose operazioni successive di lavorazione [1].

A seguito di queste ragioni è ben comprensibile come questo processo sia fondamentale nel campo dell'oreficeria, dove si rendono necessarie caratteristiche come finitura superficiale, complessità e stabilità dimensionale. Questo rappresenta dunque un ottimo punto di partenza nella produzione di gioielli, dove però, per poter giungere ad un risultato finale ottimale, è necessario avere un buon controllo di tutti i passaggi di cui il processo consta, poiché ognuno di essi contribuisce a garantire la qualità del prodotto finito.

È importante considerare inoltre che nel corso degli anni, il settore orafa ha intrapreso degli importanti cambiamenti nel processo produttivo che hanno visto il superamento di alcuni aspetti tradizionali, lasciando spazio all'innovazione sia in termini di materiali e geometrie, sia in termini di tecnologie e parametri di processo utilizzati [1].

La sequenza di operazioni che caratterizza un tipico processo di microfusione a cera a persa è quello riportato in Figura 1.

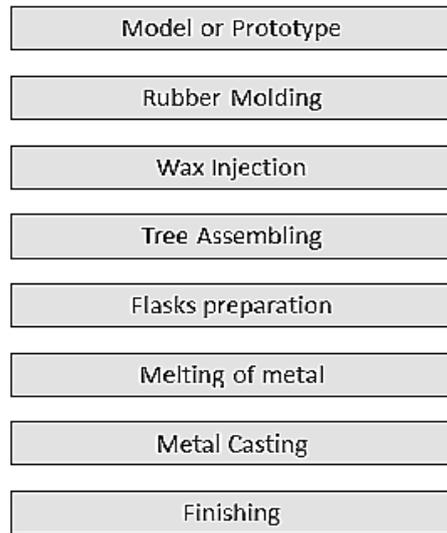


Figura 1: Tipici passaggi di un processo di microfusione a cera persa [1]

Si parte da un modello o prototipo che riproduce il pezzo che si vuole realizzare. Già in questo primo passaggio la tecnologia ha permesso di apportare un grande miglioramento sia del processo che della forma dell'oggetto. Il modello infatti, che prima era possibile realizzare solo manualmente, ora viene creato a partire da un disegno CAD; successivamente questo viene elaborato da una stampante 3D che realizza l'oggetto, indicato come prototipo (si parla di prototipazione rapida (RP)). È intuitivo comprendere il notevole vantaggio che questo aspetto ha portato nel campo della gioielleria dal punto di vista delle geometrie riproducibili.

I materiali che generalmente vengono usati per la produzione del modello sono cere, metalli o resina (RP). In particolare con il termine cere si indicano quelle sostanze organiche, naturali o sintetiche, che abbiano un comportamento simile alla cera propriamente detta, ovvero che si trovino allo stato solido a temperatura ambiente, ma che passino a quello liquido a temperature relativamente basse (40-90°C). In ambito orafa, i materiali maggiormente usati sono delle miscele che hanno come base la paraffina, unita a polimeri sintetici o resine naturali, combinati al fine di ottenere le proprietà desiderate.

Creare il modello principale vuol dire però includere nel disegno, sia che esso venga fatto manualmente sia che venga creato virtualmente, non solo l'oggetto finale, ma anche

l'intero sistema di alimentazione. La sua struttura infatti, ha un ruolo fondamentale per la qualità finale del pezzo. Questo aspetto verrà approfondito più avanti.

Il secondo passaggio è la formazione di uno stampo di cui si necessita per poter produrre più copie dello stesso pezzo. Questo è possibile realizzarlo inserendo il modello iniziale in una gomma che viene fatta vulcanizzare grazie ad una pressa a caldo. La gomma viene poi tagliata generalmente a metà, in modo da estrarre il modello e rendere possibile la riproduzione dello stesso tramite successive iniezioni di cera.

Bisogna porre attenzione ad un aspetto fondamentale: il modello iniziale deve avere un alto livello di finitura superficiale in modo che i difetti non vengano riportati sulla gomma e quindi sui pezzi.

Tradizionalmente lo stampo veniva prodotto in gomma naturale, mentre ora vengono utilizzate gomme siliconiche, polimeri basati su legami Si-O-Si, che danno flessibilità al materiale e soffrono meno di invecchiamento. Un motivo fondamentale inoltre per cui questo tipo di gomme viene favorito rispetto a quelle naturali è la maggiore accuratezza nel riprodurre i dettagli del pezzo in questione [1, 3].

Si passa poi alla terza fase ovvero l'iniezione della cera nello stampo di gomma. Questo passaggio prevede una preliminare eliminazione di aria all'interno dello stampo per evitare la formazione di bolle. È importante che il materiale non subisca un eccessivo ritiro: per sopperire a questo problema, il disegno CAD del modello viene sovradimensionato in relazione alle caratteristiche delle cere utilizzate.

Dopo che la cera si è raffreddata, lo stampo viene tagliato con un bisturi in modo da poter estrarre il pezzo, e lasciare lo spazio per una nuova iniezione. Si potranno così produrre molte copie dello stesso oggetto.

Una volta realizzati più elementi, questi devono essere fissati su un albero, costituito anch'esso in cera. È importante la disposizione con la quale vengono attaccate le varie parti poiché andranno a determinare la fluidodinamica del metallo durante la fase di colata. Per evitare eccessive turbolenze, l'albero ha una base conica che favorisce la condizione ottimale per la successiva immissione del metallo fluido [3].

L'albero deve essere poi ricoperto di materiale refrattario: questa operazione può essere eseguita in due modi. Nel primo caso (*shell mold*) l'albero viene immerso in una o più vasche, contenenti la miscela refrattaria, in modo da creare uno strato sottile intorno ai pezzi. La granulometria del materiale ceramico utilizzato cresce progressivamente

lungo le diverse vasche in modo da garantire una finitura superficiale maggiore del pezzo con il primo strato, ma assicurare allo stesso tempo uno spessore esterno tale da sopportare lo shock termico dovuto alla colata [2, 4].

Nel secondo caso (*block mold*) invece si fa uso di un contenitore cilindrico, generalmente in acciaio inossidabile, in cui viene inserito l'intero albero: questo viene poi riempito della miscela refrattaria e sottoposto a vibrazioni per eliminare eventuali bolle di aria presenti [2].

Cera e materiale refrattario vengono sottoposti ad un ciclo termico che permette prima un indurimento del calco e poi lo scioglimento della cera, che viene rimossa dallo stampo per lasciare successivamente spazio al metallo fuso. Dopo il colaggio, una volta che la lega si è solidificata, il materiale refrattario viene rotto o, se possibile, sciolto in acqua e successivamente investito da un getto di acqua in pressione per poter interamente liberare l'albero in metallo.

Seguono operazioni di rimozione dei pezzi dall'albero e dei canali di alimentazione, per poi passare alla rifinitura dei singoli pezzi.

In Figura 2 vengono riportati nello schema i vari passaggi di un generico processo *block mold*.

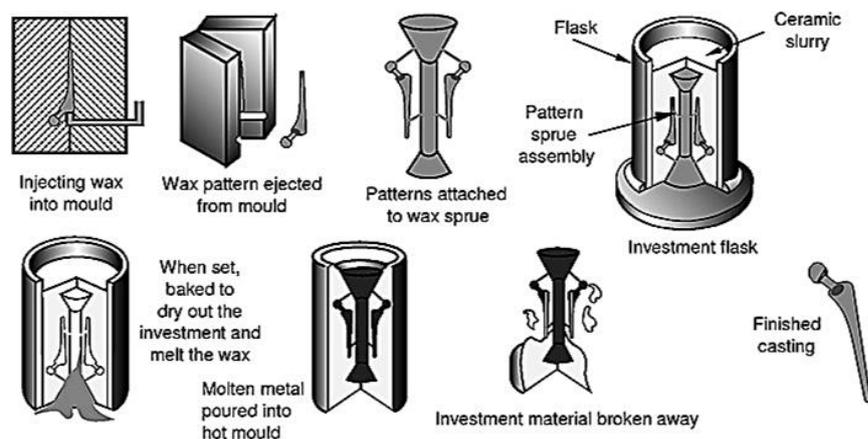


Figura 2: Sequenza dei passaggi caratteristici di un processo di microfusione di tipo *block mold*¹

¹ Immagine tratta da: <https://www.mechanicatech.com/Casting/investmentcasting.html>

1.2 Processo di microfusione a cera persa in oreficeria

Il procedimento finora descritto ha messo in evidenza i passaggi fondamentali che caratterizzano un generico processo di microfusione a cera persa, utilizzabile in diversi settori.

Per poter introdurre il lavoro svolto più avanti, viene ora analizzato, in modo più specifico, il processo utilizzato nel settore orafa.

1.2.1 Creazione del modello

La produzione di un gioiello è caratterizzata da molti passaggi, primo fra tutti la creazione del suo modello.

Tradizionalmente si partiva da un disegno dell'oggetto su cui ci si basava per creare il pezzo: questo doveva essere sottoposto a diverse lavorazioni con macchine utensili prima di poter assumere la forma corretta e voluta, facendo aumentare i costi finali del processo stesso. I tempi di produzione erano molto elevati e i controlli su eventuali problematiche del design potevano essere fatti solo successivamente. Ottimizzare la geometria o crearne nuove e più complicate voleva dire impiegare settimane di lavoro.

Con lo sviluppo della prototipazione rapida si sono potuti apportare diversi vantaggi: le geometrie possibili e l'accuratezza dei particolari hanno subito un netto miglioramento. I tempi di produzione e i costi di lavorazione del modello si sono abbassati, con la possibilità di variare molto facilmente e velocemente il design.

Una tipica catena di processo per la prototipazione rapida è riportata in Figura 3.

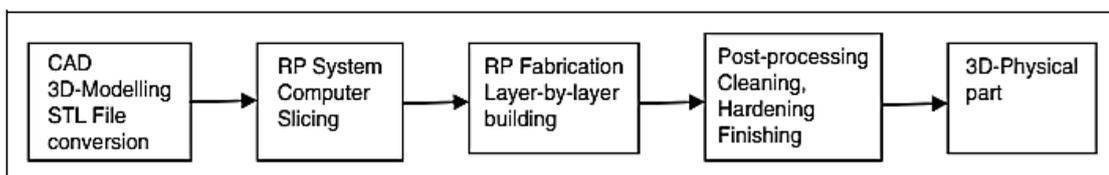


Figura 3: Tipica catena di processo della prototipazione rapida [2].

Si parte da un disegno CAD: ci sono diversi software che permettono di lavorare sul design del pezzo. Una volta che il gioiello è stato disegnato, si completa il modello

tracciando il sistema di alimentazione. Poter variare facilmente quest'ultimo è un vantaggio notevole, in quanto permette di ottimizzare, in tempi brevi, eventuali problematiche, come porosità o ritiri, strettamente legate allo stesso.

Una volta ottenuto il modello tridimensionale, questo viene convertito in un file STL e suddiviso in strati bidimensionali dal sistema di prototipazione rapida, in modo che strato dopo strato possa essere ricostruito dalla stampante 3D. Il file viene poi mandato in stampa.

Per creare i pezzi da assemblare poi in un unico albero, vengono tradizionalmente utilizzate due tecniche diverse.

Nel primo caso si producono tutti i pezzi a partire da stampante 3D: questi sono costituiti generalmente da cere o resine, e vengono costruite sfruttando del materiale di supporto necessario per la loro stampa. Quest'ultimo, ben distinguibile dal pezzo vero e proprio, va adeguatamente rimosso, in modo da lasciare unicamente il modello con il suo sistema di alimentazione, che verrà poi montato sull'albero.

In Figura 4 vengono riportati esempi di modelli in resina (a) e in cera (b), costruiti rispettivamente tramite tecnologia SLA e MJP. Si possono notare gli elementi di supporto: nel primo caso si tratta di linee verticali dello stesso materiale del pezzo, mentre nel secondo la differenza è ben più netta, avendo i due elementi un colore diverso. Nel caso a la rimozione avverrà in maniera manuale, mentre nel caso b il supporto (in bianco) verrà sciolto in opportuni solventi.

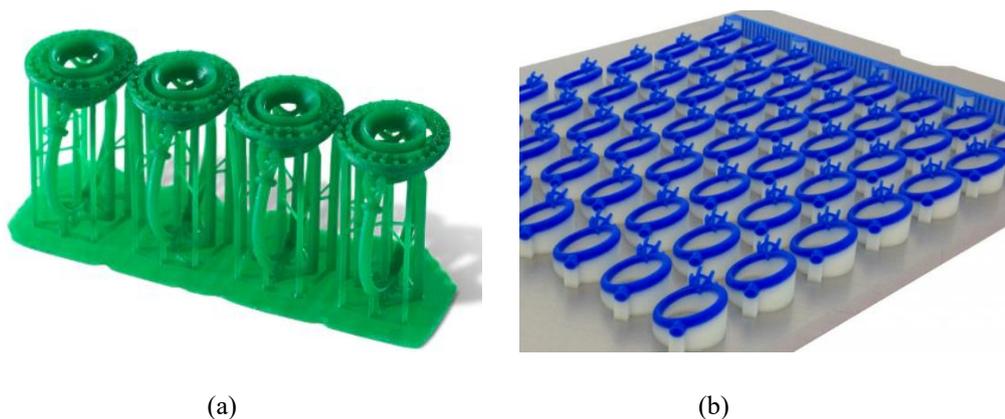


Figura 4: Modelli in resina (a) e in cera (b) con i loro supporti²

² Immagini tratte da <https://prototek.it/>

Il secondo modo per produrre un certo numero di pezzi è quello di creare un modello in metallo, tradizionalmente definito come GIT, che, inserito all'interno di una gomma, permette la formazione dello stampo che servirà alla riproduzione degli oggetti in cera. Si parte sempre da un modello da stampa 3D, si procede con il normale processo di colata e si preleva il pezzo in lega dall'albero. Prima di essere utilizzato come modello è necessario che questo venga rifinito in modo da eliminare eventuali segni della costruzione strato per strato. Quest'ultimo viene inserito all'interno della gomma che deve ancora subire vulcanizzazione.

Sono diverse le tipologie di gomme che posso essere utilizzate per replicare i pezzi. Come precedentemente riportato, tradizionalmente venivano adottate quelle naturali, mentre ora si prediligono le gomme siliconiche. Quest'ultime, a seguito di vulcanizzazione, creano dei legami Si-O-Si che danno resistenza allo stampo; rispetto alle prime queste hanno una maggiore flessibilità e soffrono meno di invecchiamento. Le gomme siliconiche possono essere ulteriormente suddivise in base alla temperatura a cui avviene la vulcanizzazione: alcune possono essere mantenute a temperatura ambiente, mentre altre necessitano di essere inserite all'interno di un vulcanizzatore dove si raggiungono anche 200°C.

Come si è già sottolineato, le gomme, così come le cere e le leghe metalliche, subiscono un ritiro durante la fase di raffreddamento che sarà caratteristico per ciascun materiale. Per poter garantire le giuste dimensioni richieste al pezzo finale, in fase di progettazione, le cere e i metalli vengono sovradimensionati in modo da tener conto di questo aspetto, in relazione alle proprie caratteristiche.

Indipendentemente dal metodo utilizzato per creare i pezzi bisogna porre particolare attenzione ai possibili difetti che possono generarsi in questa fase; va sottolineato infatti che il metallo che verrà colato, riporterà tutte le imperfezioni che il modello in cera o resina hanno lasciato nel materiale refrattario.

Nel caso si utilizzino stampi in gomma, particolare attenzione va posta ad eccessivi ritiri, alla formazione di bolle d'aria all'interno dello stampo, mancati riempimenti e superficie non ben definita. Per poter evitare la generazione di questi difetti, oltre a studiare un sistema di alimentazione che permetta il completo riempimento dello stampo, lo scioglimento della cera e la sua iniezione avvengono sotto vuoto. Oltre la pressione con cui avviene il riempimento, anche la temperatura della cera, così come quella della gomma, hanno un ruolo nella qualità finale del modello. Una temperatura troppo alta può

portare cera e stampo ad attaccarsi tra loro, a creare bolle d'aria o a generare un sovrariempimento; se troppo bassa invece è molto probabile che lo stampo non venga totalmente riempito.

In Figura 5 viene riportato un tipico difetto dovuto al ritiro della cera. Sulla testa del pezzo si può notare un leggero avvallamento nella parte centrale che si ripropone poi nella stessa zona dell'oggetto in metallo.

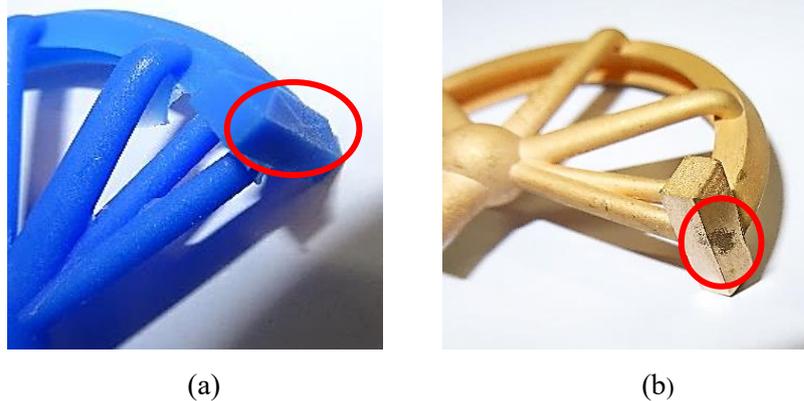


Figura 5: Tipico difetto da ritiro della cera (a) che si ripropone sul pezzo in metallo (b).

Un difetto che invece può caratterizzare le cere provenienti da stampa 3D è una scarsa finitura superficiale. A seconda della stampante usata e della qualità che questa può raggiungere, è possibile notare ad occhio nudo i segni della costruzione del pezzo strato per strato. Per poterli eliminare, i pezzi possono essere sottoposti a processi di burattatura prima di passare alla lavorazione ai banchi, oppure direttamente lavorati dalle mani degli orafi che attraverso operazione di smerigliatura riescono ad uniformarne la superficie.

In Figura 6 viene riportato lo stesso pezzo della Figura 5, ma questa volta prodotto da una stampante 3D in cui i segni di costruzione sono evidenti.

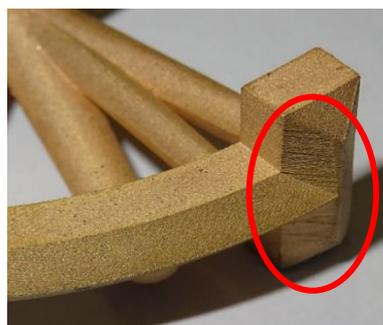
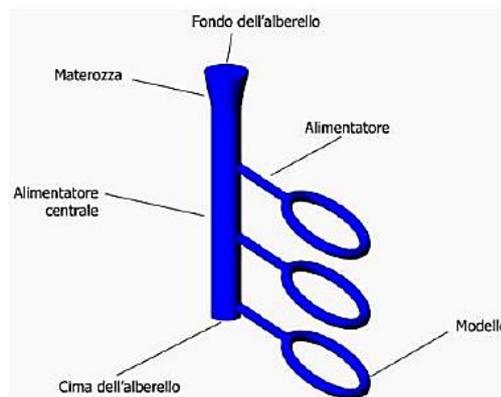


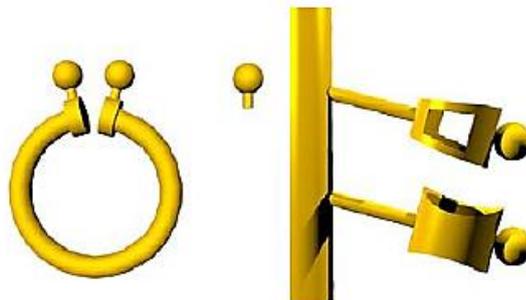
Figura 6: Possibile difetto di un pezzo prodotto da stampa 3D.

Una volta creati molti pezzi, questi vengono montati su un albero in cera che costituirà il canale principale di alimentazione del metallo fuso (*main sprue*). È importante porre attenzione alla disposizione dei pezzi: questi devono essere attaccati attraverso dei canali più piccoli, inclinati in modo che il materiale defluisca in maniera regolare durante la fusione della cera. La geometria di alimentazione deve inoltre garantire il completo riempimento ed evitare la generazione di turbolenze nel flusso in entrata. Il canale centrale deve essere l'ultimo a solidificare in modo da compensare il ritiro del metallo nei singoli pezzi: una solidificazione direzionale evita la generazione di porosità.



*Figura 7: Schema della disposizione dei pezzi rispetto al canale principale*³

Si può rendere necessario inoltre inserire delle riserve di metallo che vadano a solidificare dopo il modello, evitando un rapido raffreddamento dello stesso in zone critiche e limitando così la possibilità di generazione di porosità.



*Figura 8: Esempi di disposizione delle riserve di metallo sul pezzo*⁴

³ Immagine tratta da: Actis Grande M.: Dispense del corso di Metal Forming Technologies

⁴ Immagine tratta da: Actis Grande M.: Dispense del corso di Metal Forming Technologies

La distanza tra i vari pezzi influisce sulle qualità del prodotto finale: se si trovano troppo vicini gli uni agli altri, si rischia che la temperatura in quelle zone sia troppo alta e che quel calore non venga smaltito correttamente. Si può arrivare anche alla decomposizione del gesso, con produzione di gas e una peggiore rifinitura superficiale.

Inoltre, se in un albero, si montano pezzi con geometrie diverse, è opportuno fissare gli oggetti più sottili alla testa dell'albero, dove la pressione risulta maggiore, garantendo così un loro corretto riempimento.

Bisogna però considerare che nella catena di produzione non sempre è possibile soddisfare queste regole, in quanto il numero di pezzi che devono essere garantiti giornalmente è elevato. Un'analisi più dettagliata verrà fatta successivamente.

1.2.2 Materiale refrattario

Una volta che l'albero con i vari pezzi in cera è stato assemblato, è necessario ricoprirlo con del materiale che permetta di riprodurre esattamente la geometria degli stessi. Per creare un rivestimento con le giuste caratteristiche si parte da una miscela di polveri costituita principalmente da due materiali che hanno funzioni differenti: uno di legante e uno di refrattario. Mescolando la polvere con acqua si crea una sospensione con una consistenza tale da ricoprire ogni zona del modello in cera. Successivamente, una volta riempito il cilindro con essa, questo viene sottoposto ad un ciclo termico che permette di aumentare le sue caratteristiche meccaniche, necessarie per sostenere la successiva fase di colaggio del metallo. Le caratteristiche del ricoprimento sono un aspetto fondamentale nella determinazione della finitura superficiale dell'oggetto: la generazione di possibili difetti si va a riproporre poi sui pezzi prodotti.

L'industria orafa impiega maggiormente come rivestimento una miscela costituita principalmente da solfato di calcio emiidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) come elemento legante, da silice come refrattario, sotto forma di α -cristobalite e α -quarzo, e da alcuni additivi, utili a migliorare le proprietà meccaniche dello stesso. Il basso costo di questa miscela rispetto ad altre utilizzate come rivestimento nel processo di microfusione a cera persa, unitamente alle adeguate proprietà termiche che la rendono idonea per le leghe prodotte, ne giustifica l'ampio utilizzo nel campo della gioielleria [5, 6].

A seguito di idratazione il solfato di calcio emiidrato si trasforma nel comune gesso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, da cui esso stesso deriva a seguito di calcinazione. Il sistema viene lasciato riposare per 3-4 ore a temperatura ambiente. Durante questo tempo, avendo il solfato di calcio biidrato una bassa solubilità, si genera una soluzione sovrasatura e il gesso precipita sotto forma di cristalli aghiformi che fanno acquistare resistenza meccanica alla miscela.



Figura 9: Cilindri riempiti con miscela gesso-silice.

Dopo un periodo riposo i cilindri vengono sottoposti ad un ciclo termico durante il quale, oltre l'eliminazione della cera per suo scioglimento, viene allontanata l'umidità residua, i cristalli di $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ perdono acqua trasformandosi in anidrite CaSO_4 , e le due forme polimorfe della silice subiscono una trasformazione di fase, a due diverse temperature come mostrato in Figura 10.

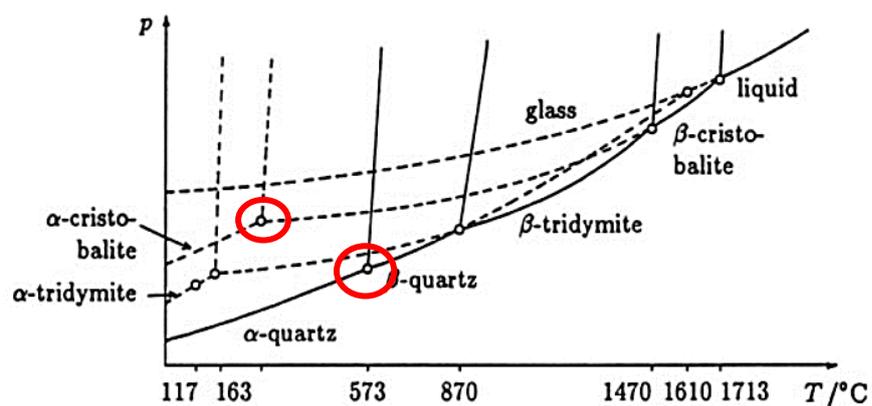


Figura 10: Diagramma P-T di trasformazione della silice nelle sue diverse forme. Le linee tratteggiate sono trasformazioni non di equilibrio⁵

⁵ Immagine tratta da: <http://www.chimdocet.it/solido/file3c.htm>

Altro aspetto su cui soffermarsi è l'espansione termica dei materiali. Il gesso durante il trattamento termico diventa anidrite: il ritiro legato alla perdita delle molecole d'acqua può portare alla generazione di pori che hanno un'elevata influenza sulle proprietà meccaniche del rivestimento e sulla sua permeabilità. Se il rivestimento fosse costituito solo da esso, potrebbe spaccarsi. L'utilizzo della silice come materiale refrattario permette di compensare questa variazione di volume e di stabilizzare il materiale del ricoprimento, garantendo un'adeguata resistenza durante il ciclo termico. Essa infatti, presente come quarzo e cristobalite, entrambe in forma α nella polvere iniziale, subisce delle trasformazioni di fase durante il ciclo termico che comportano un aumento di volume.

Come si nota dal grafico riportato in Figura 10 entrambe le forme a disposizione transiscono dalla loro forma alfa a quella beta, a diverse temperature: la cristobalite intorno a 250 °C e il quarzo intorno a 570 °C. Uno studio più approfondito sulle variazioni volumetriche che interessano lo stampo è stato portato avanti da Philip J.Horton in [7]. In particolare si è posta attenzione al fatto che, se durante il riscaldamento l'espansione della silice e il ritiro del gesso si compensano, durante il raffreddamento i due effetti si sommano, in quanto le trasformazioni del refrattario sono reversibili. È necessario quindi che il rivestimento venga mantenuto ad una temperatura elevata affinché durante la colata del metallo fuso non subisca uno shock termico che possa indurre una sua eventuale rottura. Inoltre mantenere una temperatura elevata permette di non far avvenire le trasformazioni della silice, dalle forme beta a quelle alfa, accompagnate in questo caso da un forte ritiro che comprometterebbe la stabilità dello stampo. Questo spiega anche perché uno stampo non può essere sottoposto a ciclo termico, raffreddato fino a temperatura ambiente e poi essere scaldato nuovamente prima di una colata: sarebbe troppo fragile [5, 7].

Si riporta in Figura 11 un grafico ricavato dallo studio di Faccenda e Condò in [3], dove si mostra l'espansione termica (%) subita dalle varie forme di silice in funzione della temperatura.

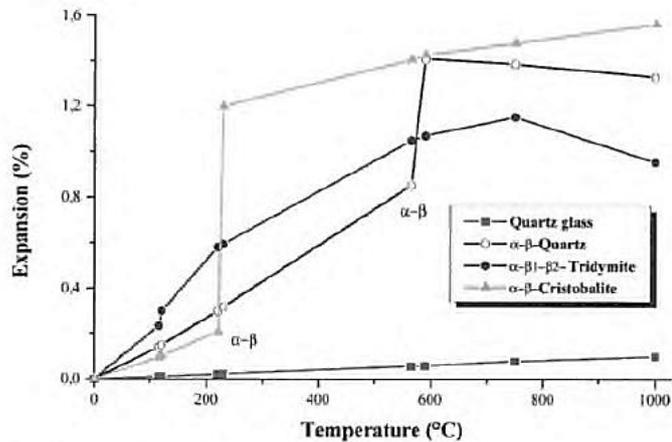
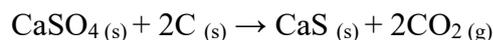


Figura 11: Espansione termica delle differenti fasi della silice [3].

È importante che il calore raggiunto durante il ciclo termico possa eliminare eventuali residui di cera, che potrebbero reagire con il gesso, portando alla formazione di porosità gassose vicino alla superficie del gioiello. Va comunque limitata la temperatura raggiunta in quanto, se eccessiva, si possono innescare reazioni di decomposizione termica con generazione di ulteriori elementi gassosi che possono rimanere intrappolati nel rivestimento e creare difetti sul prodotto finale.

Utilizzando nell'industria orafa una miscela costituita principalmente da gesso, questo può andare incontro alla formazione di SO_2 e SO_3 a temperature superiori ai 900°C [5].

È possibile inoltre che a temperature più basse, si possa verificare una reazione del gesso con i residui carboniosi derivanti dalla cera se non sono stati correttamente eliminati, secondo la seguente reazione [5].



In generale, qualsiasi sia la miscela utilizzata come refrattario, bisogna conoscere bene le trasformazioni a cui questa può incorrere con il variare della temperatura. Questo

permetterà di ottimizzare il ciclo di cottura dei cilindri, in modo da non incorrere in decomposizioni con scarsa qualità finale del prodotto.

1.2.3 Processo di colata

Il processo di colata rappresenta un altro passaggio importante per la qualità del prodotto finale: controllare i diversi parametri che lo caratterizzano è necessario per giungere alla produzione di oggetti che abbiano caratteristiche idonee per essere mandati avanti nella produzione.

I materiali che vengono utilizzati per la produzione di gioielli sono delle leghe preziose. Vengono forniti generalmente i metalli da legare sotto forma di granulato, mentre l'oro viene aggiunto come lastre: devono essere pesati nelle giuste proporzioni per poter creare la composizione richiesta.

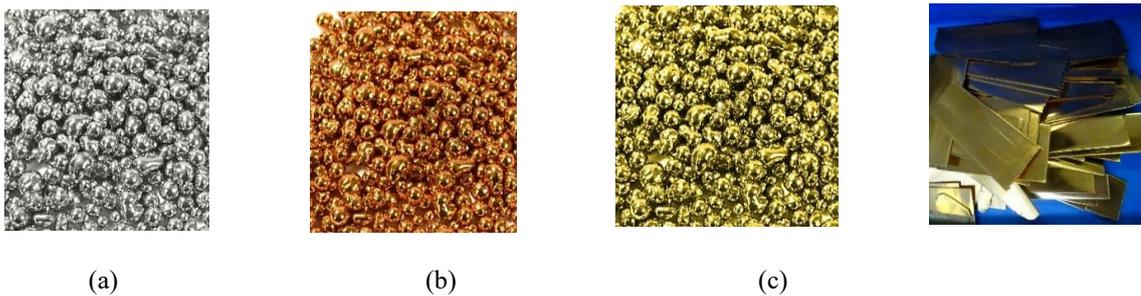


Figura 12: Granulati (a,b,c) e lastre di oro puro (d) per formare le diverse leghe.

Per poter garantire però la qualità di un prodotto è necessario che venga innanzitutto assicurata una minima quantità di oro presente nella lega: con il termine “carato” (kt) si indica la purezza della stessa considerando 1kt come indicazione di una parte di oro su 24.

In commercio sono molto diffuse le leghe 18 kt, dove si garantisce una quantità di 750 grammi di oro su 1000 g totali.

In Figura 13 viene riportato il diagramma ternario Au-Ag-Cu in cui sono indicati i campi di colore al variare della composizione. Viene messa in evidenza la quantità minima di oro per avere leghe 10 K, 14 K e 18 K.

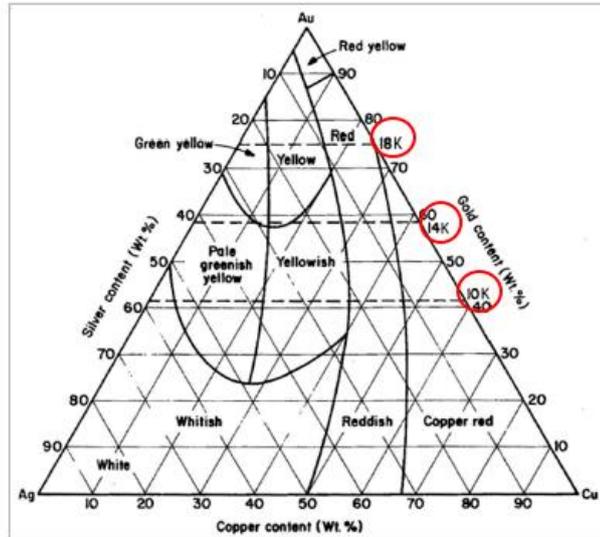


Figura 13: Diagramma ternario Au-Ag-Cu [8]

La fusione della lega e la sua omogeneizzazione avvengono in un forno che sfrutta l'effetto Joule: l'induzione elettromagnetica genera un flusso di corrente nel metallo, questo agisce come resistenza e si fonde grazie alla generazione di calore. Lo schema di funzionamento viene riportato in Figura 14.

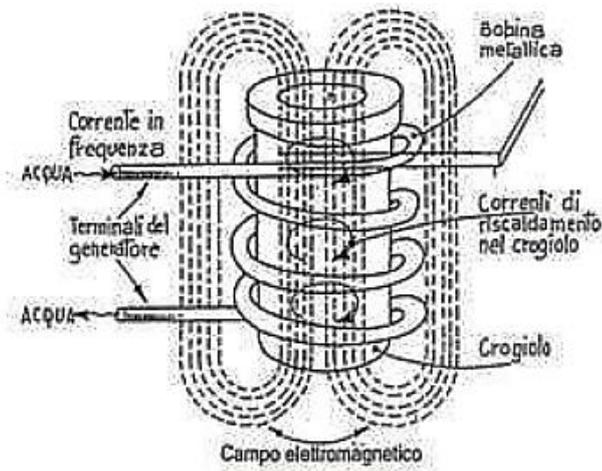


Figura 14: Schema funzionamento del forno per fusione della lega⁶

⁶ Immagine tratta da: Actis Grande M.: Dispense del corso di Metal Forming Technologies

Ci sono due modalità di colata possibili, quella verticale e quella centrifuga. Nella maggior parte dei casi, come per le leghe di oro, viene utilizzata la prima; la seconda è più indicata per materiali come Titanio e Platino.

Dopo aver inserito il cilindro caldo nel forno, e una volta che la lega risulta fusa omogeneamente, inizia la fase di colaggio vera e propria. In questa fase si applica il vuoto nelle camere contenenti stampo e metallo per evitare l'ossidazione dello stesso, e si inserisce una sovrappressione per favorire lo svuotamento del crogiolo.

Una volta avvenuta la colata, i cilindri vengono fatti raffreddare in atmosfera inerte per qualche minuto; successivamente, se si tratta della lega in oro rosso lo stampo viene immerso direttamente in acqua, se invece si tratta di lega in oro bianco o giallo i cilindri vengono fatti raffreddare in aria per 5-10 minuti e poi immersi in acqua. Questo passaggio, oltre che far raffreddare il cilindro permette di far sciogliere gran parte del gesso. Eventuali residui vengono eliminati con un getto d'acqua ad alta pressione.

In Figura 15 viene riportata il diagramma di fase binario Au-Cu: questo sistema è un caso di completa miscibilità tra i due elementi. A temperatura basse però, considerando la percentuale di Cu presente nella lega di oro rosso, si formano fasi intermetalliche che la rendono fragile. Questo spiega perché, non appena il cilindro contenente questa composizione viene estratto dal forno di fusione, deve essere raffreddato velocemente in acqua. Si impone così un raffreddamento talmente rapido, da bloccare il sistema in una condizione metastabile della soluzione solida del sistema Au-Cu.

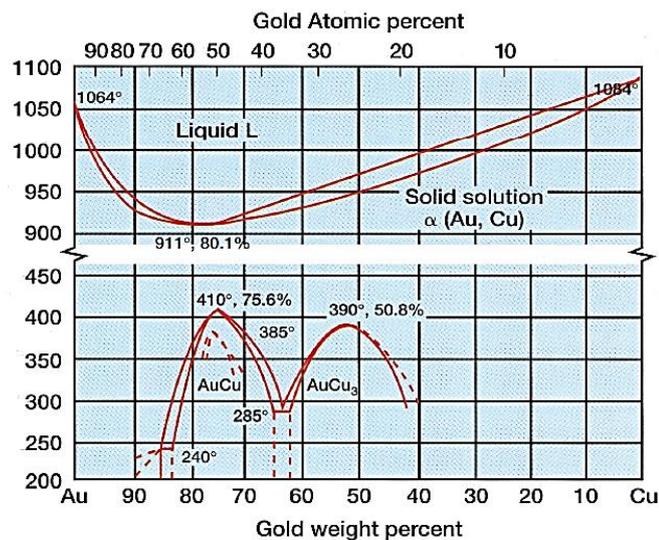


Figura 15: Diagramma di fase binario Au-Cu [8]

1.2.4 Operazioni successive

I singoli pezzi devono essere successivamente separati dal canale principale di alimentazione, attraverso un'operazione detta di spiantatura.

Per poter eliminare o almeno ridurre i difetti più evidenti derivanti dalla stampa 3D che sono stati già illustrati in Figura 9, è possibile prima sottoporre i pezzi ad operazioni di burattatura ad umido o a secco, grazie alle quali la superficie assume un aspetto più omogeneo. I tempi e i passaggi a cui devono essere sottoposti i gioielli vanno valutati di volta in volta a seconda dell'evidenza degli strati derivanti dalla costruzione strato per strato, e della geometria del pezzo.

I gioielli devono poi passare nelle mani degli orafi che con la loro esperienza sono in grado di valorizzarli e rifinirli. In questa fase i pezzi vengono assemblati, se sono costituiti da vari elementi, e vengono sottoposti ad operazioni di rifinitura come la smerigliatura, che portano ad una finitura superficiale del gioiello più elevata.

Se previste sono presenti delle sedi per l'inserimento delle pietre: in questo caso i pezzi devono essere incassati per mano di orafi specializzati in questo campo. È un lavoro di precisione, che può essere facilitato con l'utilizzo di mascherine appositamente costruite per il pezzo.

Da qui possono seguire diverse operazioni a seconda del tipo di modello. Si può ricorrere ad esempio ad un'elettrolucidatura, grazie alla quale si opera una rimozione controllata del metallo dalla superficie, abbassando la rugosità della superficie e rendendola più liscia e quindi più lucida. La stessa operazione può essere eseguita attraverso pulitura meccanica per opera degli orafi: i tempi per ottenere lo stesso risultato sono però maggiori.

Nel caso si utilizzi dell'oro bianco i pezzi vengono sottoposti ad un trattamento di rodiatura, ovvero un processo galvanico che si basa sul principio dell'elettrodeposizione. Mediante elettrolisi di un sale è possibile ricoprire il pezzo con uno strato sottile di rodio che dona brillantezza alla lega e quindi al gioiello.

Le operazioni per poter giungere al pezzo finale sono dunque molte e di volta in volta, a seconda della geometria del pezzo e del materiale usato, è necessario analizzare quale sia la soluzione migliore. Ogni passaggio contribuisce alla qualità finale del gioiello.

Capitolo 2 - Impianto di microfusione a cera persa in Mattioli

2.1 Specifiche aziendali di processo

Dopo aver descritto in modo più dettagliato il processo di colaggio a cera persa adottato in campo orafa, vengono ora riportate le specifiche dello stesso in Mattioli, in modo da avere un quadro esatto delle condizioni con cui si è effettivamente lavorato.

2.1.1 Creazione del modello

Per poter creare il modello in passato ci si basava su un disegno del gioiello: a seguito di lavorazioni e operazioni di finitura si poteva giungere al pezzo finale da usare poi per la riproduzione dello stesso. Oggi invece, come già ricordato, si fa uso di software che permettono la creazione di modelli tridimensionali.

In particolare, in azienda, si è lavorato con *Rhinoceros 6*, comunemente chiamato *Rhino*. Questo software viene utilizzato generalmente per l'architettura, disegno industriale ma anche per il design automobilistico, design del gioiello, per CAD/CAM e quindi anche per la prototipazione rapida. Tramite il suo utilizzo è possibile creare modelli 3D di superfici, che vengono utilizzati poi, in questo caso, per la creazione di pezzi da stampante 3D. In figura 16 viene riportato un disegno CAD di un anello nelle 4 viste. Vengono evidenziati il modello vero e proprio dal sistema di alimentazione (verde).

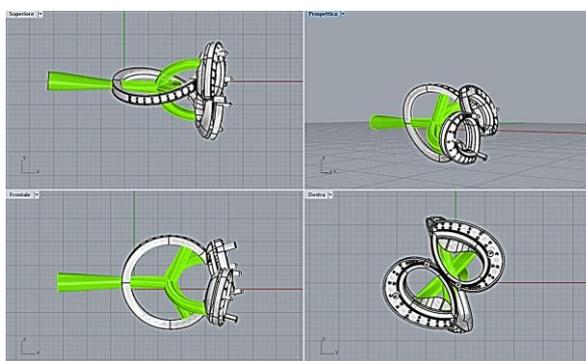


Figura 16: Disegno CAD di un gioiello su Rhinoceros nelle 4 viste. In verde viene evidenziato il sistema di alimentazione.

Il file viene poi convertito in formato STL (*Standard Triangulation Language To Layer*) in cui le superfici dell'oggetto vengono decomposte in elementi triangolari: più elevato sarà il loro numero, maggiore sarà l'approssimazione della superficie stessa. Questo viene poi inviato alla stampante 3D, che dopo averlo elaborato crea il modello in cera.

Come stampante viene utilizzata il modello *ProJet MJP 2500W* prodotta da *3D SYSTEMS*. In questo caso, per la creazione dei pezzi, si sfrutta la tecnologia *MultiJet Printing (MJP)* ovvero un processo a getto d'inchiostro: la deposizione strato dopo strato di una resina plastica fotopolimerizzabile o materiale di stampaggio a cera è affidata ad una testina di stampa. È molto indicata per modelli con dettagli particolareggiati, come i gioielli. Queste stampante può offrire lungo l'asse Z (spessore dello strato) una risoluzione fino a 16 micron [9].

Per creare un certo numero di pezzi in cera che verranno assemblati su un albero, vengono utilizzate le due tecniche già illustrate nel capitolo precedente.

Nel primo caso si stampano tutti i pezzi da stampante 3D: non si opera con resine ma solamente con cere. Quest'ultime vengono fornite direttamente dal produttore della stampante: si tratta di una cera paraffinica per il pezzo e di una cera idrossilata per il supporto. Quest'ultimo infatti, per essere separato, viene sciolto in recipienti posti su piastre riscaldanti, con all'interno alcool isopropilico ad una temperatura di circa 38°C, e mantenuto in queste condizioni per un tempo che dipende dalla quantità di supporto presente. Questo rappresenta un notevole vantaggio per la produzione di modelli con cavità complesse, per le quali la rimozione del supporto rimane molto semplice.



(a)



(b)

Figura 17: Cere provenienti da stampante 3D con supporto (in bianco) (a) e piastre riscaldanti usate per lo scioglimento del supporto (b)

Nel secondo caso invece, dopo aver prodotto il GIT ed averlo inserito nello stampo in gomma, si fa avvenire la vulcanizzazione di quest'ultima, si libera il modello e poi si inietta la cera fusa per la riproduzione dei pezzi. Bisogna tener presente che il GIT deve essere sovradimensionato in modo da tener conto dei ritiri che cera e gomma subiscono durante il raffreddamento.

In azienda per questa operazione viene utilizzata la *Cera Flessibile Estrusa* di colore blu prodotta da *Riacetech*. Essa è un prodotto che presenta un buon compromesso tra fluidità e flessibilità, adattabile quindi a diverse tipologie di oggetti. La temperatura di iniezione è di 72-74°C. Lo scioglimento della cera avviene in sottovuoto continuo, e per evitare che si generino bolle, anche l'iniezione avviene solo dopo aver eliminato aria dallo stampo in gomma.



Figura 18: Iniettore cera utilizzato in azienda

In questo ultimo caso si ha il vantaggio di avere un costo minore per il singolo oggetto in cera, ma la tecnica è limitata in termini di geometrie producibili, sia per quanto riguarda il pezzo sia per il sistema di alimentazione, che in alcuni casi può risultare difficoltoso da estrarre dalla gomma. Il secondo invece ha un costo delle cere maggiore, ma a livello di geometrie, non ci sono limiti.

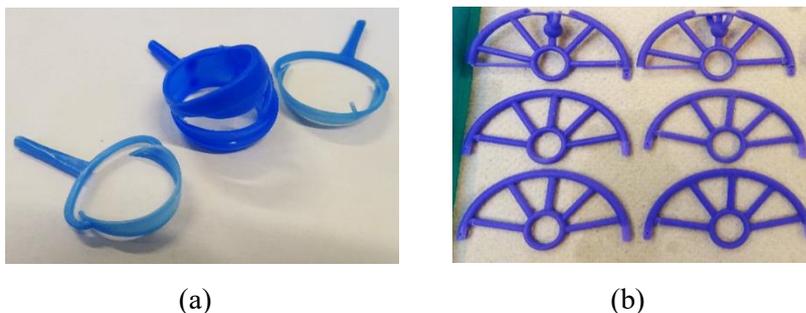


Figura 19: Cere utilizzate per la creazione dei pezzi. a) Cera iniettata nello stampo di gomma. b) Cera proveniente da stampante 3D, dopo lo scioglimento del supporto.

Per quanto riguarda le gomme utilizzate come stampo ci sono due tipologie disponibili in azienda, una vulcanizza ad alta temperatura, mentre l'altra a temperatura ambiente.

La prima è una gomma siliconica (NICEM nocciola), che viene fornita sotto forma di fogli. Questi devono essere lavorati, sovrapposti tra loro e inseriti in uno stampo metallico fino a raggiungere lo spessore necessario per riempire lo stesso: all'interno viene inserito il modello. Si tratta di una gomma a caldo la cui vulcanizzazione avviene a $T = 90^{\circ}\text{C}$ per un'ora e mezza, sotto la pressione di 1 bar, all'interno di un vulcanizzatore.



Figura 20: Vulcanizzatore utilizzato in azienda.

La seconda utilizzata invece è una gomma siliconica a freddo (GLASS33 DZMODEL). Questa si forma da una miscela bicomponente, in cui base e catalizzatore vengono inseriti in rapporto 1:1. Vulcanizza a temperatura ambiente dopo circa 18 ore.

Ci sono alcune differenze tra le due, tra cui il ritiro subito, che nel caso della gomma a caldo è intorno il 2%, mentre nell'altro circa l'1%. Il grande vantaggio della prima però è quello di poter costruire lo stampo a strati: mettendo del talco su alcuni di essi si impedisce la formazione di un unico blocco, portando ad una più facile estrazione del pezzo. Nel caso della gomma a freddo si può intervenire invece solo con il bisturi, rendendo più difficile l'operazione. La gomma a caldo infine ha anche una durata maggiore. In Figura 21 vengono riportati i due tipi di stampi adottati per lo stesso pezzo: si notino i segni del bisturi nella gomma siliconica a freddo necessari per poter estrarre l'oggetto.



Figura 21: Stampi in gomma vulcanizzata a caldo (sopra) e a freddo (sotto)

Dopo aver prodotto un numero elevato di pezzi, questi vengono montati su degli alberi anch'essi in cera.

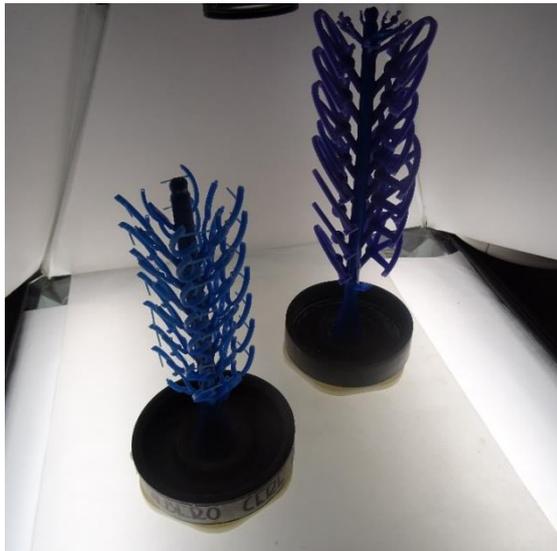


Figura 22: Alberi in cera.

2.1.2 Materiale refrattario

Come ricordato in precedenza le caratteristiche del materiale refrattario sono molto importanti al fine di garantire un'ottima qualità superficiale degli oggetti. Generalmente per la colata di leghe di oro e di argento si utilizza una miscela costituita da un 25-30% di solfato di calcio emiidrato ($2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), che ha la funzione di legante, e un 70-75% di silice nella forma di quarzo e cristobalite, come refrattario vero e proprio, più alcuni additivi [3].

Viene riportata la composizione e la micrografia SEM della polvere iniziale (ULTRA VEST MAX) utilizzata in azienda.

Nome Chimico	Indice-No.	N. CAS	N. CE	Numero di registrazione REACH	Conc. (%wtw)	Classificazione	Fattore M.
Silice cristallina (cristobalite)		14464-46-1	238-455-4		40 - 70%	Xn; R48/20	
Quarzo		14808-60-7	238-878-4		20 - 40%	Xn; R48/20	
Calcium sulfate		26499-65-0			20 - 40%		

Tabella 1: Composizione chimica della miscela fornita dal produttore

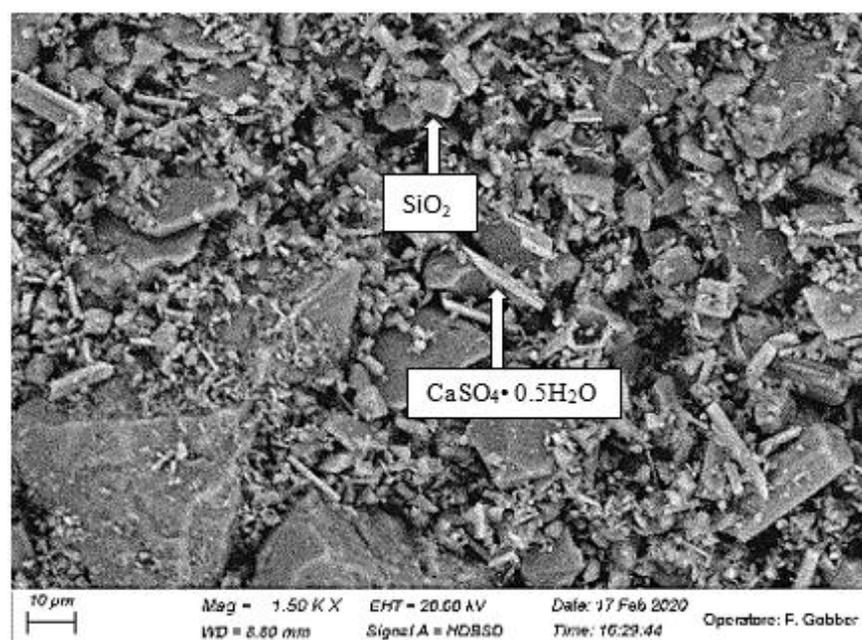


Figura 23: Micrografia SEM della polvere iniziale fornita dal produttore.

Come sottolineato in altri studi [3, 5] le tipiche forme riscontrabili in questa fase sono dei cristalli a blocchi associabili alla SiO_2 , e dei cristalli allungati relativi alle parti di solfato di calcio emiidrato. Sono evidenti entrambi nel caso della miscela in questione.

Questa polvere poi viene miscelata in vuoto con acqua demineralizzata, in proporzioni indicate dal produttore, in modo da evitare l'introduzione di specie ioniche e garantire un'esatta riproducibilità delle condizioni di processo. È necessario raggiungere una fluidità che sia in grado di ricoprire in modo corretto le cere: una volta che si è ottenuta una miscela omogenea si aprono gli ugelli della vasca dove sono inseriti i cilindri con all'interno i modelli in cera in modo che questi vengano interamente riempiti.

In particolare il rapporto polvere/acqua utilizzato in azienda è

$$\frac{\text{Polvere}}{\text{Acqua}} = \frac{2500 \text{ g}}{950 \text{ g}} = 2,63$$

Questo avviene all'interno di un miscelatore che opera sottovuoto in modo che le possibili bolle d'aria che si formano durante la preparazione, vengano eliminate, evitando infragilimenti e imperfezioni delle superfici. Una leggera vibrazione del sistema viene attivata per aiutare tale operazione. In Figura 24 viene riportato il miscelatore utilizzato in azienda.



Figura 24: Miscelatore sottovuoto utilizzato in azienda⁷.

⁷ Immagine tratta da : <https://www.romanoff.com/romanoff-kws-5-flask-investment-mixing-machine.html/>

Durante questa fase il solfato di calcio emiidrato si idrata secondo la seguente reazione:



La solubilità minore del $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ fa sì che questo precipiti molto più facilmente. I cristalli corti e spessi del solfato di calcio della miscela di polvere iniziale (Figura 23), assumono una forma ad aghi e tendono a raggrupparsi creando un aggrovigliamento abbastanza uniforme tra i cristalli di silice.

In Figura 25 viene riportata la micrografia SEM della miscela dopo essere stata mescolata con la quantità d'acqua necessaria. Si può notare la precipitazione di molti cristalli aghiformi, che si intrecciano tra di loro, dando una massa molto compatta e con maggiore resistenza.

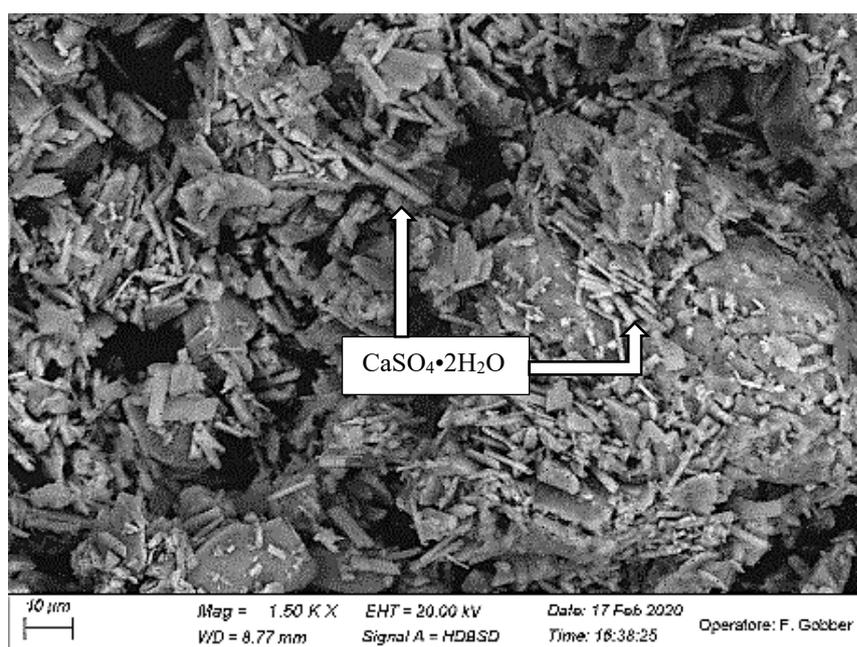


Figura 25: Micrografia SEM della miscela dopo idratazione

Dopo alcune ore di riposo, per permettere al materiale di acquisire resistenza, i cilindri vengono inseriti all'interno dei forni per iniziare il loro ciclo termico. Qui, oltre allo

scioglimento della cera, il calco raggiungerà una maggiore resistenza a seguito di trasformazioni dei suoi componenti.

Il ciclo termico a cui vengono sottoposti i cilindri in azienda è il seguente.

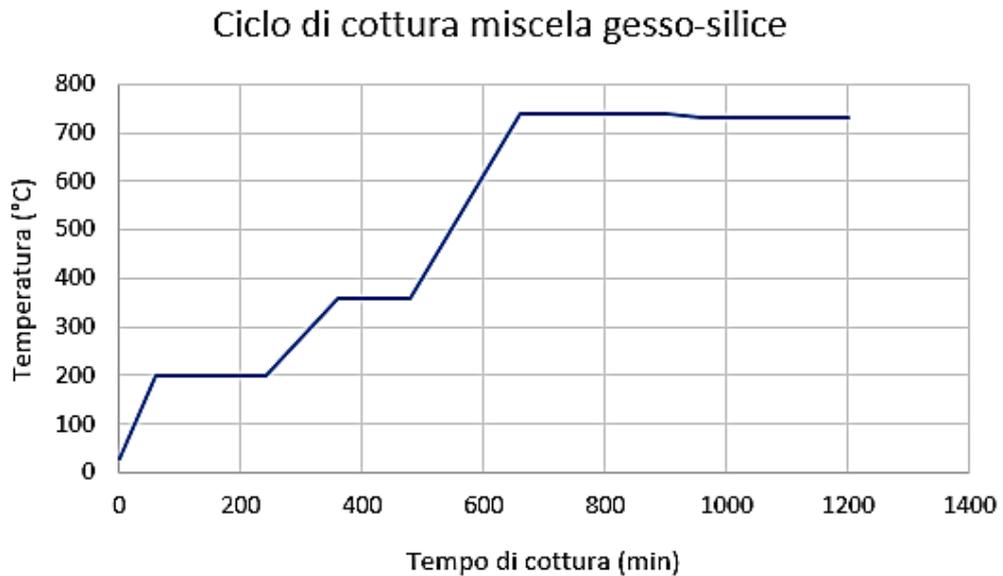


Figura 26: Ciclo di cottura della miscela gesso-silice.

Si parte dal cilindro a temperatura ambiente e poi:

1. raggiungimento di 200°C in 1h;
2. mantenimento a 200°C per 3h;
3. raggiungimento di 360 °C in 2h;
4. mantenimento a 360°C per 2h;
5. raggiungimento di 740°C in 3h;
6. mantenimento a 740°C per 4h;
7. abbassamento di temperatura fino a 730°C in 1h;
8. mantenimento a 730°C fino al momento della colata.

Dopo il ciclo di cottura il solfato di calcio perde la sua quantità di acqua diventando anidrite.

In Figura 27 viene riportata la micrografia SEM della polvere dopo cottura. Si nota come si siano persi i grani di forma allungata, tipici del solfato di calcio biidrato.

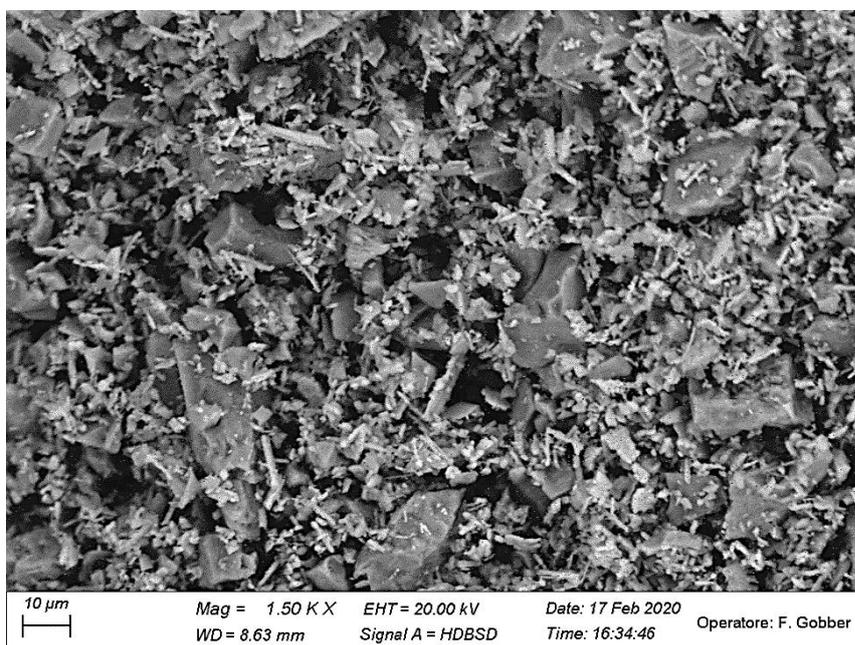


Figura 27: Micrografia SEM della miscela di polvere dopo ciclo di cottura

Per poter comprendere meglio le transizioni che coinvolgono la miscela di rivestimento, vengono riportate in Figura 28 analisi TG-DTA svolte sulla medesima durante uno studio portato avanti da Sbornicchia, Montesperelli, Ingo e Gusmano in [10], dove vengono messe a confronto formulazioni diverse per il rivestimento nel processo di microfusione a cera persa.

In particolare si può seguire l'evoluzione delle trasformazioni all'aumentare della temperatura: si nota infatti una rilevante diminuzione di peso iniziale dovuta alla perdita delle molecole d'acqua legate a $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ intorno a 140°C , accompagnate da un elevato picco endotermico (in rosso). Si notano infine due deboli picchi endotermici, uno intorno ai 250°C e uno intorno ai 570°C , associabili rispettivamente alla trasformazione di α -cristobalite (blu) e α -quarzo (verde) nelle loro forme β .

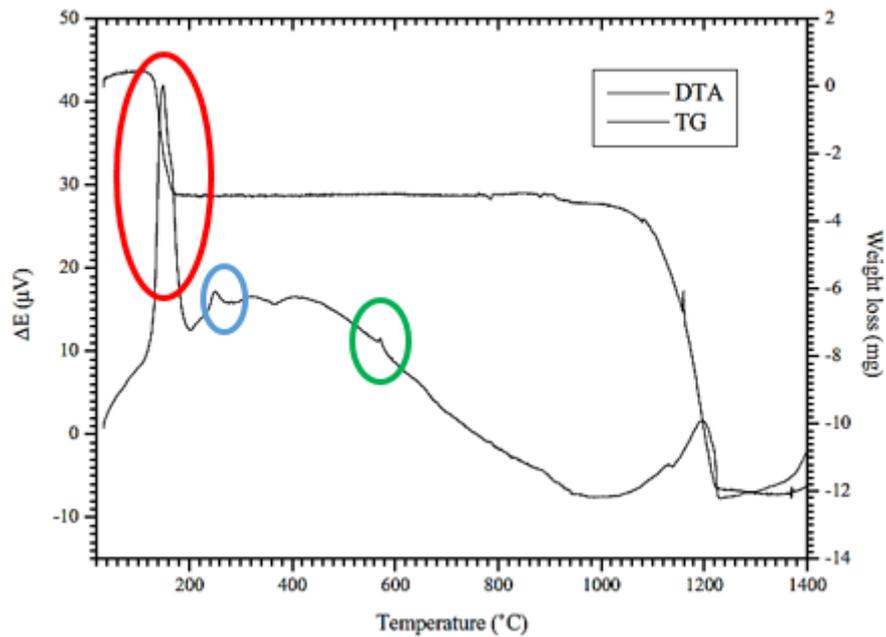


Figura 28: Analisi TG-DTA del gesso usato in azienda [10].

La massa rimane la stessa fino a poco più di 900°C: da lì inizia la decomposizione dell'anidrite che termina intorno ai 1200°C. Questo spiega perché durante il ciclo termico la temperatura massima raggiunta è di 740°C: se si aumentasse troppo si incorrerebbe nella seguenti reazioni con produzione di gas [5].



La temperatura di decomposizione del solfato di calcio pura è di 1260°C, ma essendo una miscela, la sua trasformazione inizia già intorno ai 900°C. Il picco endotermico relativo a questa trasformazione risulta allargato probabilmente per la presenza di zone più o meno ricche di solfato di calcio, che faranno variare la temperatura effettiva a cui avviene la decomposizione.

Alle trasformazioni che subiscono i vari componenti della miscela bisogna tener conto che sono associate delle variazioni di volume, i cui aspetti fondamentali sono stati già trattati in dettaglio nel capitolo precedente.

2.1.3 Processo di colata

Una volta che il cilindro è stato sottoposto al ciclo di cottura e la cera ha lasciato il calco sciogliendosi, si passa alla fase di colata del metallo.

In particolare, i materiali che vengono utilizzati maggiormente, in azienda hanno la seguente composizione, una per ogni colorazione:

	<i>Au</i> (wt%)	<i>Ag</i> (wt%)	<i>Cu</i> (wt%)	<i>Zn</i> (wt%)	<i>Pd</i> (wt%)	<i>In</i> (wt%)
<i>Lega di Oro Rosso</i> <i>5N (GENIA 169)</i>	75	4,5	20,25	0,25		
<i>Lega di Oro Giallo</i> <i>2N (GENIA 110)</i>	75	14,12 5	10	0,875		
<i>Lega di Oro</i> <i>Bianco (NF510)</i>	75	2,025	11,45	0	10,25	1,275

Tabella 2: composizione chimica delle principali leghe usate in azienda.

Vengono anche riportate le caratteristiche termiche e densità di ciascuno secondo i dati forniti dal produttore:

	<i>T solidus (°C)</i>	<i>T liquidus (°C)</i>	<i>Densità</i> (g/cm ³)
<i>Lega di Oro Rosso</i> <i>5N (GENIA 169)</i>	890	896	14,93
<i>Lega di Oro</i> <i>Giallo 2N</i> <i>(GENIA 110)</i>	876	897	15,35
<i>Lega di Oro</i> <i>Bianco (NF510)</i>	975	1050	15,7

Tabella 3: Temperatura di solidus, Temperatura di liquidus e densità delle tre leghe.

Per poter fondere e colare la lega, viene usato il forno sottovuoto e in pressione riportato in Figura 29 (a). In Figura 29 (b) invece viene riportato il suo schema di funzionamento.

Come già anticipato nel capitolo precedente, anche in questo caso si tratta di un forno che sfrutta l'effetto Joule per fondere il metallo. La lega ha un ruolo di resistenza nel flusso di corrente generato dall'induzione elettromagnetica; questa si scalda fino a fondere grazie alla generazione di calore.

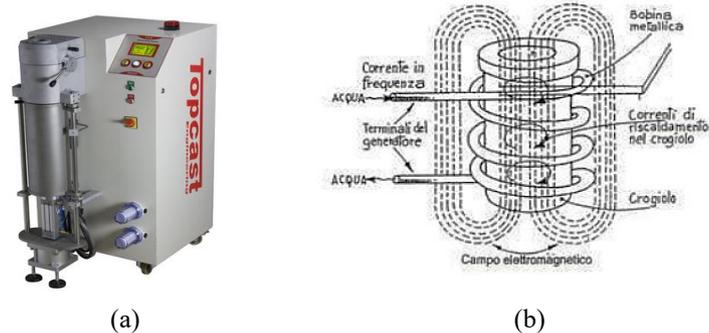


Figura 29: Forno sottovuoto e in pressione usato in azienda (a) e suo meccanismo di funzionamento (b) ⁸.

In particolare quello adottato in azienda è un sistema a doppia camera, una per la lega e una per lo stampo in gesso. Mentre il metallo sta fondendo nella parte superiore, il cilindro di gesso viene prelevato dal forno dove ha subito il ciclo termico e dove è stato mantenuto ad una temperatura di 730°C, e viene inserito nella camera in basso. Poiché durante questa operazione viene inserito dell'ossigeno è necessario che questo venga rimosso (1): viene dunque introdotto dell'Argon per generare un'atmosfera inerte che minimizzi la possibile ossidazione della lega (2). Quest'ultima viene poi iniettata velocemente grazie ad una differenza di pressione generata tra le due camere: in particolare si ha una $P_{inf} = 0,1$ bar nella zona dello stampo e $P_{sup} = 0,4$ bar in quella superiore (3,4). Dopo l'iniezione viene generata una sovrappressione che garantisce un riempimento completo ed evita l'insorgere porosità da ritiro (5).

⁸ (a) Immagine tratta da: https://www.topcast.it/it/prodotti/fonditrici-per-microfusione/tvc-colata-verticale/tvcd-doppia-camera_12.html

(b) Immagine tratta da Actis Grande M.: dispense del corso di Metal Forming Technologies

In Figura 30 viene riportata la sequenza delle variazioni di pressione all'interno della camera dovute all'entrata e all'uscita di diversi gas, a cui fa riferimento la descrizione sopra esposta.

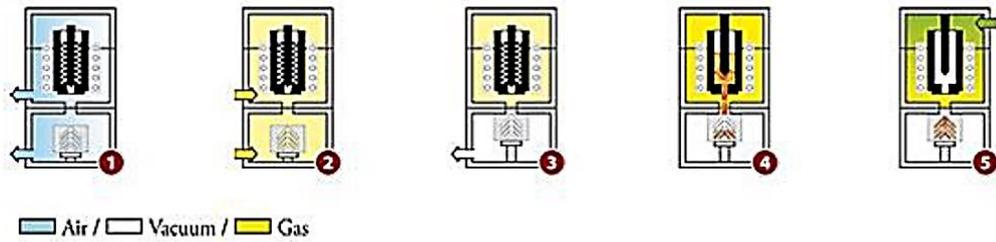


Figura 30: Sequenza di entrata e uscita dei gas nelle due camere durante la fase di colata⁹

Importante è avere il controllo dei vari parametri che permettono di ottimizzare la fase di colata: una velocità di iniezione controllata evita la generazione di turbolenze che possono portare alla generazione di difetti. La temperatura di fusione di ciascuna lega viene fissata a circa 150 °C sopra la temperatura di liquidus e mantenuta tale per un determinato tempo in modo da garantire una sua elevata omogeneità.

Sono stati analizzati i processi di fusione di due leghe in particolare, quella in oro rosso (GENIA169) e quella di oro giallo (GENIA110): si riportano in tabella 4 i loro parametri di fusione.

	GENIA110	GENIA169
Temperatura del cilindro (°C)	730	730
Temperatura di colata (°C)	1050	1050
Pressione superiore (mBar)	-620	-620
Pressione inferiore (mBar)	-930	-930
Pressione di compressione (mBar)	+500	+500
Tempo dall'apertura otturatore (s)	3	3
Tempo di solidificazione (s)	25	25
Tempo di permanenza (s)	90	90
Temperatura di omogeneizzazione (°C)	1100	1100
Tempo di omogeneizzazione (s)	240	240

Tabella 4: Parametri di colata usata per lega di oro giallo e rosso

⁹ Immagine tratta da Actis Grande M.: dispense del corso di Metal Forming Technologies

Dopo un periodo di permanenza all'interno della camera, il cilindro viene estratto. La lega ha già solidificato ma si trova ancora ad alta temperatura. I calchi vengono dunque posti subito in acqua fredda in modo da evitare la precipitazione di intermetallici che infragiliscono il metallo. Questa operazione è fondamentale per la lega in oro rosso. Il gesso si scioglie in gran parte in acqua: l'albero in lega viene liberato interamente grazie a un getto di acqua in pressione. Poiché ossidato nella parte esterna, prima di essere spiantonato, viene mantenuto in acido per circa mezz'ora.

2.1.4 Operazioni successive

Dopo che l'albero è stato pulito, i singoli pezzi vengono separati dalla parte centrale come illustrato in Figura 31.



Figura 31: Operazione di spiantonatura dell'albero in lega¹⁰

Prima di passare ai banchi i pezzi vengono sottoposti ad operazioni di burattatura. Questa tecnica di finitura superficiale si basa sull'applicazione di un campo magnetico rotante su una massa di aghi in acciaio, inseriti all'interno di un contenitore, dove si trovano gli oggetti preziosi. I contenitori vengono riempiti di acqua e sapone, che fa da lubrificante. L'applicazione del campo magnetico genera un movimento molto energico degli elementi in acciaio che vanno a martellare continuamente gli oggetti in oro, che vengono così lucidati. Ci sono a disposizione diversi mezzi abrasivi in varie dimensioni;

¹⁰ Immagine tratta da: <https://www.mattioligioidelli.it/>

unitamente a questo è possibile variare la velocità di rotazione e il tempo di permanenza nelle vasche. Ogni combinazione di parametri può portare a risultati diversi.



Figura 32: Buratto ad aghi utilizzato in azienda¹¹

Seguono operazione di finitura dei pezzi e loro assemblaggio ai banchi per mano degli orafi. Se previsto vengono incassate manualmente pietre nei gioielli.

Per la pulitura dei pezzi, come già riportato, o si ricorre ad un lavoro manuale attraverso delle spazzole, oppure ad un processo di elettrolucidatura. In quest'ultimo caso i gioielli sono immersi in una soluzione elettrolitica, specifica per la tipologia di metallo usato, che grazie all'applicazione di corrente elettrica, porta alla rimozione di parte del materiale che funziona da anodo. La rugosità dei pezzi diminuisce. La macchina utilizzata in azienda viene riportata in Figura 33.

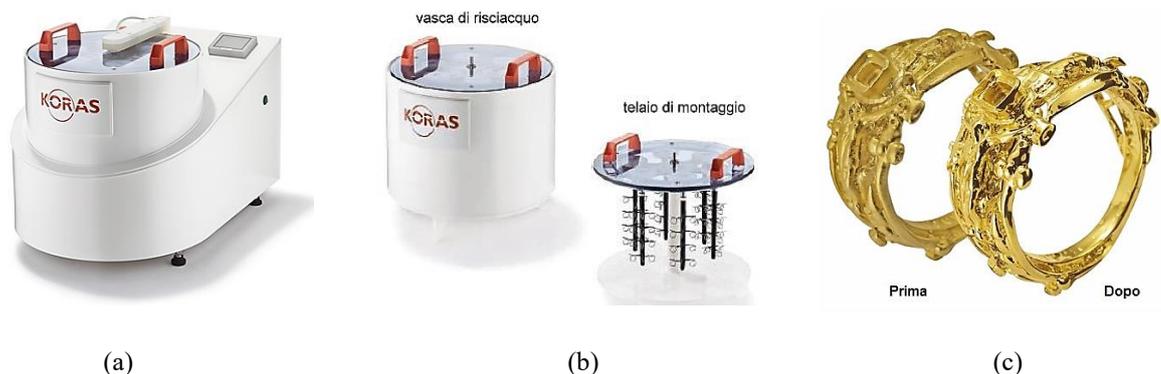


Figura 33: Macchina per elettrolucidatura usata in azienda (a,b). Gioiello prima e dopo il trattamento (c).¹²

¹¹ Immagine tratta da : <https://www.mariodimaio.com/it/>

¹² Immagine tratta da : http://www.it.koras-pmr.com/Aquapol_I25342.whtml

Una volta lucidati i pezzi vengono puliti attraverso una macchina ad ultrasuoni.

Le leghe di oro bianco devono essere ulteriormente trattate con un processo di elettrodeposizione galvanica, tramite il quale un sottile strato di rodio viene depositato sulla superficie dei gioielli. Questo permette di donare lucentezza ai pezzi.

In particolare questi vengono collegati ciascuno ad un filo di rame, e dopo essere stati immersi in una soluzione sgrassante, vengono inseriti per 90 secondi nella vasca contenente rodio, ad un certo amperaggio. È possibile ricoprire solo una parte del gioiello andando ad isolare con una vernice, che poi verrà rimossa, le parti che non devono essere interessate. In Figura 34 si riporta la macchina utilizzata per questa operazione.



Figura 34: Macchina usata per il processo di rodatura in azienda.

Capitolo 3 – Simulazione computerizzata applicata al processo di microfusione

3.1 Considerazioni preliminari

Nel campo orafa e non solo, da diversi anni ormai, la simulazione computerizzata ha assunto un ruolo di elevata importanza. La possibilità di utilizzare un software in grado di riprodurre il processo di colata ha permesso di incrementare e velocizzare la capacità di prevenire l'insorgere di difetti di varia natura.

La possibilità di intervenire sul design o sui parametri di processo ha permesso di ridurre i tempi e costi di produzione, soppiantando il comune approccio "trial and error". Come specificato in [11] da J.Fisher-Buhner quello che ci si aspetta di prevedere e sul quale poi è possibile intervenire preventivamente, è la fluidodinamica del metallo con generazione di possibili turbolenze durante il riempimento, ma soprattutto la fase di solidificazione, momento cruciale nella formazione di difetti.

Si riporta uno schema della fase di colata in Figura 35, con indicazione dei due passaggi del processo a cui la simulazione fa riferimento. Vengono riportate la camera superiore dove si trova il crogiolo contenente il metallo fuso, e la camera inferiore dove si trova il cilindro di gesso in condizioni di vuoto. Nella parte a sinistra lo stampo viene riempito, mentre nella parte a destra è iniziato il processo di solidificazione [11].

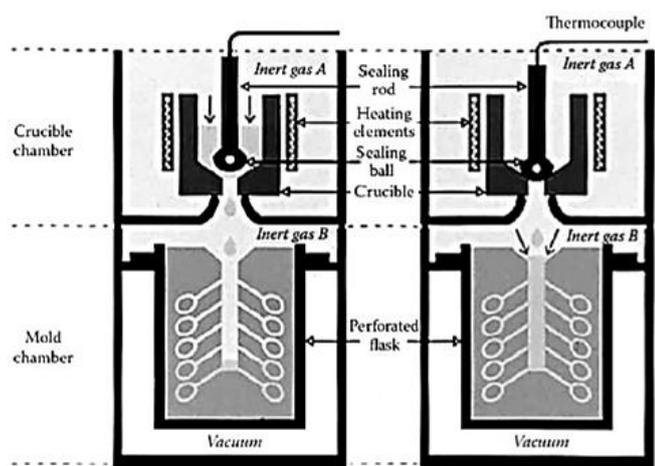


Figura 35: Schema del processo di colata, riempimento e solidificazione [11].

Diversi studi sono stati fatti per validare i risultati ottenuti attraverso simulazione: Actis Grande, Porta e Tiberto in [12] hanno svolto un'analisi dettagliata dei tempi di riempimento, confrontandoli con quelli forniti da un software, utilizzando un particolare sistema di sensori che operasse ad alta frequenza. Altri invece si sono incentrati su uno studio della fase di solidificazione con analisi delle temperature e dei possibili difetti.

Per poter giungere però ad un risultato affidabile è necessario impostare inizialmente una serie di condizioni che vadano a riprodurre quanto più possibile il reale processo di colata: le proprietà dei materiali e i parametri di processo inseriti devono essere quanto più vicini a quelli effettivamente utilizzati.

Si riporta in Figura 36 uno schema che riassume la serie di azioni da intraprendere per poter fare un corretto uso di un software in un processo di microfusione a cera persa per il settore orafa.

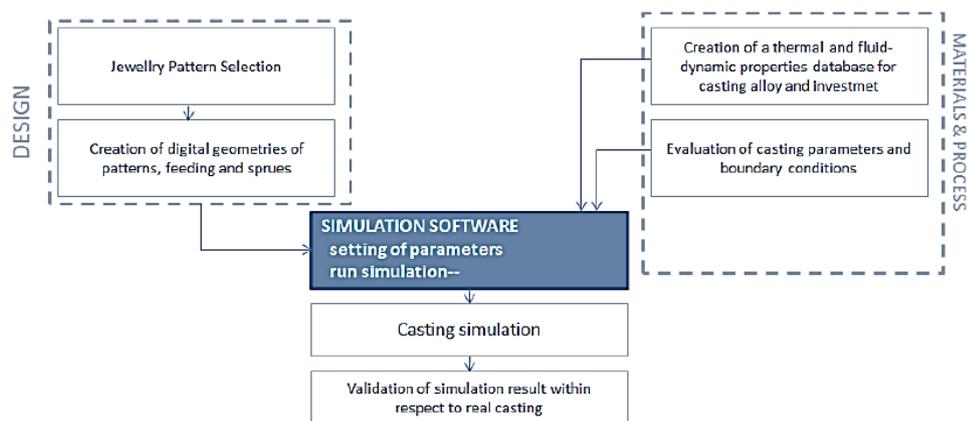


Figura 36: Schema di azioni da intraprendere per il corretto uso di un software [1]

Dopo aver generato un corretto design del gioiello e dell'intero sistema di alimentazione, è necessario inserire all'interno del software di simulazione le informazioni relative sia alle proprietà fluidodinamiche e termiche dei materiali utilizzati, sia ai parametri di colata e condizioni al contorno. I risultati della simulazione devono essere poi validati.

Un aspetto fondamentale infatti sul quale si è focalizzato questo lavoro di tesi è stato quello di comparare il reale processo di colata, con quello simulato dal software ProCAST, mettendo in evidenza punti di compatibilità di dati o eventuali discrepanze tra i due casi.

3.2 Studio del software e impostazione dei dati

Per poter approcciare in modo corretto l'utilizzo del software in questione, ci si è dunque basati sullo schema riportato in Figura 36.

In riferimento alla scelta del design del gioiello da studiare, in questa fase di analisi del software, si è scelto di operare con una geometria semplificata creata tramite *Rhinoceros*. Una volta importata in ProCAST, è stato necessario creare una *mesh* tridimensionale del modello e del materiale refrattario che lo circonda. L'utilizzo di un albero molto semplice ha permesso di studiare in modo molto più rapido alcuni aspetti del software.

Un altro punto importante su cui ci si è soffermati è stato l'inserimento dei dati di input all'interno del simulatore, riferiti sia ai materiali, sia alle condizioni di processo. Per quanto riguarda i materiali, in questa analisi, ci si è incentrati in particolar modo su due leghe utilizzate, quella di oro rosso e quella di oro giallo, con le composizioni descritte in Tabella 2. In collaborazione con il produttore ProGold, sono state ricavate le caratteristiche necessarie relative alle leghe di riferimento. Si è inoltre fatto ricorso all'analisi bibliografica [13, 14] per la verifica di alcuni dati non direttamente ricavabili, analizzando leghe di composizione simile: le proprietà ottenute da questa hanno comunque fornito una buona approssimazione delle condizioni reali di processo, apportando un miglioramento ai dati precedentemente inseriti nel software. In questo modo è stato possibile creare un database di proprietà più dettagliate. Si sono messi a confronto i tempi e le curve di solidificazione prima e dopo l'introduzione di questi parametri in modo da analizzare eventuali differenze.

Successivamente il lavoro di tesi si è incentrato su una validazione dei risultati ottenuti dalle simulazioni, tramite analisi dei difetti riportati e un confronto delle variazioni di temperatura ricavabili dal software con quelle registrate da termocoppie fissate in specifici punti del sistema.

Si sono poi effettuate diverse prove tramite simulatore, cambiando di volta in volta un parametro tra temperatura del metallo, temperatura del materiale refrattario e portata in ingresso della lega, mantenendo gli altri invariati. In questo modo si è potuto studiare quale sia l'influenza di alcuni dati di input rispetto ad altri. In caso di sostanziali differenze si è proceduto con successive verifiche.

Nell'ultima parte di studio del modulo di solidificazione del software, invece che operare su una geometria semplificata, si è svolta un'analisi termica su un sistema di produzione, in modo da poter verificare la concordanza dei dati anche in queste condizioni, dove il numero di pezzi coinvolti e la distribuzione termica possono variare.

Sulla fluidodinamica infine sono state fatte delle considerazioni successive, basate sui risultati ottenuti con il simulatore e quelli riportati in letteratura. Per poter avere un riscontro tramite prove in tal senso, sarebbe stato necessario disporre di un registratore di dati ad alta frequenza, poiché i tempi necessari per un completo riempimento sono inferiori al secondo.

3.2.1 Scelta design e creazione del modello CAD

Per la prima fase di analisi del software, in cui si è voluta testare la risposta del simulatore in termini di concordanza di risultati con le condizioni reali, è stato scelto per i gioielli un design non molto complesso. In particolare, grazie all'utilizzo di *Rhinoceros*, sono state create tre geometrie diverse, riportate in Figura 37.

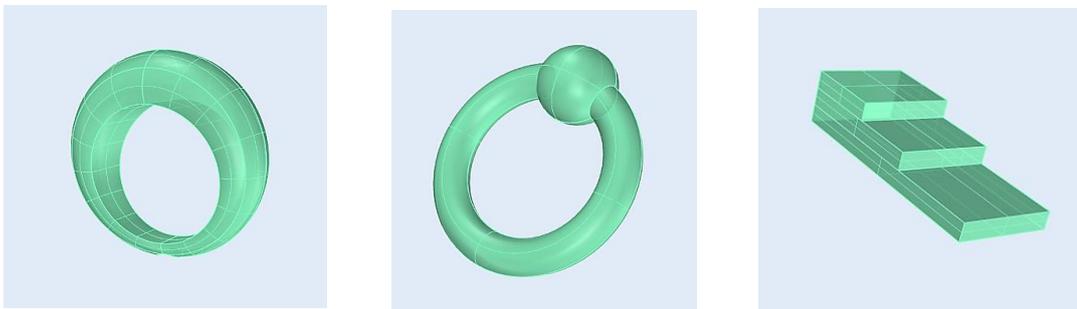


Figura 37: Tre geometrie scelte per costruire un albero semplificato

Per ogni forma, il sistema di alimentazione è stato posto in zone differenti del gioiello, in modo da poter analizzare se, anche in un caso di geometria semplice, questo possa portare a risultati differenti. Inoltre, a parità di geometria e canale di alimentazione, alcuni oggetti sono stati posti a diverse altezze dell'albero, per evidenziare eventuali discrepanze di risultati.

La disposizione dei pezzi sull'albero è riportata in Figura 38.

Qualsiasi siano gli oggetti che verranno montati, in ProCAST, ogni disegno CAD di un albero deve essere completato con l'inserimento di un cilindro intorno ad esso, di dimensioni pari a quello in acciaio usato per contenere il materiale refrattario. Questo passaggio si rende necessario in modo tale che, nella fase preliminare di impostazione della simulazione, si possano associare ai due volumi importati, le diverse proprietà presenti nel database relative ai due materiali coinvolti, lega e rivestimento. Il software si crea così un'interfaccia tramite la quale applica le condizioni di scambio termico.

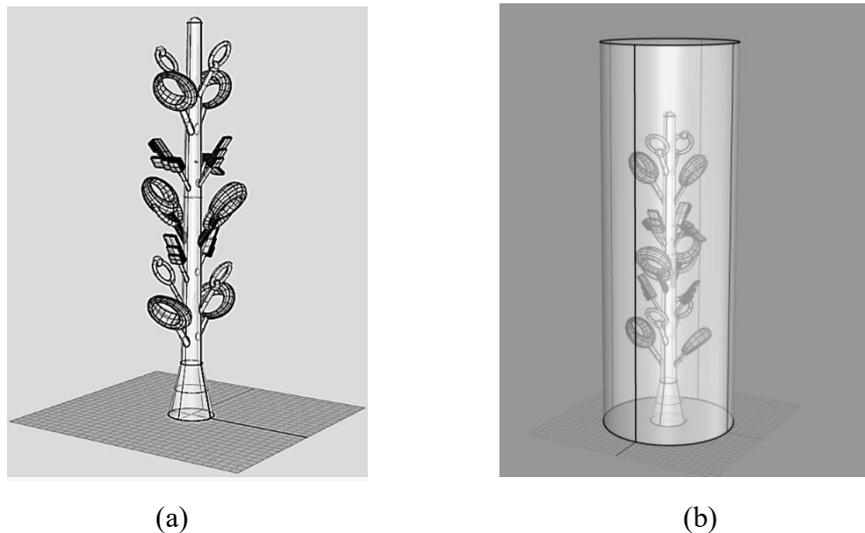


Figura 38: Disposizione pezzi sull'albero (a) e del materiale refrattario che lo circonda (b)

Questa geometria viene importata poi sul software ProCAST, che basa il suo sistema di simulazione sul metodo degli elementi finiti (FEM). Si tratta di una tecnica numerica volta alla risoluzione di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendo queste ad un sistema di equazioni algebriche. Ogni corpo fisico viene infatti suddiviso in elementi più piccoli, di forma definita, entro i quali il software considera esserci caratteristiche omogenee, la cui soluzione è data dalla combinazione lineare di funzioni dette *funzioni di base*. Prima di procedere all'inserimento dei dati per l'avvio della simulazione, è necessario dunque generare una discretizzazione sia della parte in metallo che di quella del materiale refrattario, creando così una griglia tridimensionale, la *mesh*. In questo modo si definiscono gli oggetti nello spazio attraverso una rete poligonale: maggiore sarà il numero degli elementi da cui questa è formata e più alta sarà la definizione con cui vengono riprodotte le diverse parti. Avere però un numero elevato

di elementi che definiscono un oggetto, comporta un tempo di elaborazione da parte del software maggiore. Generalmente, avendo i gioielli geometrie dettagliate che devono essere mantenute nel disegno CAD, per limitare la pesantezza del calcolo, si tende a creare una *mesh* molto fine per essi e una più grossolana per il sistema di alimentazione e per il materiale refrattario.

Questo rappresenta un ulteriore motivo per cui si è deciso di operare con geometrie piuttosto semplici nella parte iniziale dell'analisi. Le forme non troppo dettagliate e un numero di elementi limitato, hanno permesso di effettuare simulazioni con velocità di calcolo elevate, facilitando rapidi confronti.

Come già ricordato però, nella realtà industriale, il numero di oggetti montati sullo stesso albero è maggiore e il design dei gioielli può essere molto più dettagliato. Nell'ultima parte del lavoro è stato dunque analizzata la geometria riportata in Figura 39: si tratta di un albero più piccolo del precedente ma con un numero comunque alto di elementi montati; anche il sistema di alimentazione è più elaborato rispetto a quelli utilizzati in precedenza.

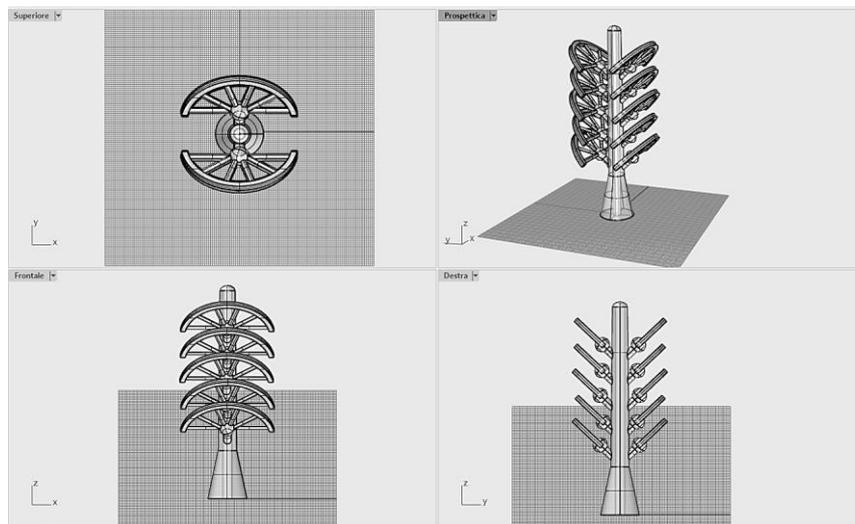


Figura 39: Geometria albero di produzione

Si può notare come, a differenza del caso precedente, i pezzi siano molto più ravvicinati: si vuole verificare se questo aspetto possa influenzare il processo di solidificazione. Per questa prova sono stati scelti degli elementi relativamente grandi in modo da facilitare il posizionamento delle termocoppie sull'albero. Bisogna ricordare

però che in gioielleria, si è soliti trattare anche con geometrie più dettagliate e complicate, e soprattutto con una dimensione notevolmente minore. Questo comporta l'inserimento, su un unico albero, di quantità elevate di elementi, allontanando ancora di più il caso di produzione da quello semplificato riportato inizialmente. Si è scelto però di non operare con pezzi di dimensioni troppo piccole sia perché sarebbe risultato molto complicato posizionare le termocoppie sui modelli in cera dei gioielli, costringendo il loro inserimento solo lungo l'albero centrale, sia perché la presenza della termocoppia stessa avrebbe potuto influenzare in maggior misura il processo di solidificazione. A titolo di esempio, si riportano nelle figure 40 (a) e (b) alcuni alberelli con differenti configurazioni e montaggi. Il numero di oggetti montati sugli alberelli a maggiore grado di "impaccamento" è pari a circa 120.

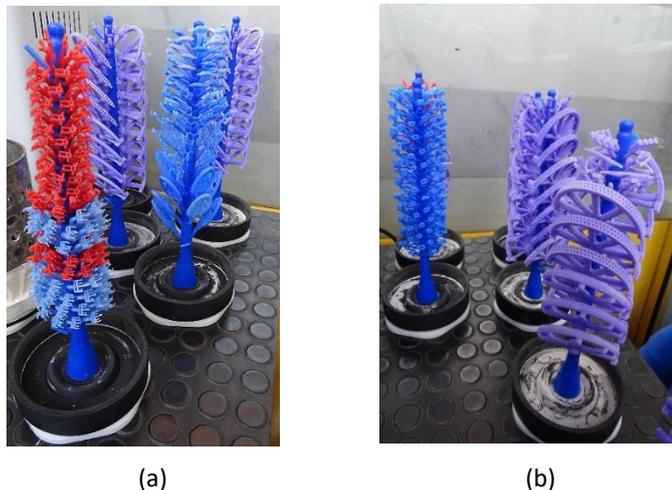


Figura 40: Alberi di produzione in cera

3.2.2 Impostazione dei dati di input

Una volta generata la *mesh*, si passa all'introduzione dei dati sulle proprietà dei materiali utilizzati. In particolare, all'interno del software, le proprietà richieste per le leghe e per il materiale refrattario sono di carattere fluidodinamico per le prime e termiche per entrambe e vengono riportate in Tabella 5.

<i>Proprietà termiche leghe metalliche</i>	<i>Proprietà fluidodinamiche leghe metalliche</i>	<i>Proprietà termiche materiale refrattario</i>
Conduktività	Viscosità	Conduktività
Densità		Densità
Calore specifico		Calore specifico
Frazione solida		
Calore latente		
Temperatura di liquidus e solidus		

Tabella 5: Proprietà termiche e fluidodinamiche richieste dal software per la lega metallica e materiale refrattario

Alcuni dati possono essere inseriti come grafico della proprietà al variare della temperatura.

Per quanto riguarda le leghe metalliche, le temperature di liquidus e di solidus vengono fornite direttamente dal produttore nelle schede tecniche: i valori per GENIA110 (lega oro giallo) e GENIA169 (lega oro rosso) sono state riportate in Tabella 3.

La frazione solida viene riportata in funzione della temperatura: ad essa è stato attribuito in maniera approssimata un andamento lineare, con un valore pari ad 1 per $T < T_{sol}$ e un valore pari a 0 per $T > T_{liq}$.

Anche la densità varia linearmente con la temperatura: i dati finora utilizzati prevedevano un valore di peso specifico costante per lo stato solido e uno per lo stato liquido, con andamento lineare tra i due. In realtà, seppur la variazione volumetrica

maggiore si registra durante la transizione di fase, anche sopra T_{liq} e sotto T_{sol} si verificano fenomeni di espansione/ ritiro che fanno variare la densità. Per rendere più complete le informazioni, si può fare riferimento ad uno studio portato avanti da ProGold, fornitore delle leghe in questione, in [14], dove sono state studiate le caratteristiche dell'oro e di alcune sue leghe basandosi su fenomeni termodinamici, aventi composizione simile a quelle investigate nell'ambito della presente tesi. La composizione J infatti è risultata essere la più simile a GENIA 110, mentre la composizione K a GENIA 169. Di seguito vengono riportate due tabelle che mostrano caratteristiche e proprietà termiche principali delle leghe in questione.

Alloy	Au [wt.%] [at.%]	Cu [wt.%] [at.%]	Ag [wt.%] [at.%]	Ni [wt.%] [at.%]	Pd [wt.%] [at.%]	Zn [wt.%] [at.%]	Deox	Refiner	Others
J	75.00	12.75	11.75			0.50		✓	
	54.55	15.61	28.75			1.10			
K	75.00	21.75	2.50			0.75		✓	
	50.25	45.17	3.06			1.51			

Tabella 6: Composizioni delle leghe J e K [14]

Alloy	TYPE	$\Delta T_{sol-liq}$ [°C]	d_{RT} [g cm ⁻³]	$CTE_{sol-liq}$ [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	d_{sol} [g cm ⁻³]	d_{liq} [g cm ⁻³]	Δd_{RT-sol} [g cm ⁻³]	$\Delta d_{sol-liq}$ [g cm ⁻³]	Δd_{RT-liq} [g cm ⁻³]
J	YG 18KT	876-885	15.25	19.47-76.10	14.525	13.945	0.725	0.580	0.580
K	RG 18KT	891-899	14.84	19.26-74.37	14.145	13.657	0.695	0.488	0.488

Tabella 7: Alcune proprietà termiche delle leghe J e K [14]

Gli intervalli termici di transizione di fase e la densità a temperatura ambiente sono molto simili a quelle delle leghe in esame. Si può pensare dunque di inserire all'interno del software un grafico densità-temperatura, aggiungendo a queste le d_{sol} e d_{liq} riportate in Tabella 7 per le composizioni J e K.

Il calore latente e il calore specifico delle due leghe sono stati forniti da ProGold a seguito di analisi termica e vengono riportati in Tabella 8. I valori che sono stati trovati per il calore specifico permettono di costruire una curva in funzione della temperatura. La differenza del valore di C_p a temperatura ambiente e a 100°C è minima, e per questo può essere considerato costante in questo intervallo termico.

	<i>Calore latente di fusione (J/g)</i>	<i>C_p (100°C) (J/gK)</i>	<i>C_p (600°C) (J/gK)</i>	<i>C_p (950°C) (J/gK)</i>
GENIA 110	70,51	0,138	0,172	0,183
GENIA 169	75,56	0,122	0,109	0,146

Tabella 8: Proprietà termiche delle leghe usate in azienda ricavate da analisi

Per completare i dati termici richiesti per le leghe è stato necessario inserire la conduttività termica. I dati inizialmente inseriti consistevano in un valore costante per ogni lega. Considerando la grande variazione di temperatura che questi metalli subiscono durante il processo, un unico valore per questa proprietà non rispecchia pienamente ciò che accade realmente. È stato dunque possibile inserire dei dati sulla conduttività al variare della temperatura, riferiti però a delle generiche leghe 18 kt, una in oro rosso ed una in oro giallo. Questi sono stati estrapolati dai risultati di analisi termiche fatte su diverse leghe per gioielleria, svolte in uno studio portato avanti da Tiberto D. e Klotz U.E. in [13].

Analizzando invece le proprietà richieste per il rivestimento, si è intervenuti maggiormente sul valore della conduttività. Si è andato a sostituire il valore costante presente, con un grafico in funzione della temperatura estrapolato dai risultati ottenuti in [13] su un tipico materiale refrattario in commercio usato in gioielleria. La densità e il calore specifico sono stati mantenuti costanti.

È importante inserire poi i dati che descrivano in maniera più accurata possibile le condizioni in cui si svolge il processo di colata. Una volta definiti i materiali si possono impostare infatti la temperatura del refrattario e quella del metallo fuso nel momento in cui inizia la fase di colaggio. Per poter studiare come queste possano influire sui tempi di riempimento e solidificazione ma soprattutto sulla formazione di difetti, sono state fatte diverse prove variando questi parametri a parità di altre condizioni.

È inoltre necessario inserire condizioni di scambio termico tra metallo e rivestimento, e tra l'intero sistema e la camera: queste non sono state variate rispetto ai valori già presenti.

Infine è importante impostare le condizioni con le quali il metallo viene colato nello stampo. È possibile inserire una portata del metallo in entrata, ma in questo caso non si ha un valore specifico di riferimento poiché si opera con un forno che lavora per differenze di pressione. A tal proposito è possibile inserire all'interno del software il valore sia della pressione che viene imposta nella camera superiore dello strumento, dove si trova il metallo fuso, sia quella sottostante, dove è alloggiato il cilindro in gesso. Questa differenza di valore però, secondo il software, non si riferisce alla *pressione totale* che il fluido mantiene durante la fase di riempimento e che regola quindi la sua velocità e la sua portata, ma a quella che viene indicata come *pressione statica*, ovvero quella esercitata dallo stesso nel suo stato di quiete sull'unità di superficie con cui è in contatto. Si intuisce facilmente quindi come questo parametro sia molto lontano da ciò che accade nella realtà: la velocità in questo caso, che è compresa nel contributo dinamico della pressione, è dunque lasciata libera di aumentare fino a valori molto elevati. Per avvicinarsi maggiormente alla condizione reale si è pensato di trattare lo svuotamento del crogiolo con la legge di Bernoulli, in modo da ricavare una velocità di uscita, e quindi una portata, più idonea per il processo di colata.

In riferimento sempre alla pressione con cui avviene la fase di colaggio, come è stato già descritto nel capitolo precedente, oltre ad un gradiente fisso tra le due camere, una volta che quella superiore è stata svuotata, viene applicata una sovrappressione, utile a garantire un corretto riempimento e a compensare il ritiro durante il raffreddamento. Per quanto riguarda questo ultimo aspetto, in ProCAST non è possibile inserire un profilo di pressione, che vada dunque a riprodurre correttamente tutte le fasi. Si può imporre un parametro indicato con GATEFS, che permette di ritardare quello che viene chiamato *distacco della vena fluida*. Il liquido infatti, durante il raffreddamento, viene diviso in regioni in fase di solidificazione e in ognuna il software calcola il ritiro subito. Quando una zona si isola, cioè è contornata da un'area in cui la frazione solida è superiore ad un valore critico inserito, questa non è più alimentabile portando ad un distacco dell'alimentazione di fluido, generando così porosità. Aumentando dunque il valore di questo parametro è possibile ritardare il distacco e quindi riprodurre in maniera ridotta l'effetto della sovrappressione. Dopo avere inserito i dati, la simulazione viene avviata.

3.2.3 Simulazioni impostate

Dopo aver inserito i nuovi dati relativi ai materiali presi in analisi, e quelli relativi alle condizioni al contorno, sono state avviate delle simulazioni.

Attraverso l'utilizzo di termocoppie è stato possibile inizialmente verificare il ciclo di cottura del rivestimento, per assicurarsi che ogni zona avesse raggiunto la temperatura imposta di 730°C. Per tale verifica sono state inserite quattro termocoppie di tipo K nelle zone indicate in Figura 41.

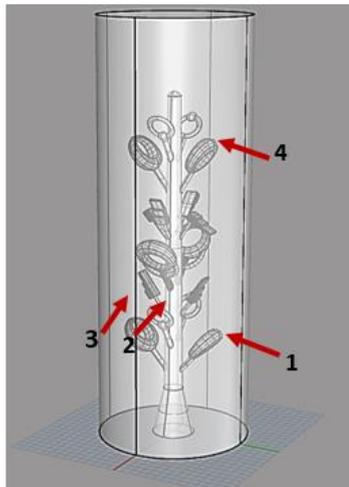


Figura 41: Disposizione termocoppie prova ciclo di cottura

In particolare sono state posizionate due termocoppie vicino a due pezzi, in cima e in fondo all'albero (1,4), una vicino all'albero in posizione centrale (2) e un'altra nel mezzo dello stampo in gesso (3).



Figura 42: Disposizione termocoppie all'interno del cilindro

Dopodiché si è passati all'analisi della fusione del metallo, analizzando in un primo momento, come già ricordato, la geometria semplificata, riportata in Figura 38. Come prima analisi si è fatto un confronto dei risultati della simulazione prima e dopo l'inserimento dei dati per entrambe le leghe in questione: in particolare si è posta attenzione alla fase di solidificazione, per mettere in evidenza quanto l'introduzione di nuovi parametri possa influire sui risultati.

Successivamente si è passati a dei confronti tra la risposta del simulatore e il processo reale di colata. Per i due materiali in analisi si è verificata infatti la presenza di difetti sui pezzi segnalati dalle rispettive simulazioni ed inoltre per la lega in oro rosso, si sono confrontati i profili di temperatura ricavati da altre 4 termocoppie di tipo K, questa volta inserite nel metallo, con quelli forniti dalla simulazione negli stessi punti. In questo modo si sono voluti verificare i tempi reali di solidificazione rapportandoli con quelli calcolati. Per questa prova le termocoppie sono state disposte come in Figura 43, in modo da analizzare non più il materiale refrattario, ma il comportamento della lega metallica.

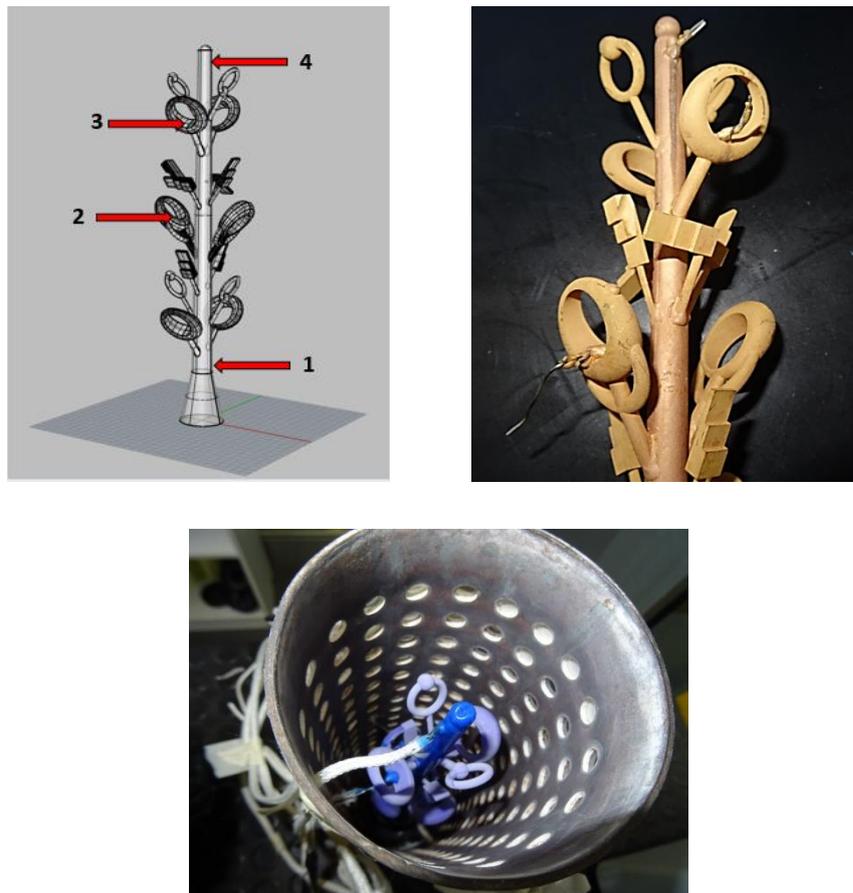


Figura 43: Disposizione termocoppie per studiare il profilo di solidificazione della lega in oro rosso

Si sono poi impostate delle simulazioni con lo stesso materiale (GENIA169), mantenendo costanti dei parametri e variandone degli altri. In particolare sono state esaminate tre variabili: la temperatura della lega prima della colata, la temperatura a cui si trova il materiale refrattario e la portata del metallo in uscita dal crogiolo, considerando in questo ultimo caso come variabile la differenza di pressione tra le due camere. In particolare si è considerato il crogiolo come un recipiente in svuotamento, in cui si sono trascurate le perdite legate all'attrito e si è approssimata la sua forma ad una cilindrica, non considerando così lo svasamento nella parte terminale. L'equazione di Bernoulli, riportata sotto, è stata applicata in due punti: il primo è fissato al livello raggiunto dal metallo fuso nel crogiolo e il secondo nel punto di uscita da esso.

$$P + \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = cost$$

Considerando come variabile la differenza di pressione delle due camere, e conoscendo il volume e la densità del metallo, si è dunque calcolata la sua velocità di uscita e la sua portata. Fissando la pressione della camera inferiore a 0,1 bar, si è associato a quella superiore tre valori diversi, rispettivamente di 0,2-0,35-0,5 bar, ricavando così tre velocità differenti.

Le condizioni alle quali sono state impostate le simulazioni vengono riportate di seguito:

- $T_{\text{flask}} = 730^{\circ}\text{C}$; $\dot{m} = 0,77 \text{ kg/sec}$; $T_{\text{colata}} = 1000^{\circ}\text{C}$; 1050°C ; 1100°C
- $T_{\text{colata}} = 1050^{\circ}\text{C}$; $\dot{m} = 0,77 \text{ kg/sec}$; $T_{\text{flask}} = 550^{\circ}\text{C}$; 620°C ; 730°C
- $T_{\text{colata}} = 1050^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{flask}} = 730^{\circ}\text{C}$; $\dot{m} = 0,51 \text{ kg/sec}$; $0,77 \text{ kg/sec}$; $1,06 \text{ kg/sec}$

Laddove le analisi delle simulazioni abbiano portato a rilevanti differenze nei risultati, si è proceduto con una verifica.

Infine l'ultima analisi termica è stata effettuata sull'albero di produzione. Le termocoppie questa volta sono state posizionate come in Figura 44.

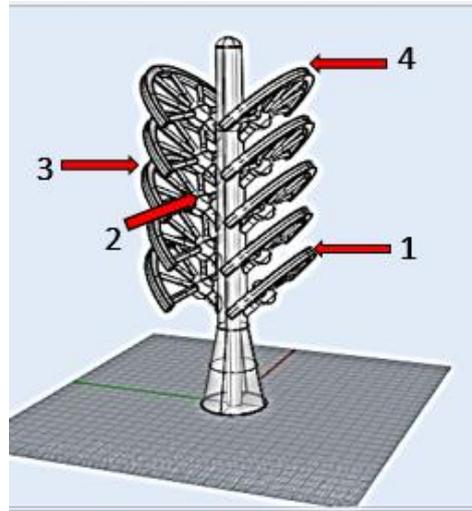


Figura 44: Disposizione termocoppie su albero di produzione

In particolare ne sono state messe due su pezzi che si trovano alle estremità opposte dell'albero, fissandole, per entrambe, nella parte più esterna del bracciale. Le altre due invece sono state posizionate in due zone diverse dello stesso bracciale, situato quest'ultimo nella parte centrale.

Per quanto riguarda la fluidodinamica, come già descritto in precedenza, non è stato possibile inserire un profilo di pressione idoneo che andasse a riprodurre esattamente le condizioni reali. Si sono studiate però le tre simulazioni ottenute variando le portate del metallo e si sono confrontati i tempi di riempimento con quelli riportati in letteratura.

3.3 Analisi risultati simulazioni

3.3.1 Verifica ciclo di cottura materiale refrattario

Per poter verificare che il ciclo di cottura permetta al materiale refrattario di raggiungere le temperature imposte, sono state inserite nello stampo 4 termocoppie di tipo K, disposte come in Figura 41.

Il ciclo di cottura impostato nel forno è stato messo a confronto con i dati registrati dalle termocoppie, e i risultati sono stati riportati nel grafico in Figura 45.

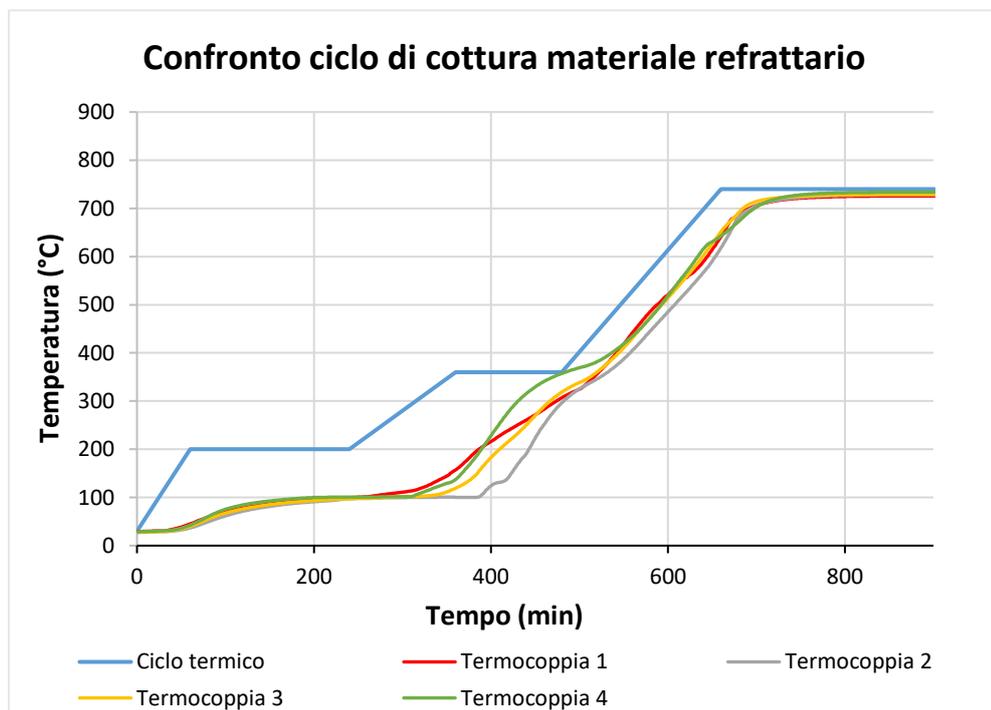


Figura 45: Grafico ciclo termico di cottura a confronto con analisi termocoppie

Come si può notare tutte le curve hanno seguito lo stesso andamento. Si distaccano in alcune zone dal ciclo termico impostato nei forni di cottura: questo può essere dovuto in prima istanza alla bassa conducibilità termica del rivestimento ma anche al fatto che nella prima fase (fino a 100°C) una parte del calore viene spesa per l'eliminazione dell'acqua residua (da cui il plateau tra 180 e 300 minuti circa). Alla fine del ciclo però si nota come in tutti i punti del materiale refrattario si sia arrivati a 730°C, avendo mantenuto lo stampo in forno a questa temperatura per molte ore.

3.3.2 Analisi simulazioni prima e dopo inserimento dati

Come prima analisi, relativa al metallo, si sono messe a confronto le curve di solidificazione generate dal software per le due leghe in questione, prima e dopo l'inserimento dei nuovi dati relativi alle loro proprietà termiche e a quelle del gesso.

In particolare, i dati per cui è stata apportata una differenza più marcata nel caso delle leghe, sono stati calore specifico e conduttività termica. Si è passati infatti da valori costanti, a curve in funzione della temperatura, e che sono riportate nelle Figure 46 e 47.

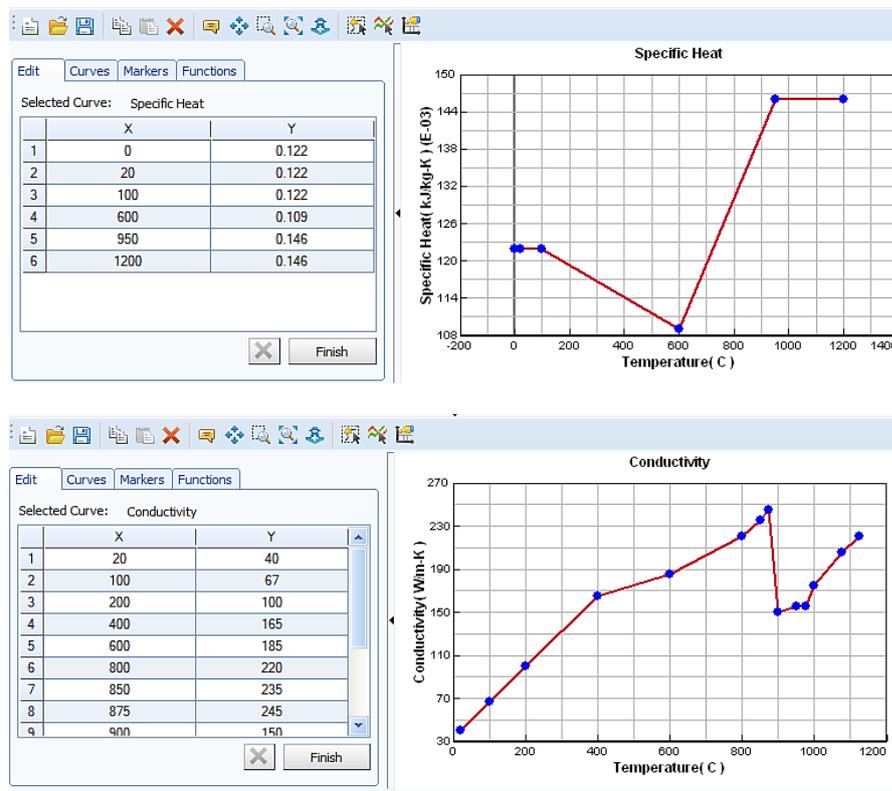


Figura 46: Grafici inseriti in ProCAST al variare della temperatura di calore specifico (sopra) e conduttività termica (sotto) per la lega in oro rosso

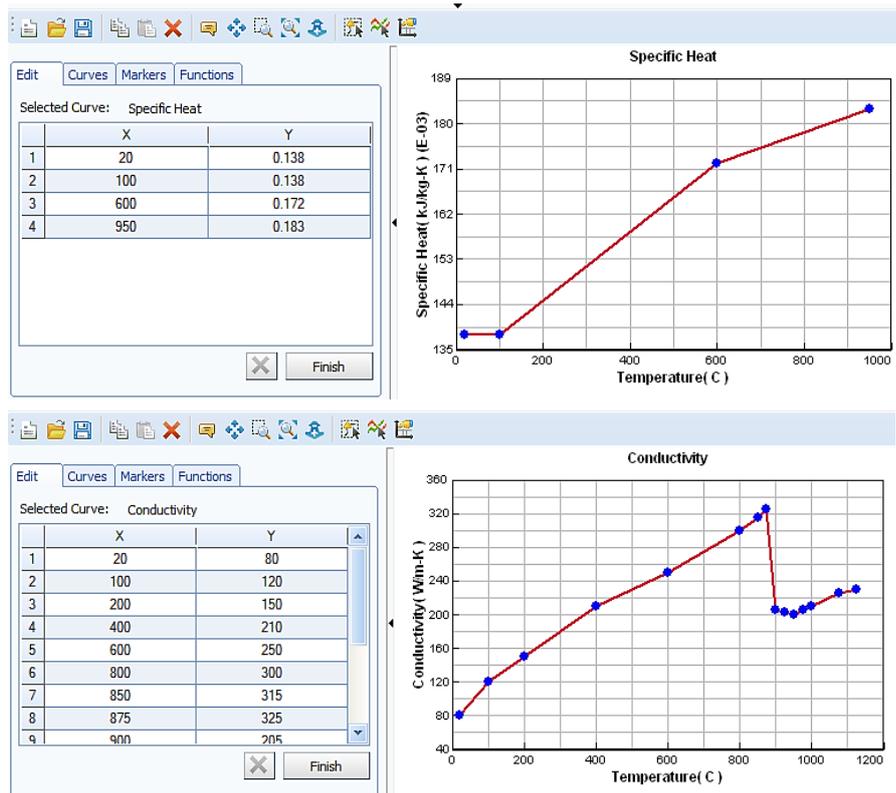


Figura 47: Grafici inseriti in ProCAST al variare della temperatura di calore specifico (sopra) e conduttività termica (sotto) per la lega in oro giallo

Per quanto riguarda il materiale refrattario invece, si è inserito in ProCAST il grafico della conduttività termica in funzione della temperatura riportato in Figura 48.

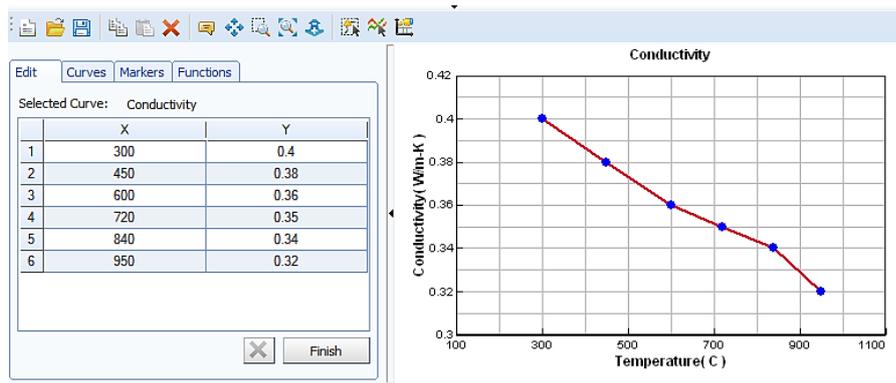


Figura 48: Grafico della conduttività termica del gesso in funzione della temperatura inserita in ProCAST

Mentre l'incertezza sui dati inseriti relativi alla conduttività termica per le leghe metalliche in questione, può essere ragionevolmente considerata minima, nel caso del

rivestimento vanno fatte considerazioni più specifiche. Nel primo caso infatti, nonostante le composizioni non siano state specificate in [13], queste non potranno essere molto diverse da quelle dei materiali preziosi utilizzati, trattandosi di dati relativi a leghe 18 kt rispettivamente in oro rosso e oro giallo. Nel caso del materiale refrattario invece, nonostante sia specificato si tratti di una miscela dove il gesso ha il ruolo di legante, come quella utilizzata in azienda, la composizione esatta rimane ignota; non sono stati precisati inoltre né la quantità d'acqua presente né il ciclo termico a cui è stato sottoposto. Si è ritenuto comunque che i dati inseriti portassero ad una buona approssimazione in quanto i materiali utilizzati in campo orafico gesso-legati a base silice, si può dedurre abbiano circa la stessa composizione. Inoltre, per confermare il fatto che l'inserimento di questi dati abbia portato ad una maggiore corrispondenza del software con la reale condizione di raffreddamento, si sono confrontati i tempi di solidificazione indicati dal simulatore per le due tipologie di materiale refrattario in questione, con quelli ricavati dalle termocoppie e riportati successivamente in questo lavoro di tesi. Quello che si è potuto notare è che, a parità di condizioni e proprietà di lega inserite, la minor conduttività del materiale refrattario inizialmente considerato, contribuisce alla sovrastima dei secondi impiegati nella transizione di fase, in tutte e quattro le zone prese in esame. L'inserimento dei valori di conduttività termica, come in Figura 48, ha permesso invece un maggiore avvicinamento alla condizione di raffreddamento reale in termini di tempo e pertanto è stata ritenuta corretta questa approssimazione. Anche nella fase di raffreddamento successiva alla completa solidificazione, le curve ricavate con il nuovo refrattario sono risultate più simili a quelle ricavate delle termocoppie.

Vengono ora riportate le curve di raffreddamento, per entrambe le leghe, elaborate dal software prima e dopo l'inserimento dei dati, facendo riferimento agli stessi punti dell'albero dove sono state inserite successivamente le termocoppie: per l'ordine delle zone si rimanda a quelle evidenziate in Figura 43.

Lega Oro Rosso (GENIA 169)

La prima lega analizzata è stata quella in oro rosso. In questo caso le temperature di liquidus e solidus del materiale utilizzato in azienda sono sostanzialmente le stesse di quelle del rispettivo materiale già presente nel software, e non è quindi apprezzabile una differenza sostanziale dell'intervallo di transizione di fase.

Nei seguenti grafici vengono analizzate le 4 zone dell'albero specificate in precedenza: per ognuno la curva tratteggiata è riferita ai risultati ottenuti con i dati inizialmente presenti, mentre la curva continua a quelli ricavati dall'inserimento dei nuovi parametri.

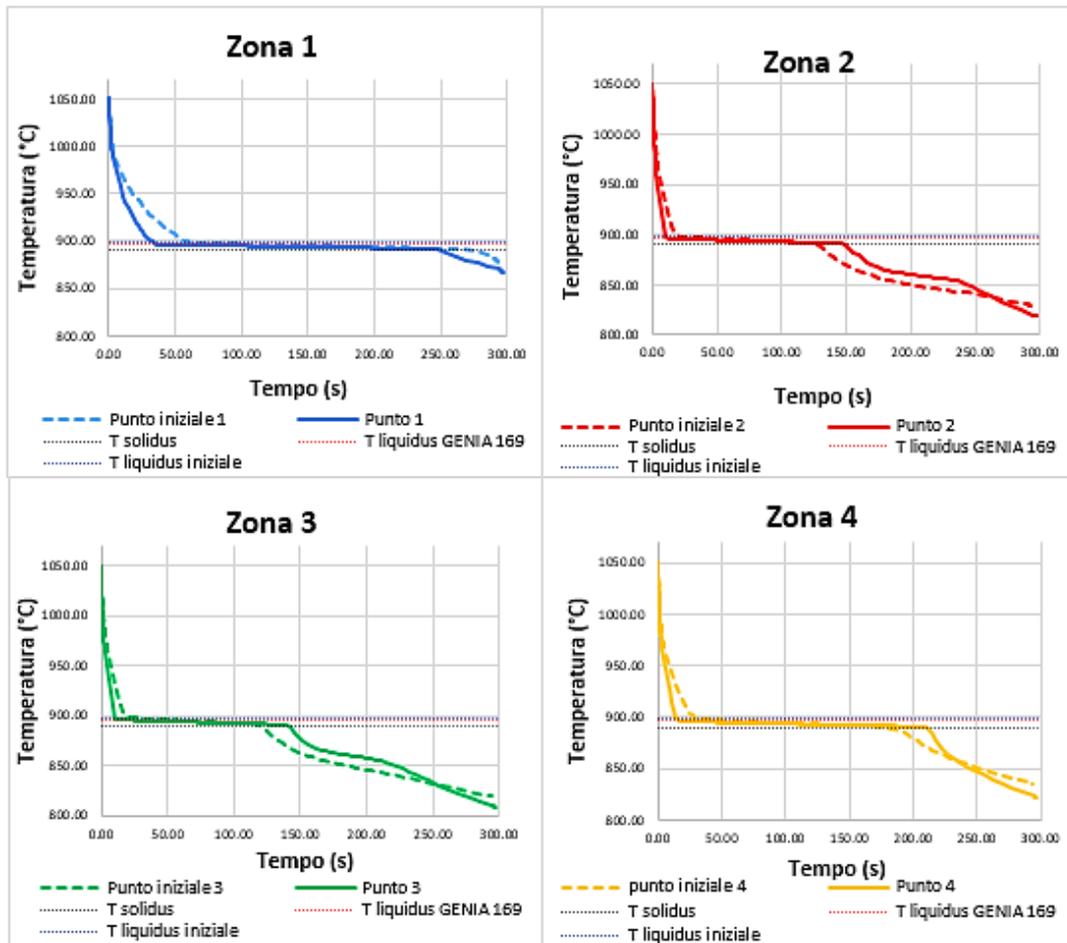


Figura 49: Grafici di confronto lega in oro rosso prima (curve tratteggiate) e dopo (curve continue) inserimento dei dati delle 4 zone analizzate

Quello che si può subito notare è che in tutte le zone, in particolare nella prima, la velocità con la quale si scende al di sotto di T_{liq} , che segna l'inizio della fase di solidificazione, è leggermente maggiore nel caso della simulazione impostata con i nuovi dati. Lo smaltimento del calore quindi risulta essere più veloce nella prima parte del raffreddamento: in questa fase la conduttività sia per il rivestimento che per la lega è molto più elevata rispetto a quella considerata inizialmente (il valore inserito per la lega era di circa $60-70 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, mentre per il rivestimento di $0,225 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$).

Se si considera il tempo di permanenza nell'intervallo di transizione liquido-solido, si nota come la trasformazione sia in media più lunga nel caso della simulazione con i nuovi

dati. Questo può essere dovuto alla grande variazione di calore latente che si è apportata (circa il doppio).

La zona 1 è quella più influenzata dall'ambiente esterno: le due curve, tranne nella prima parte dove si mantiene una velocità di raffreddamento più bassa per la simulazione con i parametri iniziali, appaiono concordi, anche nei tempi di permanenza nella zona di transizione. Questo si può notare meglio nel grafico sotto riportato: in Figura 50 infatti vengono confrontate le curve di frazione solida nel tempo per gli stessi 4 punti sopra considerati. Le curve tratteggiate sono quelle ricavate dalla simulazione prima dell'inserimento dei dati, mentre quelle continue riguardano i nuovi materiali inseriti. Mentre nelle zone 2,3 e 4 l'inizio della solidificazione avviene per tempi molto vicini per le due prove terminando però con una divergenza delle curve più marcata, la zona 1 mantiene sempre questa differenza sui tempi per la trasformazione liquido-solido, impiegandoci in entrambi i casi circa 220 secondi.

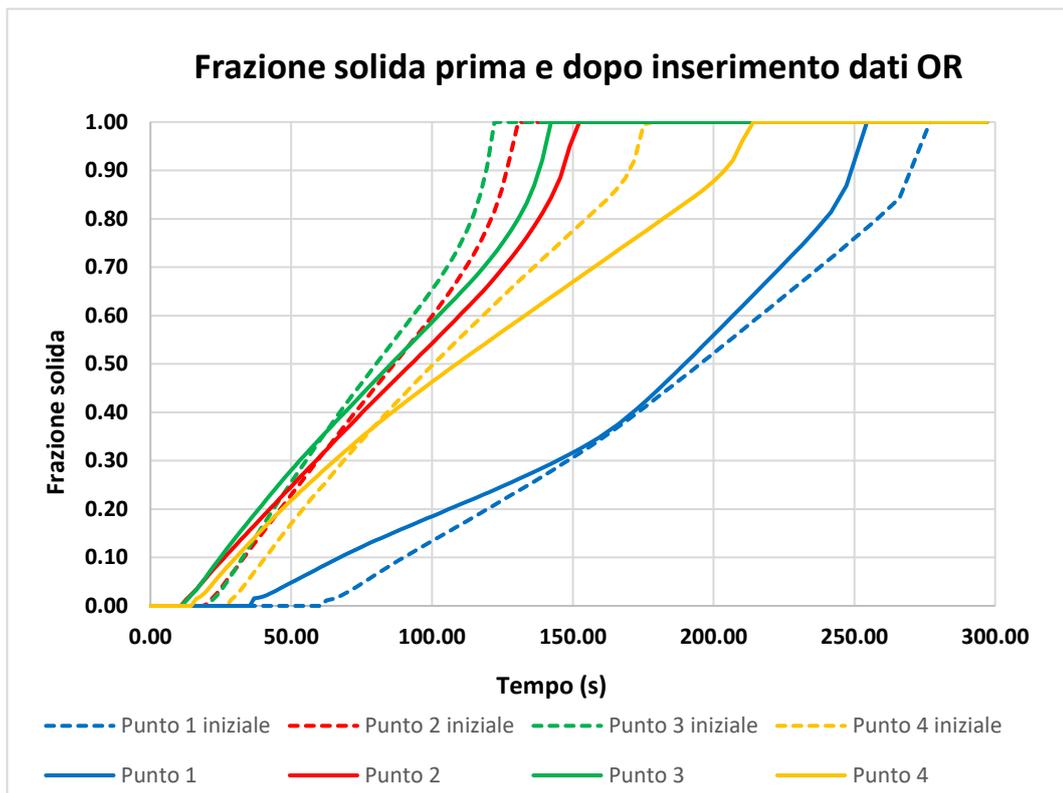


Figura 50: Grafici di confronto frazione solida per la lega in oro rosso prima (curve tratteggiate) e dopo (curve continue) l'inserimento dei dati in ProCAST

Vengono ora messi a confronto i risultati relativi alle due simulazioni in riferimento al *solidification time*, ovvero il tempo impiegato per la transizione liquido-solido. Si riportano i due alberi, a sinistra quello ottenuto con i parametri iniziali, e destra quello con le nuove proprietà.

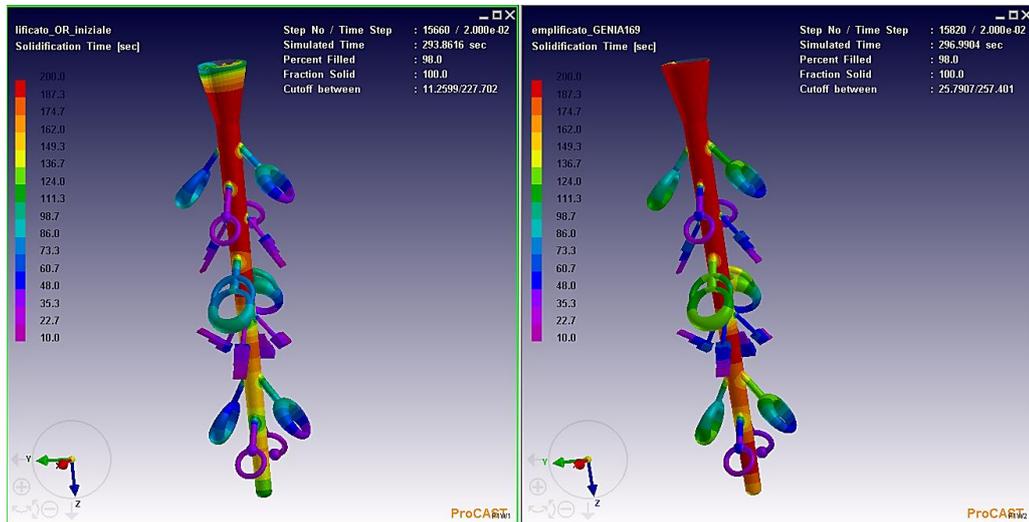


Figura 51: Confronto del tempo di solidificazione per le simulazioni ottenute con i parametri iniziali (sinistra) e quella con i nuovi (destra)

Si può notare come, facendo riferimento alla stessa scala di tempi, zone corrispondenti presentino tempi più elevati nel caso a destra. In entrambi però, non si notano differenze sostanziali per pezzi aventi la stessa geometria e sistema di alimentazione ma posizionati in zone differenti dello stesso albero. La variazione della disposizione del piantone in elementi uguali invece, ha portato a tempi di solidificazione diversi che possono incidere sulla generazione di difetti.

Lega Oro Giallo (GENIA 110)

Per la lega in oro giallo sono state apportate le stesse modifiche sui parametri di input di quella in oro rosso finora descritta. Come sottolineato in precedenza le maggiori differenze si hanno nelle proprietà riportate in Figura 47.

Vengono ora riportate le curve di solidificazione ricavate dalle simulazioni prima e dopo l'inserimento dei dati.

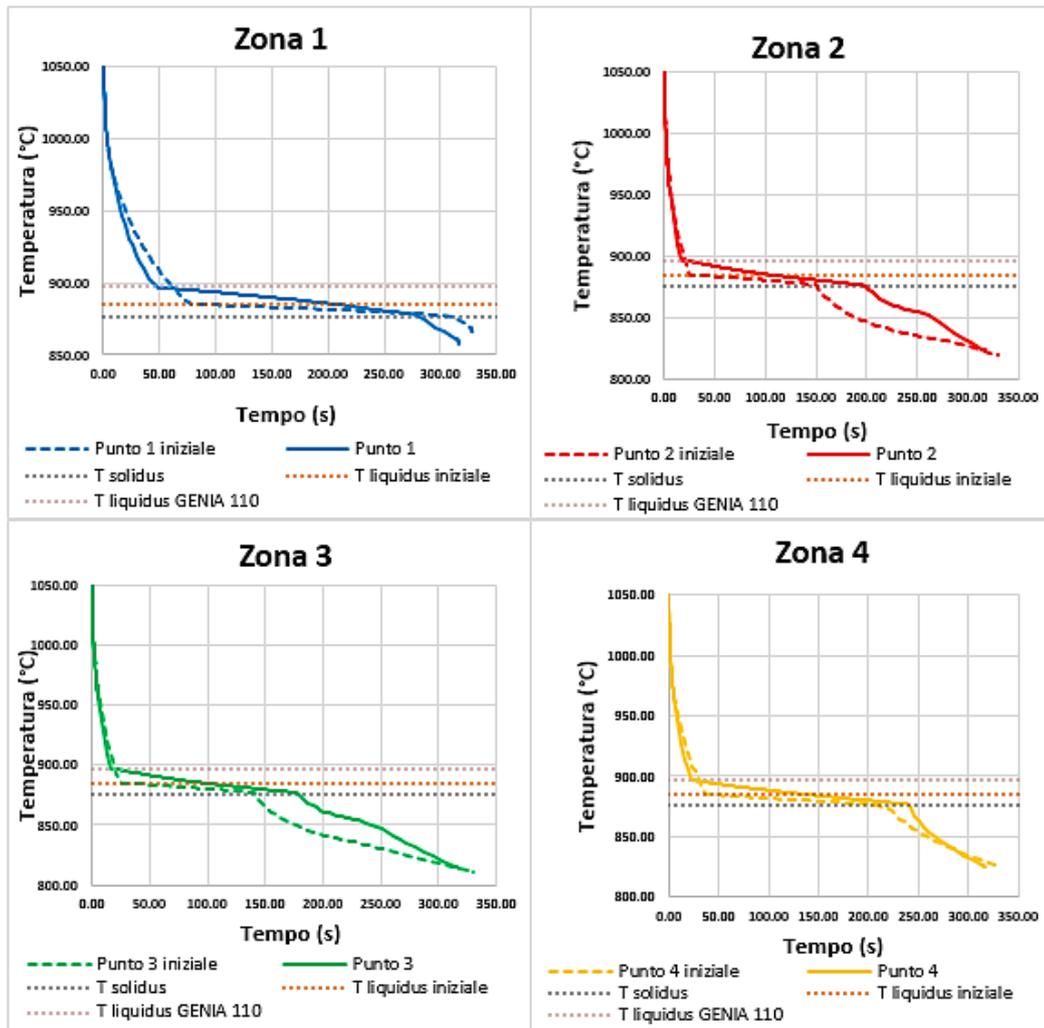


Figura 52: Grafici di confronto lega in oro giallo prima (curve tratteggiate) e dopo (curve continue) inserimento dei dati delle 4 zone analizzate

In questo caso le velocità di raffreddamento nella prima parte sembrano essere molto simili prima e dopo l'inserimento dei dati; solo nella zona 1 la differenza risulta più marcata. Si tratta di due leghe con temperature di transizioni differenti, più alta per GENIA 110: per quanto la conduttività del nuovo materiale sia più alta, il tempo necessario per attraversare la transizione di fase è inevitabilmente maggiore. Anche il calore latente in questo caso ha un valore doppio rispetto a quello inserito inizialmente, contribuendo ad una maggiore permanenza nell'intervallo di transizione liquido-solido.

Una conduttività più alta può essere ancora il motivo per cui, dopo la temperatura di solidus, nelle zone 2,3 e 4 il nuovo materiale mantiene una velocità di raffreddamento più elevata rispetto all'altro caso.

Per quanto riguarda la zona 1, come nel caso precedente, gli andamenti delle due curve sembrano molto simili anche in termini di tempi di permanenza nell'intervallo di transizione. Questa zona può essere fortemente influenzata dall'ambiente esterno ed è anche l'ultima a solidificare.

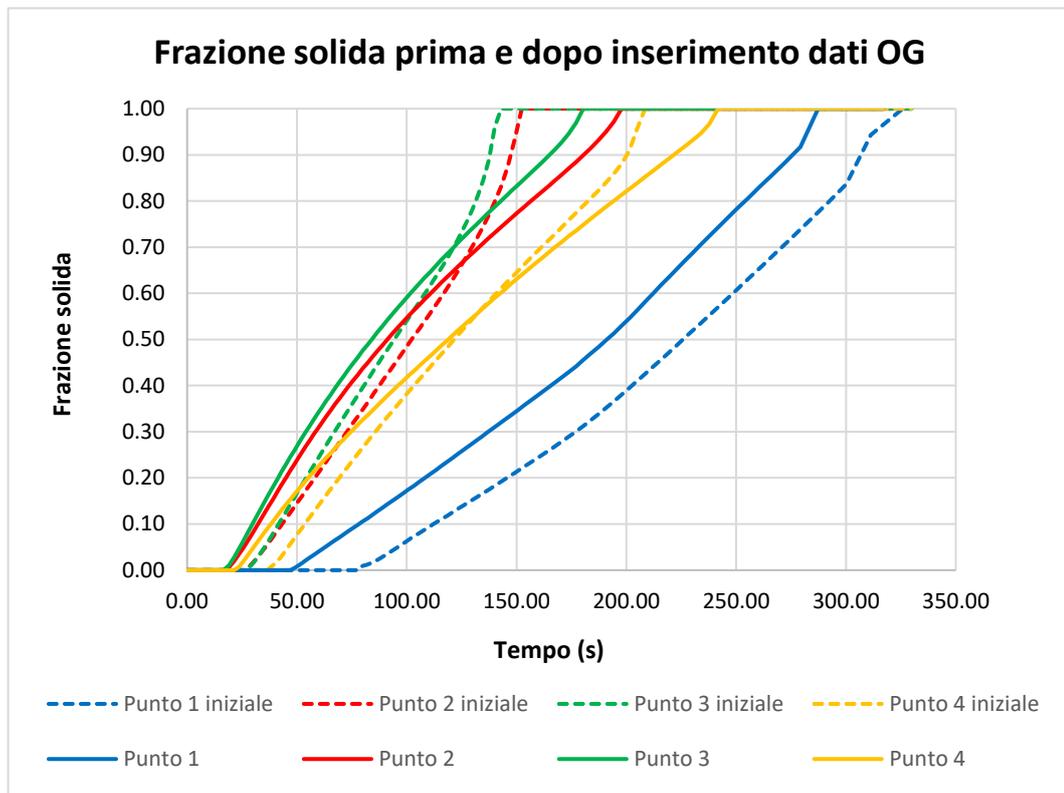


Figura 53: Grafici di confronto frazione solida per la lega in oro giallo prima (curve tratteggiate) e dopo (curve continue) l'inserimento dei dati in ProCAST

Come confermato dalle curve della frazione solida sopra riportate, le zone 2, 3, 4 sono caratterizzate da un tempo maggiore di transizione liquido-solido in confronto con le rispettive del materiale iniziale; quelle della zona 1 invece hanno un andamento molto simile.

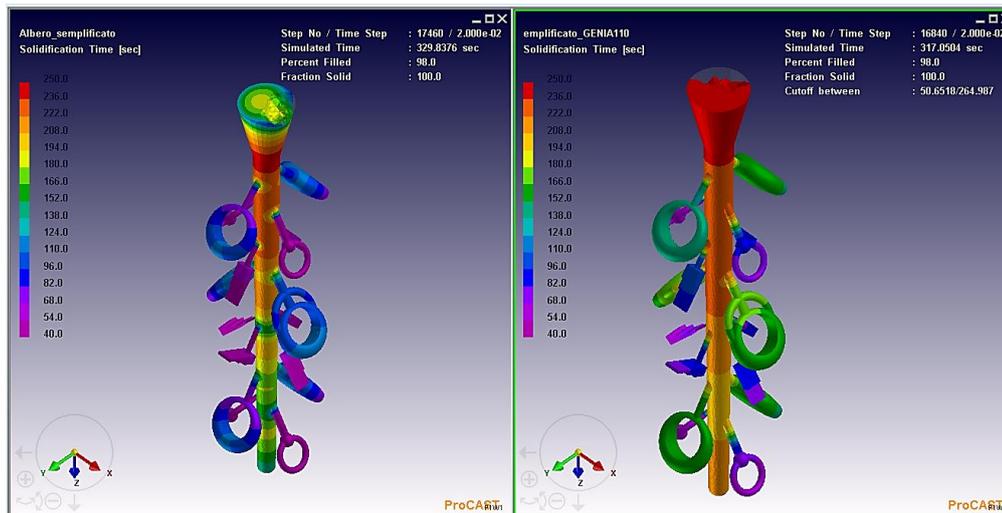


Figura 54: Tempo di solidificazione a confronto per la leghe in oro giallo prima (sinistra) e dopo (destra) inserimento dei nuovi parametri.

Confrontando i risultati riguardanti il tempo di solidificazione si può notare come, mantenendo la stessa scala di tempi, nel caso della simulazione iniziale riportata a sinistra, questi siano in media più bassi di 50 secondi circa per le zone analizzate.

3.3.3 Analisi porosità

Fatta un'analisi preliminare del ciclo di cottura del rivestimento, dopo aver inserito i nuovi valori per le proprietà nel database, si è passati allo studio dei risultati ottenuti dalle simulazioni per le due leghe preziose. Per entrambe, i parametri principali che sono stati inseriti nel software sono quelli che vengono usati in azienda solitamente, ovvero una temperatura dello stampo di 730°C, una temperatura di colata per il metallo di 1050°C, e un $\Delta P = 0,25$ bar tra le due camere.

L'uniformità dei tempi di solidificazione e la possibile generazione di difetti nei gioielli, sono gli aspetti sui quali viene posta maggiore attenzione ogni volta che si sperimenta una nuova geometria, sia del gioiello che del sistema di alimentazione, o quando si vogliono inserire nuove condizioni di processo. L'analisi dei risultati ottenuti dal software in tal senso, rappresentano i criteri più immediati per effettuare eventuali correzioni da apporre prima che gli elementi vengano avviati alla produzione.

Lega Oro Rosso (GENIA 169)

I risultati ottenuti dalla simulazione per questa lega, forniscono un profilo di solidificazione e distribuzione di porosità come riportato in Figura 55(a) e 55(b) rispettivamente.

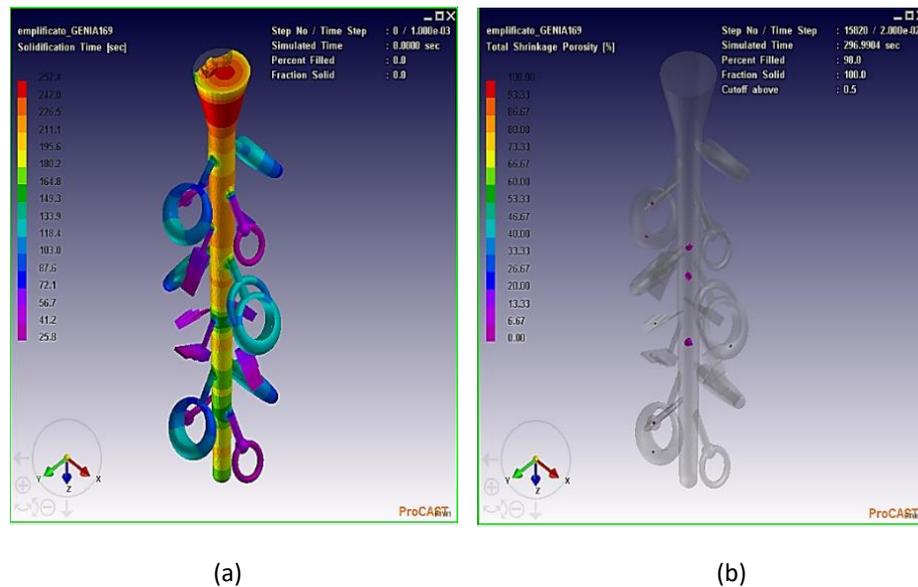


Figura 55: Tempo di solidificazione dell' albero semplificato in OR (a), e sua porosità (b)

Si può notare come nelle zone in cui il tempo di raffreddamento non è graduale nella direzione dell'albero si vengano a creare, secondo il software, delle porosità da ritiro: qui infatti la zona di alimentazione si raffredda prima di tutto il pezzo

Vengono riportati in Figura 56 dei particolari dell'albero e delle loro porosità.

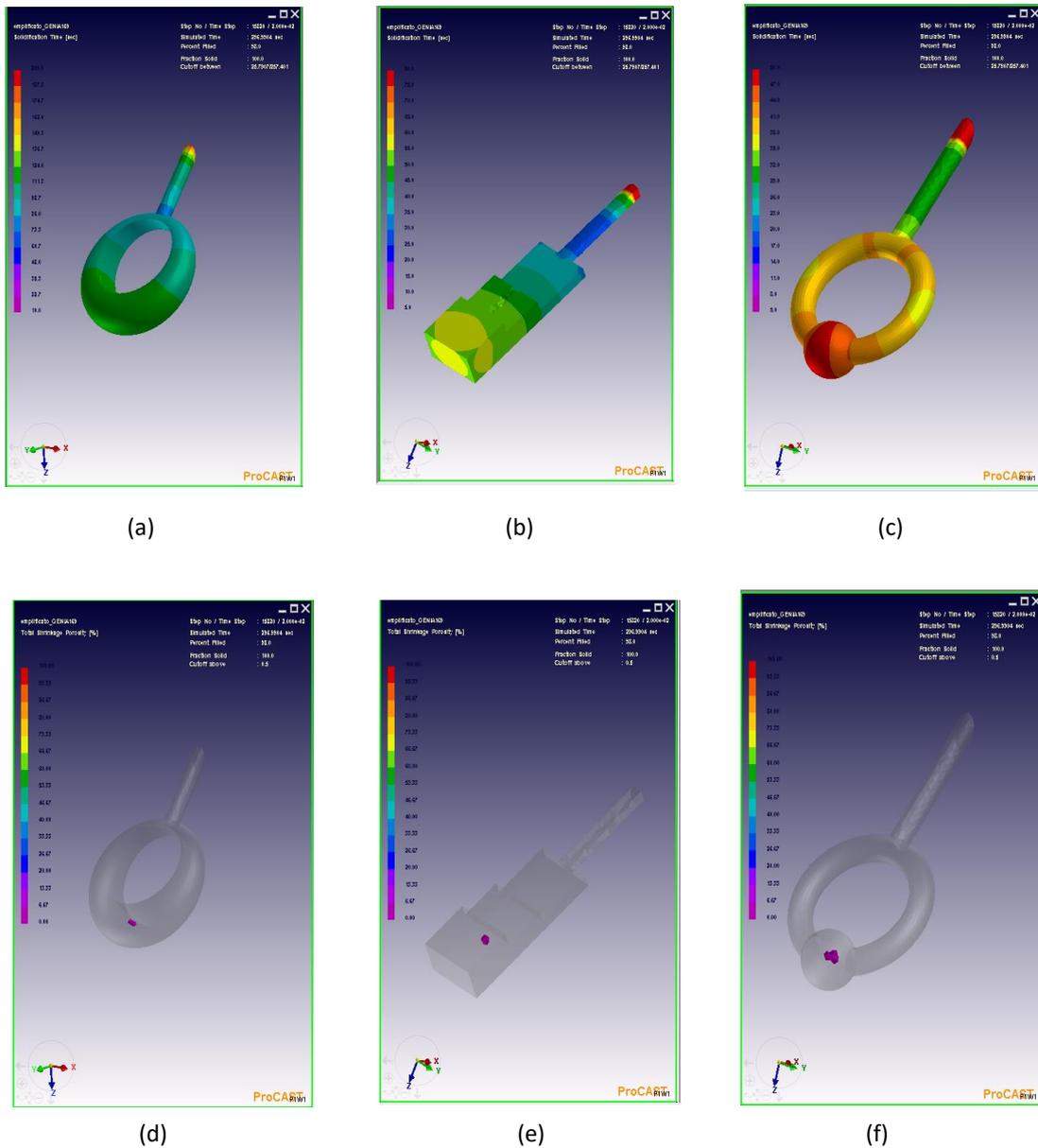


Figura 56: Tempo di solidificazione(a), (b), (c) e porosità (d), (e), (f) dei pezzi 1, 2 e 3 rispettivamente

Secondo il software il sistema di alimentazione per questi pezzi, non risulta dunque idoneo per la loro geometria. Analizzando il tempo di solidificazione del pezzo 1, ad esempio, si nota che la zona di alimentazione si raffredda più velocemente di quella lontano da essa: questo comporta una mancata capacità di continuo apporto di metallo durante la fase di ritiro per raffreddamento, con conseguente generazione di porosità.

Stessa cosa negli altri due casi dove il sistema di alimentazione si trova più lontano dalla zona con maggiore spessore.

La porosità che si origina è generalmente di natura dendritica. Come specificato in [15], la crescita dendritica è il meccanismo più comune di solidificazione nei metalli e nelle leghe. Quando durante il raffreddamento si creano delle zone dove l'alimentazione di metallo non è più attiva, ma la solidificazione del pezzo non è ancora terminata, si genera una porosità proprio tra i rami dendritici

Si è verificata dunque la presenza di difetti nei pezzi prodotti nelle zone indicate dalla simulazione.

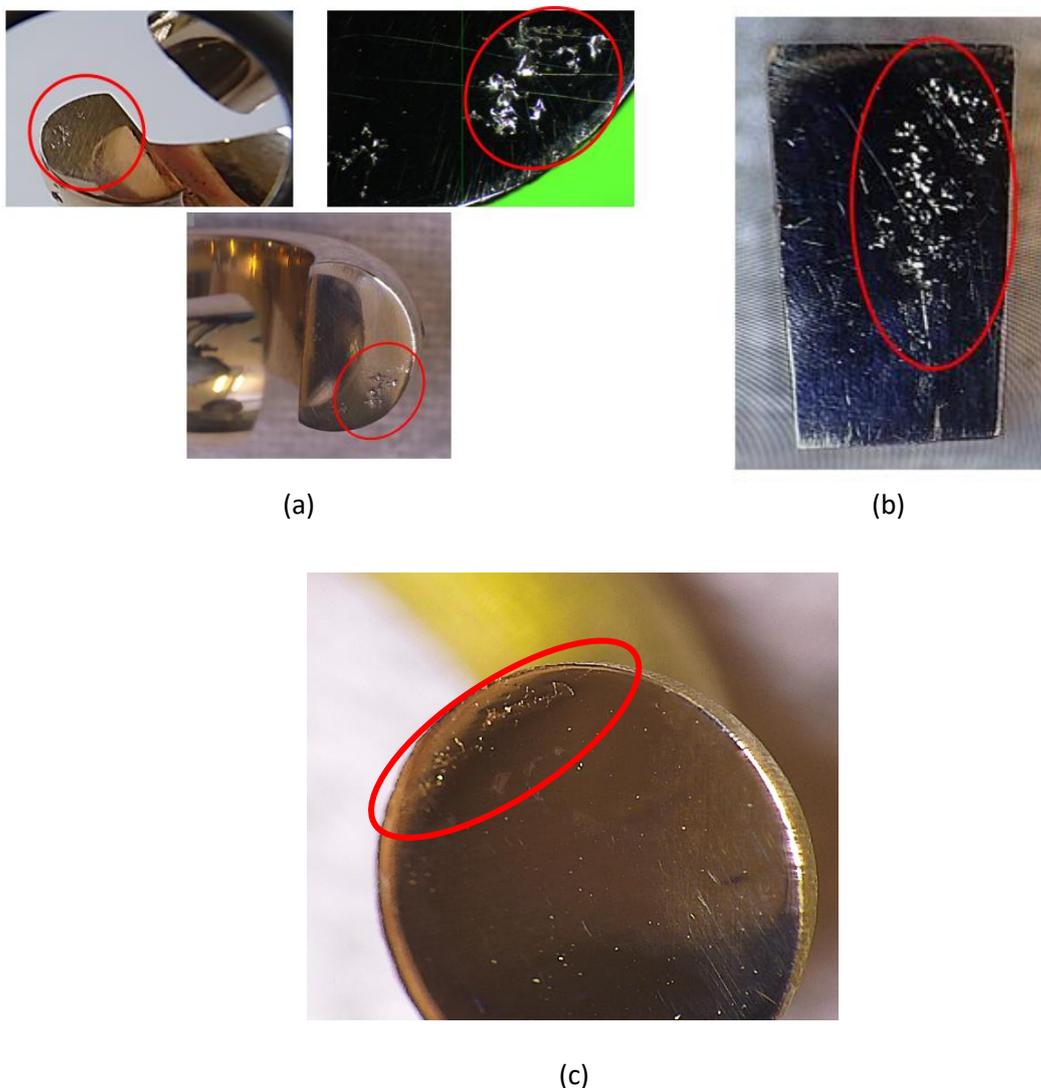


Figura 57: Porosità riscontrata nel pezzo 1(a), nel pezzo 2 (b) e nel pezzo 3 (c)

Sezionando gli elementi nelle zone di interesse, sono molto visibili le porosità da ritiro all'interno del pezzo 1 e del pezzo 2. Anche nel pezzo 3 questo difetto è presente all'interno della testa sferica, anche se non nella zona centrale. Quest'ultimo inoltre mostra un'ulteriore porosità diffusa su tutta la sezione, apparentemente dalla forma più regolare e sferica, e che è in genere associabile non tanto ad un ritiro, quanto alla generazione e successiva inclusione di gas. Questo è dovuto alle elevate temperature del rivestimento che, se mantenute per molto tempo, favoriscono l'insorgenza di fenomeni di decomposizione dello stesso. Il software di simulazione non è in grado di segnalare in modo diretto tale porosità, che può essere ricavata andando a fare una mappa (virtuale) del comportamento del rivestimento nella fase di colata e successivo raffreddamento.

Legg Oro Giallo (GENIA 110)

Vengono riportati i risultati sul tempo di solidificazione e porosità ottenuti per la lega in oro giallo (GENIA 110).

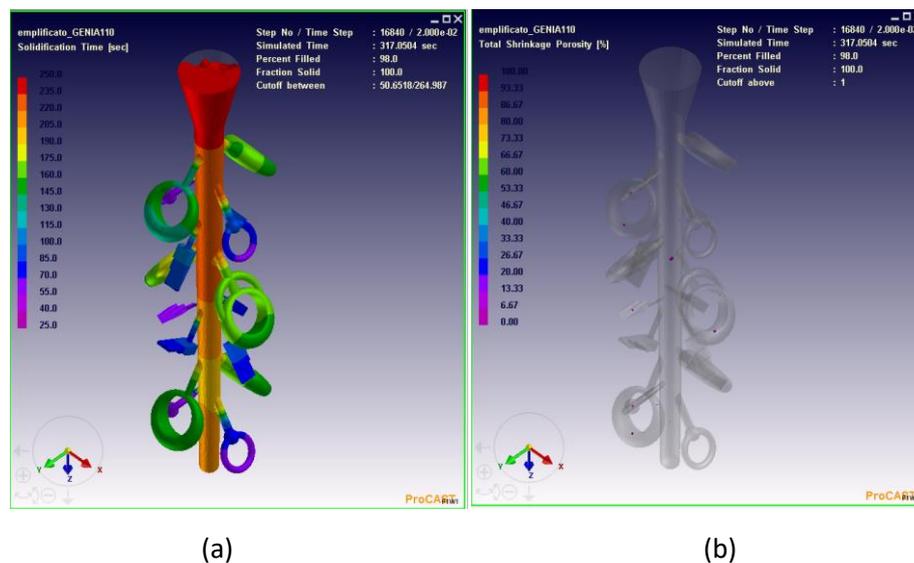


Figura 58: : Tempo di solidificazione dell' albero semplificato in OG (a), e sua porosità (b)

Gli elementi che presentano dei difetti risultano gli stessi della simulazione impostata con la lega in oro rosso, a causa sempre di un sistema di alimentazione non corretto. Un'altra cosa che si può notare è che i tempi di solidificazione, riferiti a pezzi corrispondenti tra i due casi, sono più elevati: l'intervallo di transizione per la lega in oro

giallo infatti, si è visto essere molto più ampio rispetto a quello di GENIA 169. Questo può essere anche il motivo per cui i tempi di solidificazione risultano più omogenei per il singolo elemento.

In Figura 59 si riportano gli stessi elementi analizzati precedentemente, che mostrano generazione di porosità da ritiro.

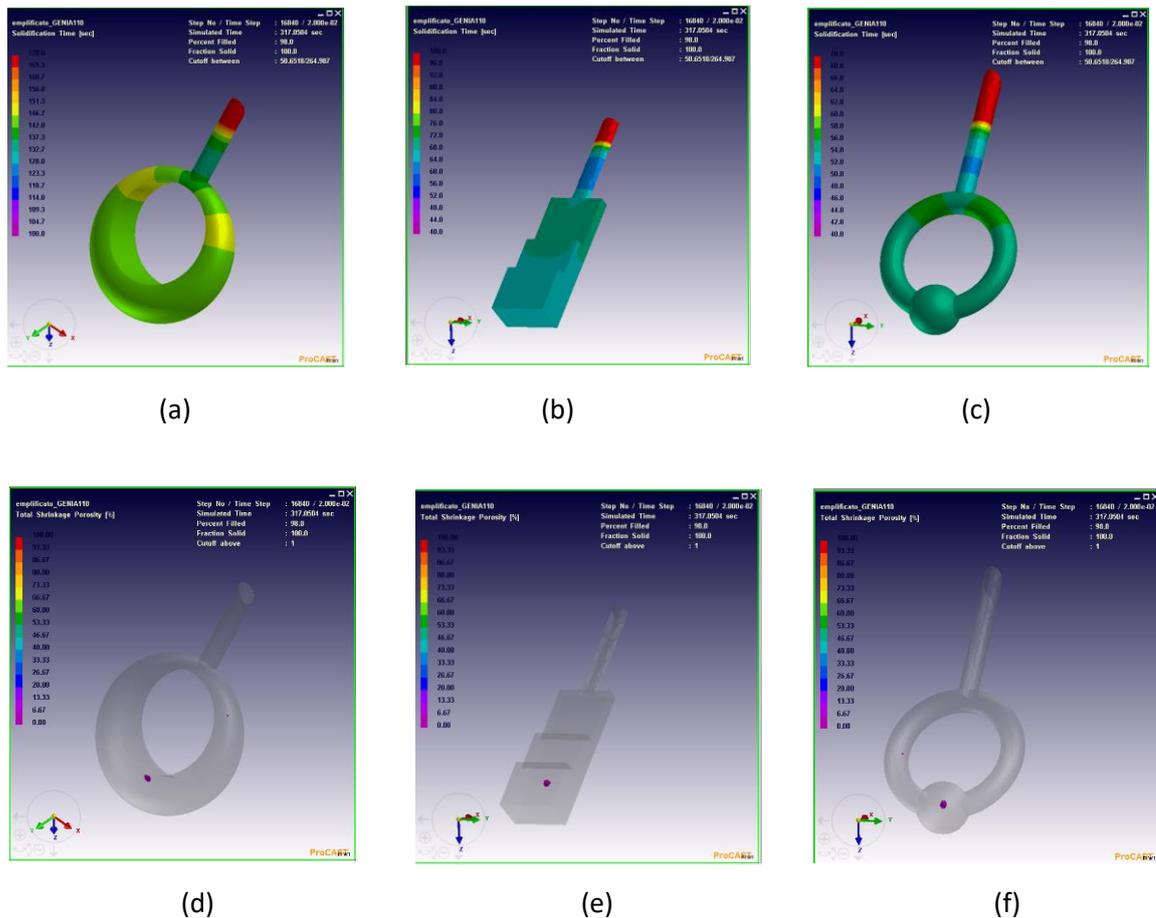
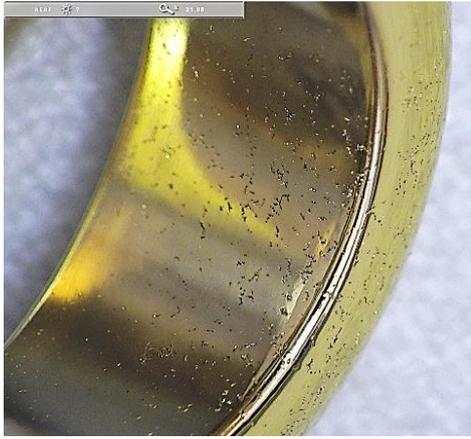
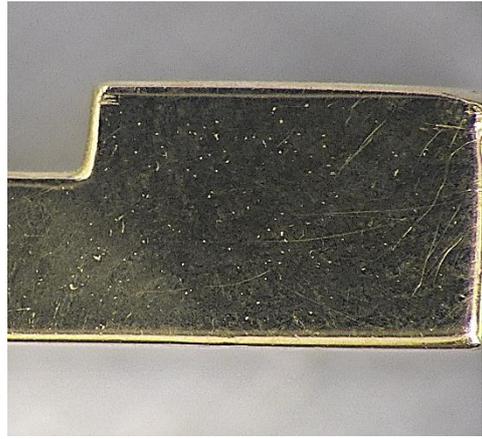


Figura 59: Tempo di solidificazione(a), (b), (c) e porosità (d), (e), (f) dei pezzi 1, 2 e 3 rispettivamente

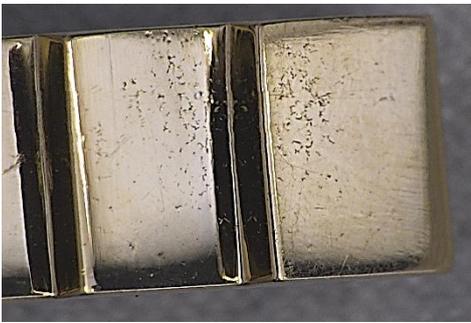
Vengono riportate in Figura 60 alcune foto effettuate per la verifica della presenza delle porosità riscontrate dalla simulazione. In particolare la foto in Figura 60 (a) è riferita al pezzo 1, quelle in 60 (b) e (c) al pezzo 2 da una vista laterale e superiore rispettivamente, ed infine le ultime tre foto sono riferite al pezzo 3 prima (f) e dopo averlo sezionato (d) (e).



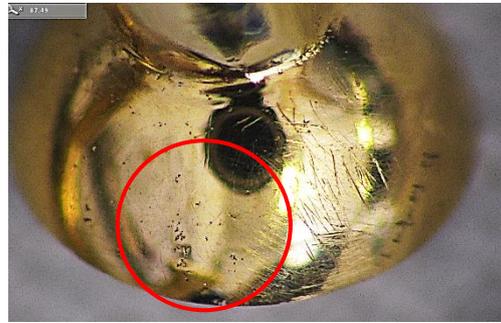
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 60: Porosità riscontrata nei pezzi 1(a), pezzo 2(b, c) e pezzo 3(d, e, f)

Si può notare che, questa volta, le porosità sono molto più diffuse rispetto al caso della lega in oro rosso e visibili anche senza sezionare i vari pezzi. Mentre però nel pezzo 1 sembrano prevalere quelle di natura dendritica, nate per la non idoneità del sistema di alimentazione, nei pezzi 2 e 3 è evidente la presenza di porosità da gas. In particolare per il pezzo 2 queste risultano diffuse in tutta la parte laterale del pezzo (Figura 60 (b)), mentre la parte superiore sembra caratterizzata da difetti dovuti al ritiro (Figura 60 (c)). Per quanto riguarda il pezzo 3 invece, esternamente è caratterizzato da un'elevata quantità di porosità da gas come mostrato in Figura 60 (d) e 60 (f), mentre sezionandolo si può notare lateralmente la presenza di difetti legati alla solidificazione e che erano stati segnalati dai risultati del simulatore.

La temperatura a cui viene mantenuto il rivestimento durante la fase di colaggio risulta dunque troppo eccessiva, specialmente per pezzi massivi come quelli in esame, dove lo smaltimento del calore avviene più lentamente e dove quindi è maggiore il rischio della sua decomposizione

3.3.4 Analisi profili di solidificazione

Come già anticipato, per la lega in oro rosso, oltre lo studio sui difetti riscontrabili nei pezzi, è stata fatta un'analisi dettagliata sui profili di temperatura durante la fase di solidificazione. Vengono ora riportate le curve ottenute dai dati raccolti dalle 4 termocoppie, a confronto con quelle elaborate dal software nelle 4 zone indicate dalla Figura 43.

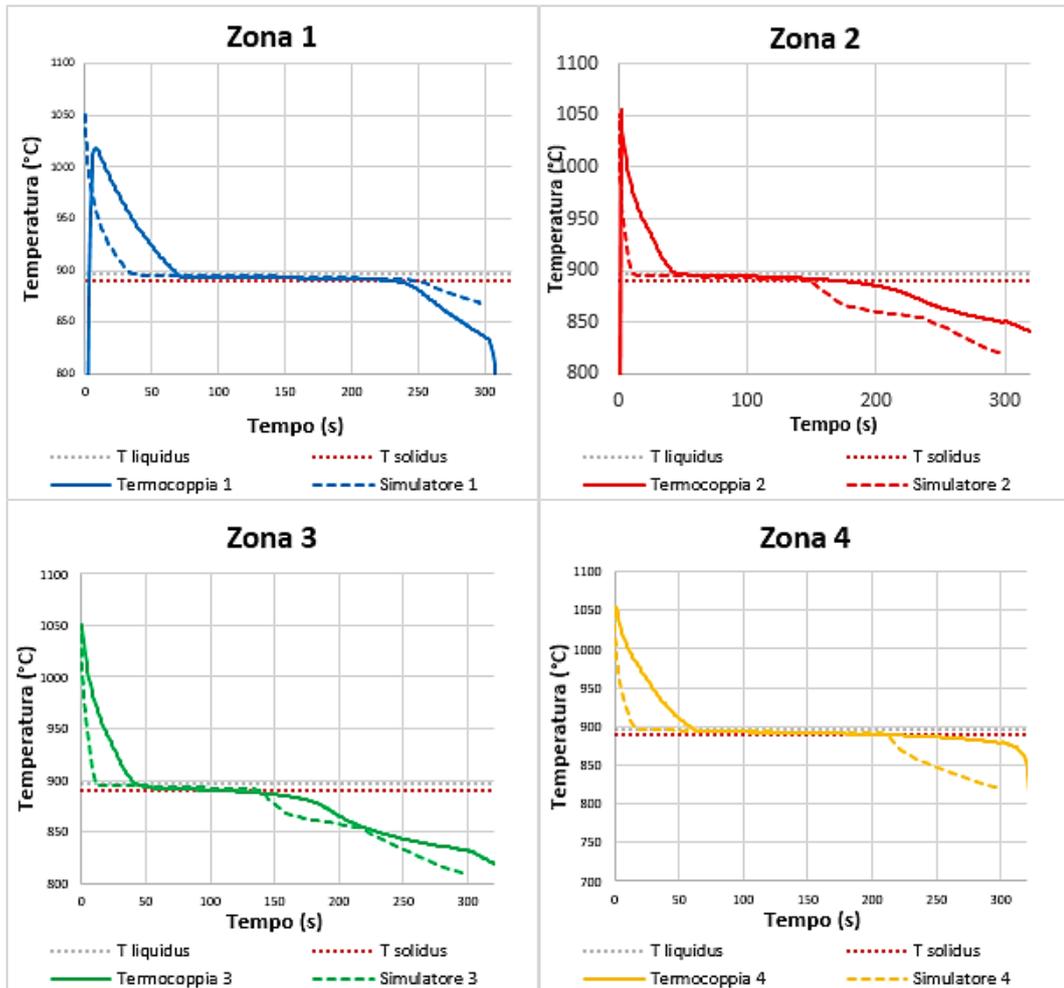


Figura 61: Profili di temperatura a confronto nelle 4 zone analizzate per la lega in oro rosso

Sono inserite nello stesso grafico le curve ricavate nelle zone corrispondenti, tratteggiate quelle estrapolate dal simulatore e continue quelle raccolte dal registratore di dati a cui erano collegate le termocoppie. In questo ultimo caso si sono presi in considerazione i dati per un periodo di tempo limitato: in particolare si è considerato come momento iniziale quello in cui almeno una termocoppia ha registrato la temperatura di

colaggio. Le prime a raggiungere i 1050°C sono state la termocoppia 4 e 3. La prima termocoppia, inserita nella parte più vicina all'ingresso del metallo, sembra non raggiungere mai questo valore. Nel simulatore si ipotizza però che tutte partano da questa temperatura e che queste inoltre lo facciano nello stesso momento. I tempi di riempimento secondo il simulatore, sono dell'ordine di 0,7 s: sarebbe difficile cogliere delle differenze in tal senso con l'uso di termocoppie che registrano i valori di temperatura ogni secondo.

Tutte le curve presentano una discesa molto rapida nei primi secondi, fino a raggiungere una certa stabilità arrivate alla temperatura di liquidus. Quello che si può notare però è che in tutte le zone le termocoppie hanno registrato questa temperatura per tempi più elevati rispetto a quelli segnalati dalla simulazione di circa 30-40 secondi. Questo può essere dovuto a una discordanza di proprietà del materiale refrattario ad alta temperatura, tra quello inserito nel database del software e quello realmente utilizzato: mentre per la lega l'errore, come già specificato, può essere considerato minimo, quello del rivestimento potrebbe essere maggiore proprio per la mancanza di specifiche riguardanti le sue caratteristiche, come densità e conduttività.

Dopo aver atteso 3 minuti circa per un raffreddamento in camera, il cilindro viene prelevato dal forno e spento in acqua per evitare, come già ricordato in precedenza, la formazione di intermetallici infragilenti. Questa fase è visibile nella zona 1 e nella zona 4, quelle più esterne, dove le termocoppie hanno registrato una discesa molto rapida della temperatura nella parte finale, legata al contatto del cilindro con acqua.

Analizzando singolarmente le zone studiate si può notare come nella zona 1 la termocoppia non abbia nemmeno registrato la temperatura di 1050 °C: questo può essere dovuto al fatto che ci sia una maggiore influenza dell'ambiente esterno, ma anche dal fatto che le termocoppie hanno una frequenza di registrazione della temperatura di 1 secondo, tempo che il simulatore calcola essere sufficiente per un raffreddamento di circa 30°C nella parte iniziale. Si può supporre quindi che la temperatura di 1050°C sia stata in realtà raggiunta, ma che non sia stato registrato il valore più elevato. Nella parte finale inoltre, il simulatore non tiene conto del fatto che il cilindro viene immerso in acqua, registrando un raffreddamento più lineare. Si può notare infine come il tempo di transizione liquido-solido nella zona 1 sia più breve rispetto a quello calcolato dal software: in questo ultimo caso infatti il tempo viene sovrastimato di circa 50 secondi.

Nella zona 2 invece l'andamento delle curve risulta molto simile: il tempo di permanenza nella zona di transizione però viene sottostimato dal software di circa 25 secondi, dovuto probabilmente sempre ad una discordanza dei dati relativi al gesso rispetto a quello utilizzato. Come già ricordato, nel caso reale, si ha una traslazione nel tempo dell'inizio della solidificazione; la caduta di temperatura è meno ripida rispetto a quella calcolata. La curva inoltre si mantiene costante per alcuni secondi anche al di sotto della temperatura di solidus: si può supporre che nella realtà la composizione non sia risultata completamente omogenea lungo l'albero o che siano presenti delle piccole impurezze.

La zona 3 risulta quella con una maggiore corrispondenza tra il processo reale e ciò che è stato ricavato dalla simulazione. Anche in termini di tempi di transizione le due curve risultano molto simili, l'unica differenza è nel punto di inizio della fase di solidificazione, come già esposto.

Per quanto riguarda la zona 4, nell'ultima parte della curva, si nota una brusca diminuzione di temperatura, associabile all'immersione in acqua del cilindro e al fatto che la quantità di materiale refrattario che la separa dall'esterno è minore, e che quindi, sciogliendosi più facilmente, fa risentire in maniera più marcata della variazione di temperatura. Anche in questo caso la temperatura si mantiene costante per valori più bassi di $T_{sol.}$, probabilmente legato ad una disomogeneità composizionale, rendendo i tempi di solidificazione maggiori.

3.3.5 Variazione dei parametri

Si analizzano ora i risultati ottenuti impostando simulazioni per la lega in oro rosso in cui è stato modificato un parametro tra temperatura del metallo, temperatura del refrattario e differenza di pressione tra le due camere del forno, lasciando di volta in volta gli altri costanti.

Partendo da una variazione della temperatura del metallo al momento della colata, si riportano i tempi di solidificazione e le porosità delle tre simulazioni in cui si sono impostate $T_{colata} = 1000^{\circ}\text{C}$, 1050°C , 1100°C , mantenendo $T_{flask} = 730^{\circ}\text{C}$ e un $\Delta P = 0,25$ bar.

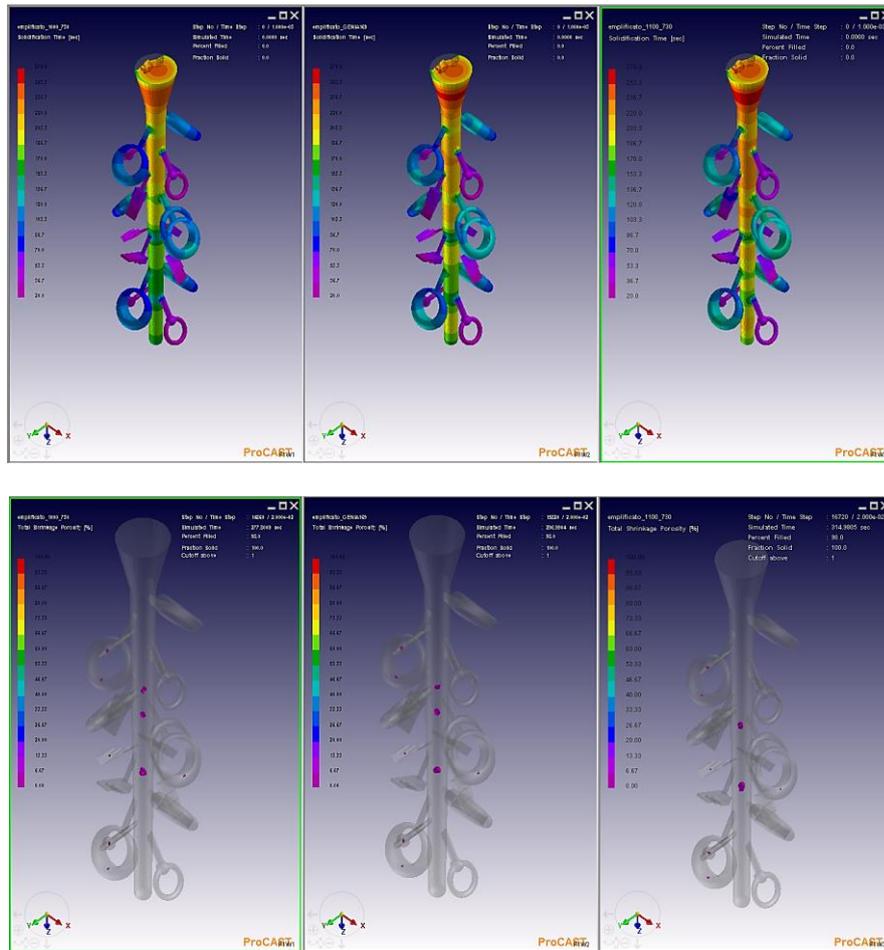


Figura 62: Tempo di solidificazione (sopra) e porosità (sotto) a temperatura del metallo crescente da sinistra a destra

In questo caso si possono notare solo delle piccole variazioni nei tempi di solidificazione, che aumentano leggermente al crescere della temperatura. Le porosità da ritiro invece non presentano sostanziali differenze. Non si può variare di molto il valore di questo parametro in quanto dal produttore viene consigliato di mantenersi al di sopra della T_{liq} di almeno 100-150°C per avere una corretta solidificazione; una temperatura troppo alta invece non sarebbe utile al fine di migliorare la qualità dei gioielli.

Si è passati dunque ad impostare altre tre simulazioni variando la temperatura del materiale refrattario: i valori sono stati $T_{flask} = 550^{\circ}\text{C}$, 620°C , 730°C , con una temperatura fissa del metallo a 1050°C e un $\Delta P = 0,25$ bar. I tre valori sono stati scelti considerando i gli estremi di temperatura con un cui generalmente si lavora, ed uno intermedio tra le due. Riscaldare il rivestimento al di sopra di 730°C porterebbe sicuramente alla sua

decomposizione, mentre al di sotto di 550°C la velocità di raffreddamento della lega sarebbe molto elevata, così come lo shock termico.

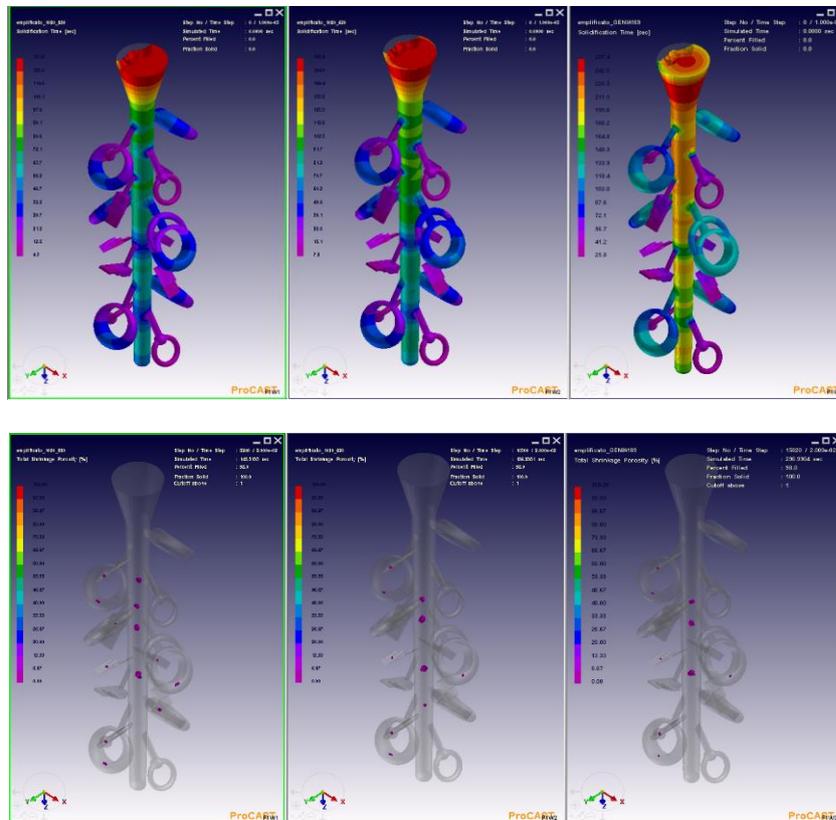
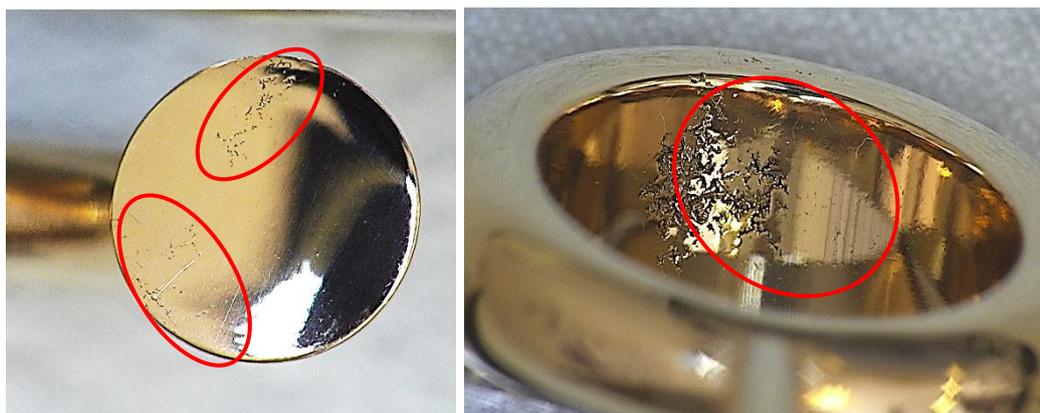


Figura 63: Tempo di solidificazione (sopra) e porosità (sotto) a temperatura del materiale refrattario crescente da sinistra a destra

Come si può notare, la variazione della temperatura del materiale refrattario incide in modo maggiore sui tempi di solidificazione: da sinistra a destra infatti, per zone corrispondenti, se ne ha un notevole aumento. Le zone interessate da porosità sono all'incirca le stesse, ma l'entità del difetto appare maggiore. Si è proceduto dunque ad una verifica di alcuni elementi dell'albero in lega in oro rosso, ottenuti da una colata in cui il materiale refrattario è stato sottoposto ad un ciclo termico che lo ha portato ad una temperatura massima di 550°C e non 730°C.



(a)

(b)



(c)

Figura 64: Porosità riscontrate in elementi ricavati da una colata con temperatura del refrattario a 550°C

I pezzi riportati in 64 (a) e 64 (b) sono stati già analizzati precedentemente come elementi soggetti a porosità; in questo caso però è evidente come l'entità del difetto sia aumentata rispetto ai medesimi riportati in Figura 57(a) e 57(b). In 64(b) è visibile ad occhio nudo la solidificazione di natura dendritica che lo ha caratterizzato: la mancanza di apporto di metallo, legata ad un raffreddamento più elevato è stata molto più importante che nel caso già analizzato. Osservando la Figura 65 infatti si notano zone che terminano la solidificazione in meno di 10 secondi, cosa che non avviene nel gesso portato a 730°C. Nel caso del pezzo in Figura 64 (c) si è osservata una porosità meno grave ma diffusa in tutto il gioiello.

Infine si sono mantenute le stesse temperature del metallo e del cilindro per le tre simulazioni, variando il valore della differenza di pressione tra una camera e l'altra e quindi la portata della lega. Quelli riportati nella figura sottostante sono il tempo di solidificazione e porosità con un ΔP crescente da sinistra a destra.

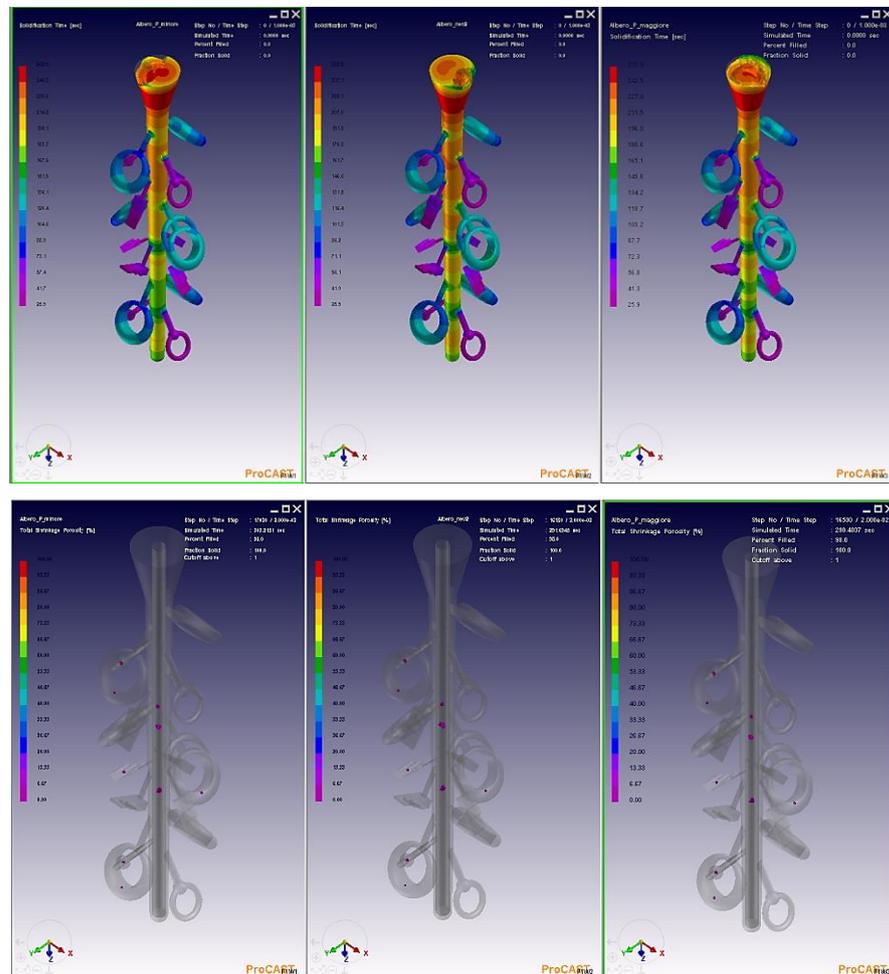


Figura 65: Tempo di solidificazione (sopra) e porosità (sotto) a differenza di pressione crescente da sinistra a destra

Anche in questo caso non si sono notate sostanziali differenze relativamente ai tempi di solidificazione e porosità da ritiro generate.

3.3.6 Analisi albero di produzione

Come già descritto precedentemente, dopo un'analisi termica della solidificazione per l'albero semplificato, si è studiato un caso un po' più complesso, che riproducesse in maggior misura le condizioni reali di produzione, ovvero quelle in cui i pezzi montati sullo stesso albero sono in numero superiore e più ravvicinati tra di loro. La geometria e la posizione in cui sono state inserite le termocoppie sono state riportate precedentemente in Figura 44.

I risultati ottenuti vengono riportati di seguito. Per ogni zona sono state rappresentate con curve continue i dati raccolti dalle termocoppie, mentre con curve tratteggiate quelle ricavate dalla simulazione.

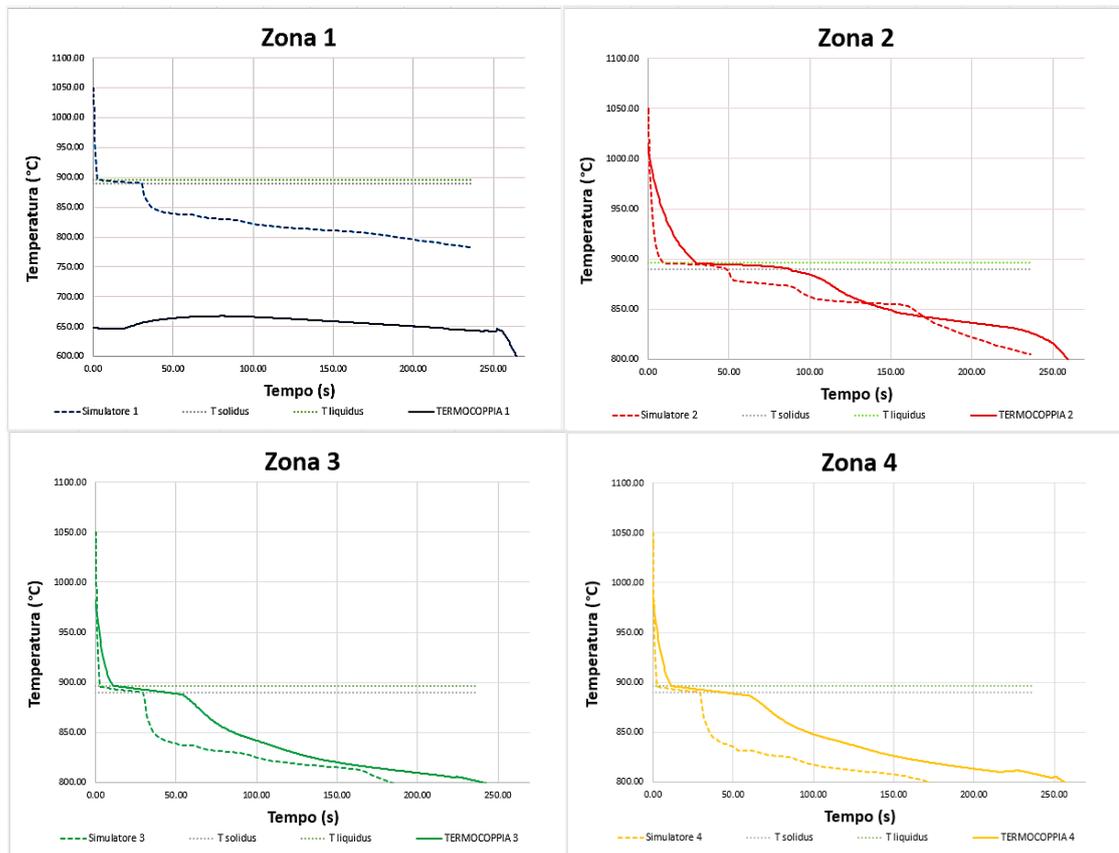


Figura 66: Profili di temperatura a confronto nelle 4 zone analizzate per l'albero di produzione

Come si può notare dal grafico riferito alla zona 1, durante la prova la termocoppia 1 non ha registrato dei valori relativi al metallo ma al materiale refrattario. Questa probabilmente si è distaccata dal modello in cera durante la movimentazione del cilindro,

rimanendo bloccata all'interno del rivestimento stesso e rilevando così la sua temperatura durante il raffreddamento. Grazie a questa termocoppia però si è potuto notare che la temperatura del gesso si è abbassata di molti gradi, fino ad arrivare a 660°C. L'operazione di trasporto del cilindro dal forno alla camera è generalmente molto rapida, ma può portare comunque ad una diminuzione della sua temperatura, anche se in modo contenuto. In questo caso però la presenza delle termocoppie ha creato difficoltà nell'alloggiamento del cilindro in maniera corretta, tanto da far abbassare la temperatura del materiale refrattario fino a questo valore. Si è preferito dunque confrontare i dati ottenuti da questa prova, con una simulazione dello stesso albero di produzione, dove però la temperatura del materiale refrattario è stata impostata a 660°C, in modo da rendere più corretto il confronto.

Facendo riferimento alle altre 3 zone invece, è stato considerato come tempo iniziale da cui far partire le curve registrate dalle termocoppie, quello in cui è stata letta la temperatura più alta, ovvero 1020°C circa dalla termocoppia 2. Questa infatti era posizionata nella zona più vicina al canale principale di alimentazione, ricevendo così per prima il metallo rispetto alle altre zone. C'è da notare però che nessuna delle termocoppie ha registrato la temperatura massima, ma anzi, le altre due hanno riportato come temperatura più alta un valore appena sotto i 1000°C. Ciò può essere dovuto ad uno scambio termico elevato tra lega e rivestimento, e al fatto che le termocoppie 3 e 4 siano state inserite nella zona più esterna del bracciale, lontana quindi dal canale centrale più caldo e immersa completamente nel materiale refrattario. Nel caso dei risultati del simulatore questo però non si verifica, tutte le zone partono dal valore massimo.

Analizzando i profili di temperatura delle zone 2, 3 e 4 si può notare come in tutti e tre i casi la velocità di raffreddamento nella parte iniziale sia più veloce nel caso dei risultati ottenuti dal software: questo era stato notato anche precedentemente, nel caso dell'albero semplificato, ed è probabilmente legato a differenze sulle caratteristiche del gesso a quelle temperature. Si analizzano ora le singole zone.

Nella zona 2 si può notare il maggiore discostamento nella parte iniziale tra le due curve: il fatto di trovarsi in una posizione centrale e vicino alla zona di alimentazione principale fa trattenere il calore maggiormente. Anche la transizione liquido-solido avviene in tempi più lunghi: la simulazione li sottostima di circa 20 secondi.

Le zone 3 e 4, invece risultano sostanzialmente uguali: la simulazione infatti restituisce delle curve molto simili e questo viene confermato dalle due termocoppie che hanno registrato curve altrettanto paragonabili. In entrambi i casi però i tempi della transizione sono in realtà maggiori di circa 20 secondi rispetto a quelli calcolati.

Si riporta in Figura 67 il tempo di solidificazione per i tre pezzi in esame. Questi non presentano grandi differenze; solo il pezzo più vicino alla zona di ingresso riporta tempi leggermente minore di solidificazione, probabilmente per la vicinanza con l'esterno e quindi soggetto ad uno smaltimento del calore più veloce. Gli elementi inoltre non hanno mostrato generazione di porosità da ritiro.

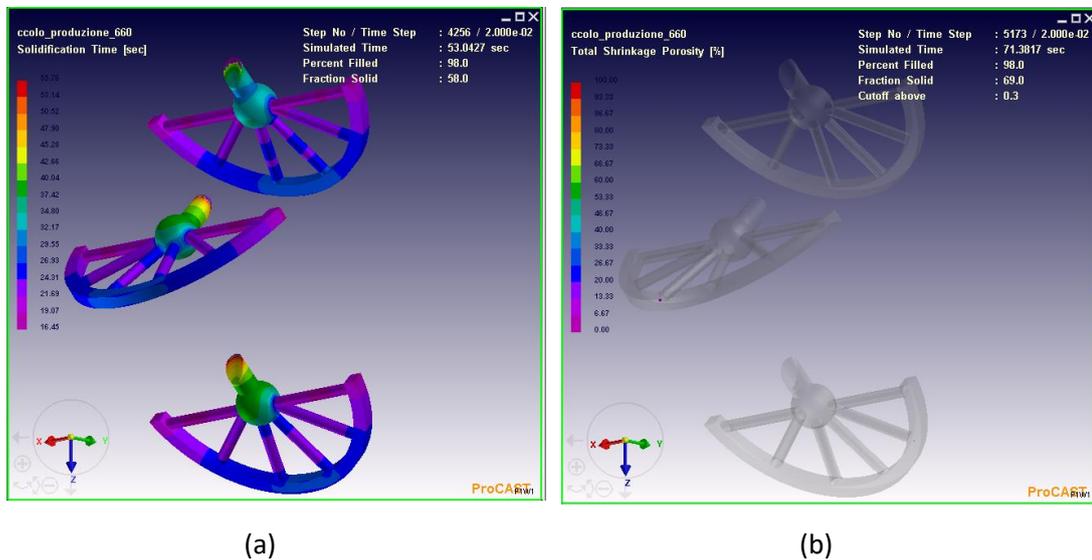


Figura 67: Tempo di solidificazione (a) e porosità dell'albero di produzione (b)

3.3.7 Aspetti fluidodinamici

Per quanto riguarda la parte della fluidodinamica si sono fatte delle considerazioni esclusivamente basate sui risultati ottenuti tramite simulatore e su dati presenti in letteratura. Analisi più specifiche su questo aspetto infatti sono state riportate in [11] e in [16]: nel primo caso si è trattata in maniera generale la fluidodinamica all'interno del canale di alimentazione, mentre nel secondo sono stati studiati e confrontati i tempi di riempimento di tre software per la simulazioni di colata, tra cui ProCAST, comparandoli con dati reali ricavati grazie ad un acquirente di dati ad alta frequenza. In [11] si fa in particolare riferimento a quali siano gli aspetti che possono influenzare il metallo in

entrata: avere un suo flusso laminare, con solo piccole turbolenze, permette di evitare inclusioni gassose, erosione del materiale refrattario, e di avere una perdita di temperatura minore con un conseguente miglior riempimento, specialmente dei pezzi sottili. Il flusso dipende da vari fattori, come la geometria del canale principale e di quelli di alimentazione, dal design degli elementi e dalla loro posizione nell'albero, dai parametri di processo e dalla velocità di colaggio.

Proprio relativamente a questo ultimo aspetto, come già detto, ProCAST non permette di inserire un profilo di pressione che vada a riprodurre esattamente la situazione reale, ed è stato quindi necessario calcolare delle velocità di uscita che andassero ad approssimarla. Ovviamente quest'ultima dipende anche dalla grandezza del foro di uscita del crogiolo: averne uno più grande da una parte permette al metallo di completare il riempimento in meno tempo e quindi di avere una diminuzione della temperatura meno importante, favorendo un corretto riempimento dei pezzi, ma dall'altro lato averne uno più piccolo rende il flusso più regolare [11]. Nel caso in esame la misura del foro di uscita è fissata ad un diametro di 6 mm. Facendo riferimento alle tre simulazioni impostate a velocità diverse trattate nel capitolo 3.3.5, si riporta un confronto dei tempi di riempimento calcolati per esse.

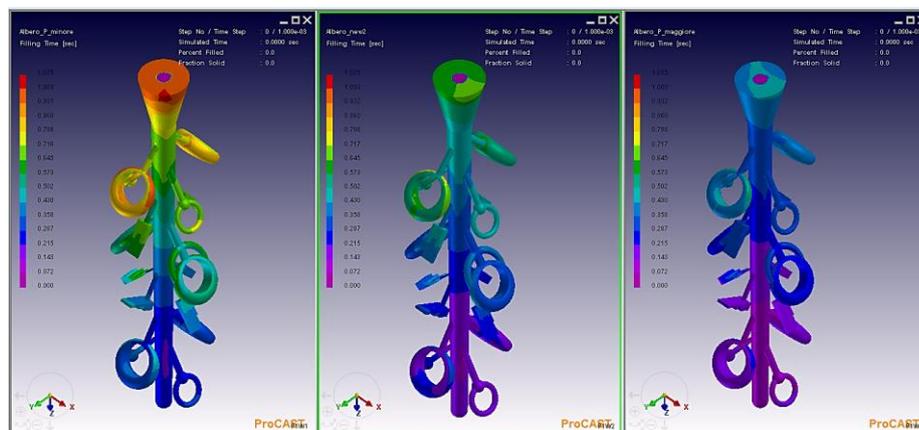


Figura 68: Tempi di riempimento per portate crescenti da sinistra a destra

Portando come riferimento la stessa scala di tempo, si nota come aumentando la velocità, ovvero la differenza di pressione tra le due camere, i tempi di riempimento diminuiscano, passando da un valore di 1,075 s per il primo, ad uno di 0,725 s per il secondo fino a 0,573s per il terzo. Un aspetto da notare e che viene anche riportato in [11], è che la fase di solidificazione non è influenzata dal tempo e dalla velocità di

riempimento: i tempi coinvolti nei due casi sono di ordini di grandezza nettamente differenti.

Per quanto riguarda l'errore sui tempi calcolati invece, ci si può riferire allo studio affrontato in [16], dove Actis Grande e Wannarumon hanno analizzato i risultati ricavati da tre software differenti, confrontandoli con prove sperimentali. In relazione a ProCAST si può affermare che il software fornisce dei tempi abbastanza vicini a quelli di riempimento reali nei primi istanti, con una deviazione di circa il 15%, mentre nei momenti successivi, quando sono gli elementi ad essere coinvolti dal flusso di metallo, si allontana maggiormente dalle informazioni reali ottenute. Questo può essere legato a vari aspetti come alla velocità di entrata, che è comunque ricavata come un'approssimazione, al comportamento non lineare del fluido o anche alle condizioni al contorno inserite.

Infine un altro aspetto da sottolineare è che ProCAST non considera la presenza di una sovrappressione finale di 1,4 bar, che viene mantenuta per 180 secondi dopo il riempimento. Questo può portare a discordanze di risultati per pezzi più complicati di quelli inseriti in questo lavoro, per i quali la sua applicazione, ad esempio, può compensare il ritiro a cui essi sono sottoposti ed evitare così la generazione di porosità, che invece la simulazione riporterebbe.

Capitolo 4 – Caso Studio

Dopo aver esaminato in maniera approfondita il processo di microfusione a cera persa e aver messo in evidenza i punti di forza del software di simulazione nella fase di colaggio, si è focalizzata l'ultima parte del lavoro di tesi sull'analisi dell'intero processo produttivo di un gioiello.

In Figura 69 viene riportato il prodotto in analisi.



Figura 69: Bracciale rigido in oro rosso preso in analisi

Si sono dunque studiati i singoli passaggi che portano alla sua realizzazione, dal disegno CAD, alla fase di colaggio sino alla lavorazione ai banchi, intervenendo, laddove fosse possibile, per ottimizzarne alcuni aspetti.

4.1 Analisi del pezzo

Si tratta di un bracciale rigido in lega in oro rosso. Presenta alle estremità due sedi per l'alloggiamento di pietre, in questo caso madreperla. Nella parte interna due fodere vanno a chiudere il gioiello lasciando uno spazio che permette di intravedere la lucentezza sottostante, conferendo al bracciale una leggerezza che altrimenti non avrebbe se fosse pieno.

Il pezzo è costituito dunque da due parti principali: queste vengono riportate in Figura 70, insieme al sistema di alimentazione originale. La parte esterna presenta delle sedi laterali per poter incastrare i perni presenti ai lati delle fodere e fissarle così insieme.

Sono entrambi delle parti molto sottili ed è importante quindi che il metallo fluisca correttamente in ogni punto e che il sistema di alimentazione garantisca il completo riempimento.

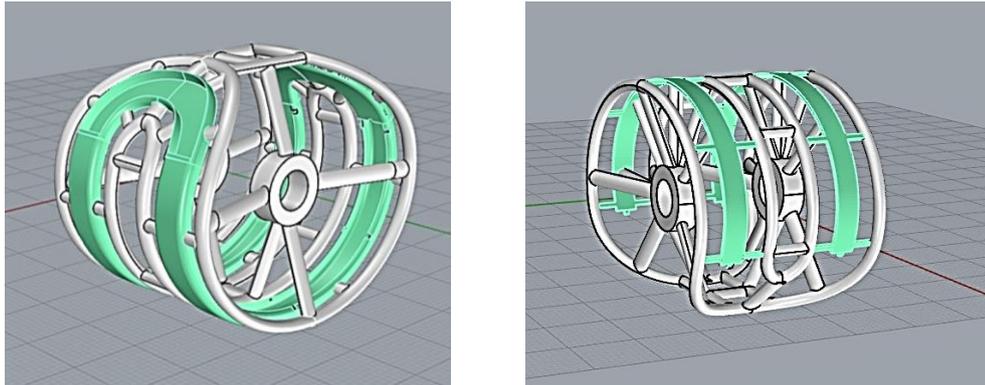


Figura 70: Parti costituenti il bracciale (verde) e loro sistema di alimentazione originale (grigio)

4.2 Processo produttivo

Si analizzano ora i passaggi che caratterizzano il processo attuale di produzione del gioiello in esame.

4.2.1 Disegn e analisi della simulazione

Il gioiello, come già specificato, è costituito da due parti, ognuna delle quali è fornita di un sistema di alimentazione molto complesso, costituito da una quantità di metallo elevata. Osservando la sua geometria, si può notare come questo sia disegnato per alimentare ogni zona in maniera omogenea.

Viene riportata in Figura 71 la geometria dell'albero su cui i due pezzi vengono montati.

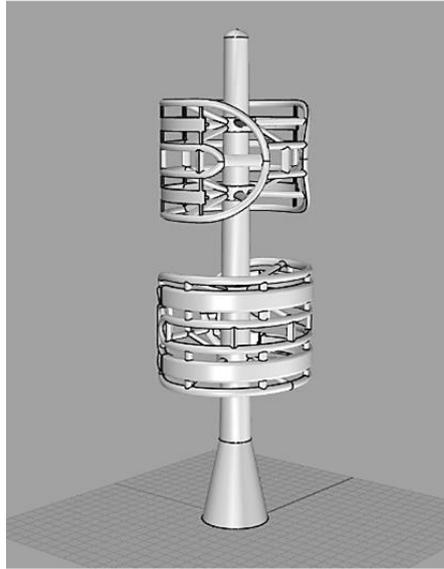


Figura 71: Geometria albero originale

Le condizioni di processo con cui avviene la colata sono quelle utilizzate comunemente in azienda:

- $T_{colata} = 1050^{\circ}\text{C}$
- $T_{flask} = 730^{\circ}\text{C}$
- $\Delta P = 0,25 \text{ bar}$

Si è impostata dunque una simulazione con i seguenti parametri per verificare la presenza di eventuali difetti da solidificazione che potevano originarsi.

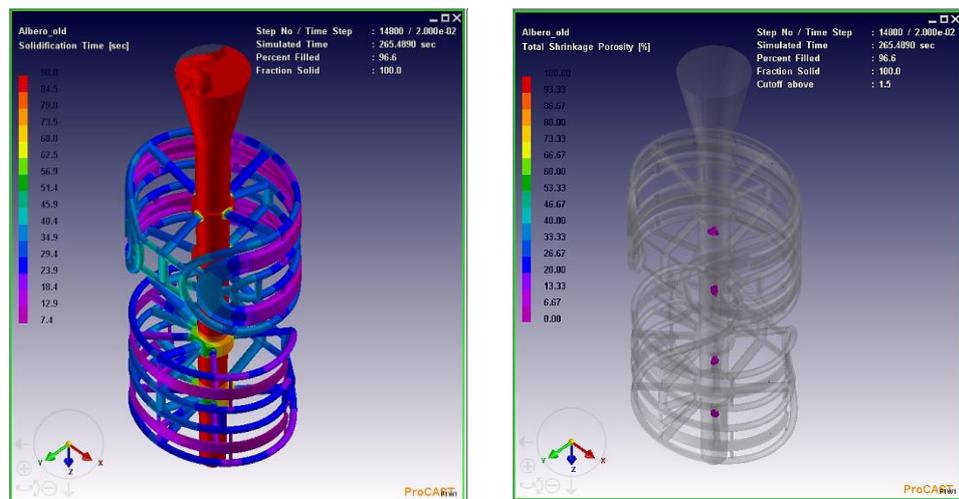


Figura 72: Tempo di solidificazione (a sinistra) e porosità (a destra) della geometria originale dell'albero

Osservando i risultati, si può notare che i tempi di solidificazione per gli elementi del bracciale sono molto brevi data la loro sottigliezza. Al tempo stesso però la solidificazione risulta graduale nella direzione del sistema di alimentazione, e come mostra la risposta del software in termini di porosità da ritiro, non dovrebbe presentare difetti di grande entità.

Si è passati dunque alla sua produzione e allo studio dei passaggi del processo che lo caratterizzano.

4.2.2 Lavorazione del pezzo

Avvenuta la colata, i pezzi vengono separati dall'albero e consegnati ai banchi. Qui il bracciale deve essere assemblato e lavorato fino a raggiungere una finitura elevata.

Si sono dunque analizzati i vari passaggi e i tempi necessari per la sua lavorazione.

Come prima cosa vengono eliminati dai pezzi i residui del sistema di alimentazione: questa operazione in generale può occupare molto tempo se il sistema risulta particolarmente complesso, specialmente se la sua disposizione può portare ad un danneggiamento del gioiello.

Il pezzo esterno viene inizialmente trattato per un'ora in un buratto ad aghi di diametro 1 mm alla velocità massima, per poter rendere più lucida la superficie. Questo passaggio non è fondamentale per le fodere, in quanto queste potranno essere facilmente lavorate successivamente, ma risulta necessario per la parte del bracciale principale. La zona che dovrà essere ricoperta sarebbe difficile infatti da lavorare tramite utensili, per la presenza di curvature del gioiello stesso che impediscono un corretto inserimento degli strumenti: attraverso questo passaggio è possibile donare la lucentezza che si potrà intravedere nel prodotto finale al di sotto delle fodere.

Si passa poi al fissaggio di quest'ultime. Dopo averle incastrate sfruttando gli alloggiamenti presenti, per assicurarsi che rimangano nella posizione corretta, si bloccano saldandoli a laser in alcuni punti. Questa saldatura però non basta per garantire a lungo la tenuta perché fragile e per questo si completa il fissaggio tramite una saldatura a fiamma con l'uso di metallo d'apporto. In questo caso il metallo potrebbe ossidarsi: per evitare ciò, prima dell'operazione, il gioiello viene immerso in borace liquida e dopo di essa passato in una soluzione acida per eliminare residui di ossido. Successivamente si procede

con un'ulteriore saldatura a laser per uniformare la colorazione e per evitare che nella fase successiva di pulitura la zona saldata venga lavorata diversamente rispetto al resto del pezzo; il metallo d'apporto infatti è una lega con caratteristiche differenti rispetto a quella di cui è composto il bracciale, risulta più morbida e con punto di fusione più basso.

Dopo aver passato una lima grossolana per eliminare i segni maggiori del sistema di alimentazione, si procede con la fase di smerigliatura vera e propria. Le carte smeriglio vengono identificate da un numero a seconda del loro potere abrasivo: maggiore è il valore e più fine sarà la carta e quindi meno rugosa la superficie che verrà trattata. Le prime ad essere utilizzate sono le carte 240 e 400: occorre all'incirca un'ora per ritenere uniforme il lavoro. Dopo questo passaggio, il pezzo viene inserito per 1 ora in un buratto a sfere. Si prosegue passando le carte smeriglio 800, 1200 e 1500, ognuna per circa 15 min.

Dopo le operazioni ai banchi, il bracciale viene fatto incidere e lucidato.

La lucidatura è una parte molto importante in quanto è qui che il gioiello acquista la lucentezza finale ed è qui che eventuali difetti possono rendersi più visibili. In tal caso il pezzo passa di nuovo ai banchi per una riparazione. Anche in questa fase ci sono due passaggi fondamentali: in un primo momento il bracciale viene infatti sgrossato utilizzando una spazzola dalle setole più dure, e poi lucidato con una dalle setole più morbide.

Il bracciale viene lavato in vasche ad ultrasuoni.

Viene dunque spedito in taglieria per l'inserimento della madreperla negli appositi alloggiamenti.



Figura 73: Bracciale appena spiantonato (a), dopo carta smeriglio 400 (b) e dopo lucidatura (c)

4.3 Variazioni processo produttivo

4.3.1 Design e analisi della simulazione

Studiando i risultati della simulazione riportata in Figura 72, non si notano particolari difetti in termini di porosità da ritiro, che possono insorgere nel pezzo a causa di un errato sistema di alimentazione o di una solidificazione non corretta. Quello che però si può notare è che il piantone risulta costituito da una quantità di metallo elevata, che verrà poi scartata. Mentre per la parte principale quel sistema di alimentazione risulta necessario per garantire il riempimento di ogni zona, nel caso delle fodere appare eccessivo, avendo esse una forma piuttosto semplice. Si è pensato dunque di snellire la loro geometria con un sistema semplificato.

Si sono poi impostate tre diverse simulazioni con la nuova geometria, sia per verificare che essa non portasse alla generazione di porosità da ritiro, sia per confrontare i risultati ottenuti variando quello che, nel capitolo precedente, è stato valutato come il parametro con più influenza sulla generazione di difetti da solidificazione, la temperatura del rivestimento.

4.3.2 Lavorazioni del pezzo

Produrre un gioiello può voler dire impiegare anche molte ore per la sua lavorazione ai banchi: per ottenere una qualità finale elevata è necessario avere cura dei dettagli e renderlo privo di qualsiasi difetto; più alto sarà il tempo impiegato da un orafo per questa fase e maggiore sarà il costo del prodotto. Si è pensato dunque di intervenire sulla fase di lavorazione del processo di produzione con lo scopo di ridurre il tempo impiegato al banco per la sua realizzazione.

Si è dunque inizialmente fatta un'analisi dettagliata dei tempi di lavoro necessari in ogni passaggio, unitamente ad un controllo della rugosità dopo ogni operazione di finitura superficiale. Questo è stato utile per capire se fosse possibile intervenire in tal senso con l'utilizzo di macchinari presenti in azienda ed utilizzati per la lucidatura dei gioielli. Su questi infatti è stato fatto uno studio preliminare volto a conoscere la loro capacità di far variare la rugosità a partire da alcuni elementi grezzi, ricavati anch'essi da cere provenienti da stampante 3D, come il bracciale in esame, e che quindi presentavano le stesse caratteristiche superficiali. In particolare, come si è ricordato nel secondo capitolo,

l'azienda dispone di macchinari per la burattatura, ognuno dei quali dotato di diversi mezzi abrasivi che possono avere differenti misure. In questo studio ne sono state analizzate 4 tipologie:

- Buratto magnetico ad aghi con diametro 1mm
- Buratto magnetico ad aghi con diametro 0,5-0,3 mm
- Buratto ad umido con inserti abrasivi con diametro circa 3mm
- Buratto magnetico a sfere con diametro 1mm

Per ogni pezzo inserito all'interno di un macchinario sono state fatte misure di rugosità tramite un rugosimetro con tastatore, per diversi tempi di permanenza: 30 min, 1 ora e 3 ore. Per i primi due buratti riportati nell'elenco inoltre era possibile variare la velocità di rotazione degli elementi abrasivi. Per ognuno di questi quindi si è deciso di studiare le variazioni superficiali apportate da tre velocità di lavoro differenti: 700, 1000 e 2000 rpm, il valore massimo impostabile. Studiando le misure da questi ottenute e quelle ricavate dal processo di produzione del bracciale, si è valutato il loro eventuale utilizzo nelle operazioni di lavorazione.

Facendo inoltre l'analisi dei tempi impiegati in ogni passaggio della sua realizzazione, si è riscontrato un problema legato al disegno CAD della geometria in analisi, che portava ad occupare circa 1 ora di lavoro per l'alloggiamento delle fodere: si è intervenuto in tal senso per rendere più veloce questa operazione.

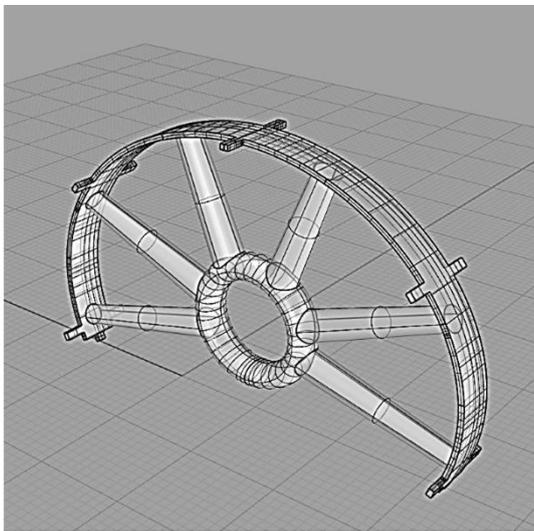
Supponendo inoltre una produttività mensile elevata, si è valutato anche il vantaggio che potrebbe nascere dall'utilizzo nella fase finale del processo di finitura superficiale, delle macchine per l'elettrolucidatura presenti in azienda e presentate nel paragrafo 2.1.4.

4.4 Risultati e confronto

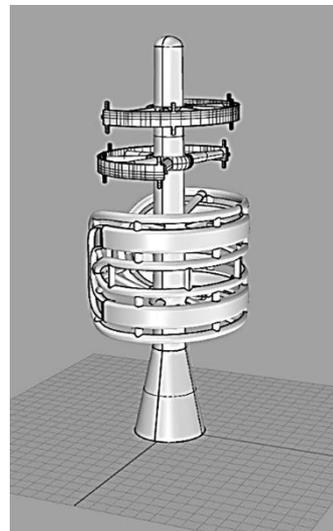
4.4.1 Design e analisi simulazione

Analizzando la geometria iniziale del bracciale e del suo sistema di alimentazione, si è ritenuto eccessivo e non necessario utilizzare le quantità di metallo impiegate per la realizzazione del piantone delle due fodere. Lo stesso è stato invece considerato fondamentale per il corretto riempimento della sua parte principale.

Il nuovo design semplificato per le fodere e la geometria del nuovo albero sono riportati in Figura 74 (a) e 74 (b) rispettivamente.



(a)



(b)

Figura 74: Nuovo sistema di alimentazione per le fodere (a) e geometria del nuovo albero (b)

Lo stesso sistema di alimentazione inserito nella parte principale del bracciale non sarebbe idoneo: questo risulterebbe infatti difficile da eliminare in quanto sono presenti nella geometria del gioiello delle curvature che rendono complicato l'inserimento di utensili utili a questo scopo.

Apportando questa modifica si è potuto risparmiare, relativamente alle sole fodere comprese del loro sistema di alimentazione, il 55% circa del metallo prima utilizzato. Considerando invece l'intera struttura, per montare la geometria precedente era necessario utilizzare un albero in cera con un'altezza maggiore rispetto a quello riportato in Figura 74 (b), poiché l'ingombro del bracciale era più elevato. Si è dunque ottenuto un

risparmio sulla struttura complessiva di più del 15%. I dettagli sulle quantità di metallo necessarie sono state riportate in Tabella 9.

	<i>Metallo prima della modifica (g)</i>	<i>Metallo dopo la modifica (g)</i>	<i>Materia prima risparmiata (g)</i>	<i>Risparmio%</i>
<i>2 Fodere con sistema di alimentazione</i>	112,8	50,7	62,1	55
<i>Struttura intera</i>	551,32	466,5	84,82	15

Tabella 9: Quantità di metallo necessarie prima e dopo la modifica

Si sono poi studiate le simulazioni del sistema variando quella, che nel capitolo precedente, è stata valutata come la variabile con più influenza nella generazione di porosità da ritiro, la temperatura del rivestimento. Si sono dunque impostate 3 simulazioni con una temperatura crescente del materiale refrattario $T_{\text{flask}} = 550^{\circ}\text{C}$, 620°C , 730°C .

I tempi di solidificazione per gli elementi che costituiscono il bracciale sono molto brevi, in particolare per le simulazioni a più bassa temperatura si mantengono sotto i 10 secondi. Per quanto riguarda le porosità da ritiro, queste si fanno più evidenti con una temperatura del refrattario di 550°C , negli altri due casi invece sembrano non essere rilevanti. Si può pensare dunque di abbassare la temperatura del rivestimento a 620°C in modo da evitare la generazione di porosità da gas, che, come si è visto nel capitolo precedente, potrebbero insorgere con una temperatura del materiale refrattario di 730°C , mantenendo una buona qualità in termini di difetti da ritiro. In questo modo inoltre si assicurano tempi di solidificazione più uniformi per tutto il bracciale. Come si nota dalla Figura 75 sotto riportata infatti, per la prova effettuata con temperatura del rivestimento a 730°C , la zona più vicina all'ingresso del metallo è influenzata maggiormente dall'ambiente esterno, raffreddandosi in tempi minori. Considerando anche il fatto che proprio questa zona, come si è visto nel paragrafo 3.3.4, è quella in cui il software sovrastima i tempi di transizione liquido-solido, e dove quindi la differenza di

temperatura con le altre zone risulterà ancora più accentuata nel caso reale, sarebbe più opportuno abbassare la temperatura del rivestimento.

Si riportano in Figura 75 i tempi di solidificazione e porosità ricavate dalle tre simulazioni.

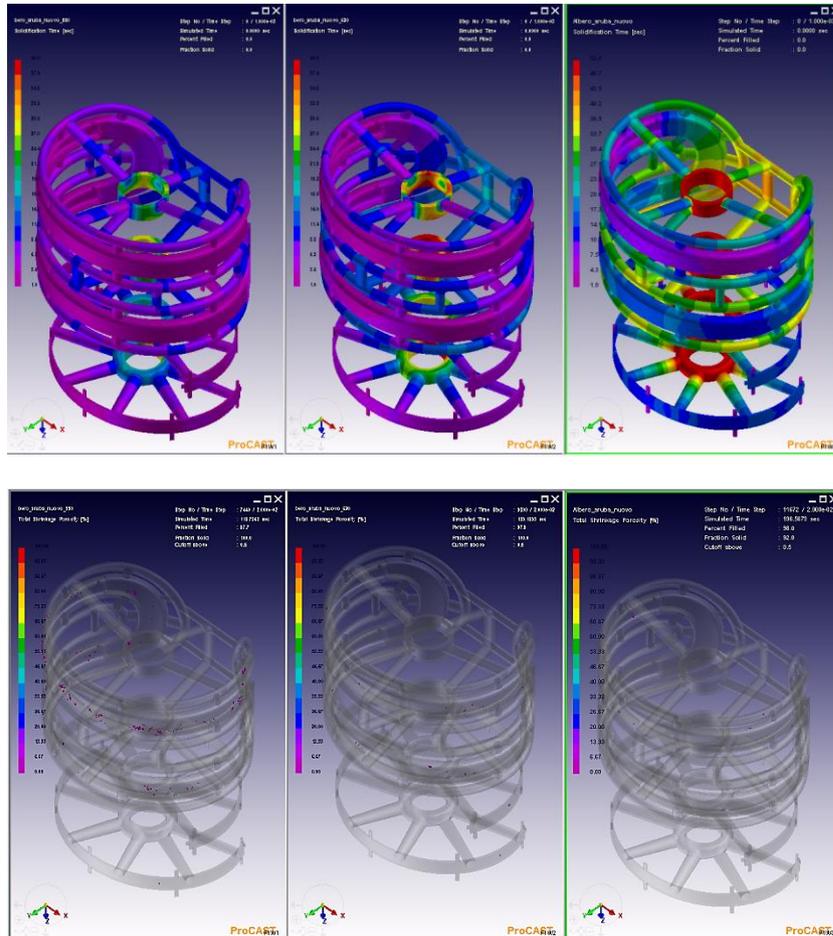


Figura 75: Tempo di solidificazione e porosità per le tre simulazione con temperatura del rivestimento crescente da sinistra a destra

4.4.2 Lavorazione del pezzo

In un primo momento, come ricordato, si sono studiati i tempi impiegati nel processo di produzione iniziale del bracciale, concentrando l'analisi sulla fase di lavorazione al banco, unitamente alle variazioni di rugosità dopo alcune operazioni di finitura superficiale. In Tabella 10 vengono riportati i dati raccolti, dove ogni misura della rugosità è il risultato di una media su tre letture effettuate tramite rugosimetro con

tastatore, dove come dato di riferimento si è considerata la Ra, ovvero il valore medio aritmetico degli scostamenti (presi in valore assoluto) del profilo reale della superficie rispetto alla linea media.

	<i>Tempo (min)</i>	<i>Tempo complessivo (min)</i>	<i>Rugosità Ra (µm)</i>
<i>Eliminazione residui sistema di alimentazione</i>	30	30	3,425
<i>Buratto ad aghi da 1mm</i>	60	90	2,597
<i>Limatura</i>	9	99	
<i>Smerigliatura (240+320)</i>	30	129	0,510
<i>Buratto a sfere</i>	60	189	0,469
<i>Fissaggio fodere</i>	75	264	
<i>Smerigliatura (240+ 400)</i>	60	324	0,425
<i>Smerigliatura (800)</i>	23	347	0,281
<i>Smerigliatura (1200)</i>	20	367	0,132
<i>Smerigliatura (1500)</i>	17	384	0,103
<i>Rifinitura zona luce</i>	5	389	
<i>Sgrossatura</i>	25	414	0,074
<i>Lucidatura</i>	20	434	0,051

Tabella 10: Successione dei passaggi e dei tempi di lavorazione con variazione di rugosità corrispondente del processo iniziale

Il tempo totale impiegato per la sola lavorazione di rifinitura del gioiello in analisi è di 7 ore circa, di cui 5 al banco orafo. Si sono dunque effettuate delle variazioni volte alla diminuzione di questo ultimo dato.

Come studio preliminare si sono analizzate le variazioni di rugosità su pezzi grezzi sottoposti a trattamenti superficiali nelle modalità descritte precedentemente. Si riportano in Tabella 11 i valori ottenuti come media di tre misure effettuate, riferite sempre ad Ra.

		Iniziale	30 min	1 ora	3 ore
<i>Aghi Imm</i>	700 RPM	3.554	2.937	1.721	1.701
	1000 RPM	3.118	2.763	1.742	1.456
	2000 RPM	2.786	1.641	1.502	1.113
<i>Aghi misti</i>	700 RPM	2.460	1.895	1.444	1.243
	1000 RPM	2.189	1.518	1.328	1.234
	2000 RPM	3.720	2.183	1.945	1.630
<i>Umido</i>		2.974	1.002	0.908	0.844
<i>A sfere</i>		3.737	3.410	3.310	3.296

Tabella 11: Dati rugosità raccolti per pezzi trattati con i macchinari presenti in azienda

Si riportano in Figura 76 i dati raccolti in Tabella 11 e rapportati al valore massimo iniziale registrato per ogni campione.

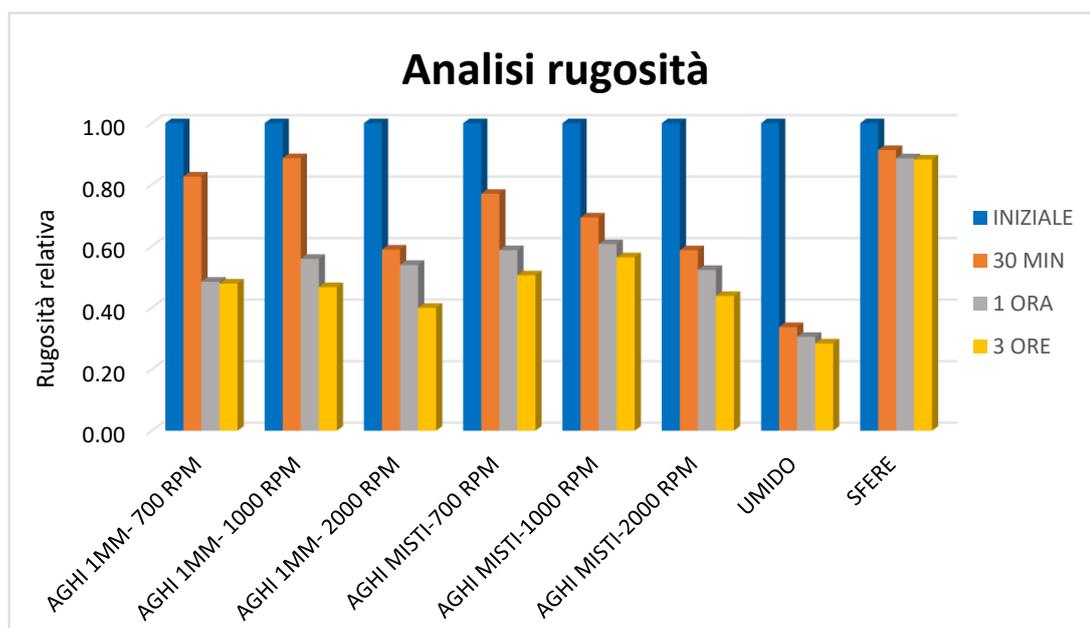


Figura 76: Grafico rugosità relative per i diversi macchinari di finitura superficiale analizzati

Il macchinario che ha portato ad una riduzione maggiore della rugosità rispetto a quella iniziale è stato il buratto ad umido, in cui è stato misurato un valore finale, dopo tre ore, al di sotto del micron. Questo però non può essere utilizzato per elementi che debbano mantenere degli spigoli vivi o che abbiano zone particolarmente sottili, come nel caso in esame, poiché i mezzi abrasivi sono molto aggressivi e rischierebbero di rovinare il gioiello.

Le condizioni che hanno portato ad una maggiore diminuzione del valore della rugosità, senza danneggiare il gioiello, sono stati i buratti ad aghi, entrambi alla velocità massima. Si è pensato dunque di prolungare il tempo di permanenza all'interno del macchinario con aghi dal diametro di 1 mm, già presente nel processo iniziale, da 1 a 3 ore, in modo da ridurre maggiormente la rugosità iniziale e ed eventualmente il tempo impiegato al banco per la rifinitura grossolana del bracciale. Bisogna infatti tener presente che i macchinari a disposizione, come si nota dalla Tabella 11, possono intervenire solamente su valori di rugosità elevate, ovvero nei primi momenti della lavorazione: i pezzi inseriti nei mezzi abrasivi in questione, tendono infatti a mantenere, anche dopo tre ore di trattamento, una rugosità al di sopra del micron, valori molto elevati per quella che deve essere la finitura superficiale finale del gioiello. Mantenendo dunque il bracciale all'interno del macchinario per più tempo, si potrebbe comunque abbassare di circa il 60% la rugosità iniziale, garantendo una maggior finitura anche nella zona che verrà coperta dalle fodere, che non verrà lavorata al banco orafa, ma che comunque rimarrà visibile parzialmente dagli spazi lasciate da queste. Il tempo maggiore impiegato per questa operazione rispetto alle condizioni iniziali, non incide comunque su quello relativo alla lavorazione del pezzo al banco orafa. Se poi si considera una produzione di un numero consistente di bracciali, l'aumento di tempo di permanenza nel buratto incide ancor meno su quello totale impiegato complessivamente per la loro produzione, in quanto possono essere trattati più elementi contemporaneamente all'interno del macchinario.

Si è inoltre notato che l'utilizzo del buratto a sfere non incide molto sulla finitura superficiale e pertanto si è deciso di eliminare questo passaggio dalla fase di lavorazione. In questo caso la rugosità si è ridotta da $0,510\ \mu\text{m}$ a $0,469\ \mu\text{m}$.

In merito invece alla fase di fissaggio delle fodere, si è potuto constatare quanto questo passaggio allunghi i tempi complessivi di lavorazione: viene impiegata infatti più di un'ora per incastrarle e bloccarle correttamente nelle loro sedi. Andando a studiare il modello CAD di questi pezzi dal quale poi vengono prodotte le cere da stampante 3D, si è notato che non era stata considerata nessuna tolleranza tra le due parti, come riportato in Figura 77(a). Questo aveva reso necessario, da parte dell'orafo, un lavoro preliminare di preparazione delle sedi, allungando così i tempi di inserimento dei perni delle fodere al loro interno. Occorrevano infatti diversi tentativi prima di riuscire ad avere un corretto incastro. Si è dunque modificata la dimensione delle sedi come in Figura 77 (b), in modo da non rendere necessario questo passaggio.

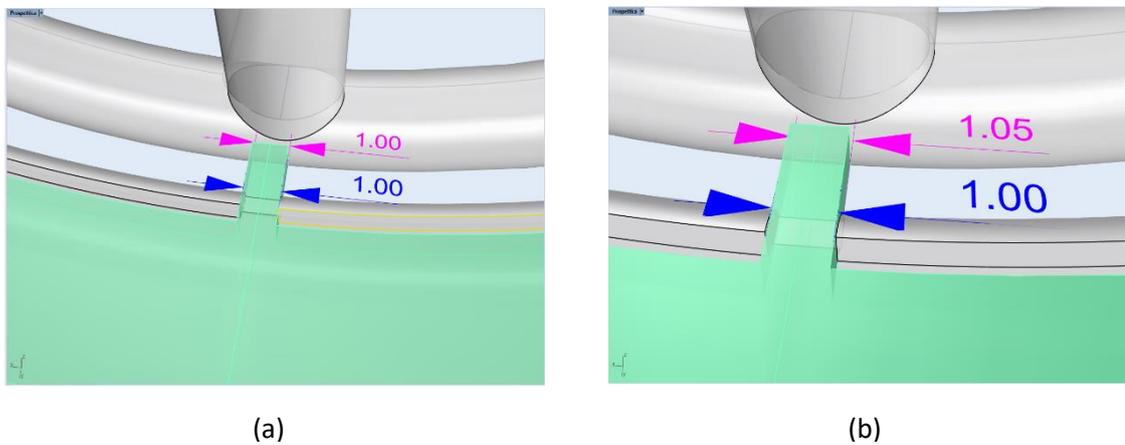


Figura 77: Tolleranza tra sedi e perni del bracciale prima(a) e dopo (b) la modifica

Infine si può fare un'ulteriore considerazione nella fase finale di lavorazione del bracciale, dove viene sottoposto ad operazioni di sgrossatura e lucidatura. In questo caso infatti i due passaggi vengono svolti grazie all'utilizzo di spazzole con setole dure e morbide rispettivamente. Il primo però, può essere sostituito dall'utilizzo di macchinari per l'elettrolucidatura, riportati precedentemente in Figura 33, che possono portare il gioiello ad una rugosità di 0,08-0,09 μm (il valore si riferisce alla Tabella 12 relativa ai tempi e rugosità del nuovo processo produttivo di seguito riportata). Per la fase successiva di lucidatura invece si necessita del lavoro dell'orafo. Se la produzione fosse molto bassa, lavorare interamente il gioiello al banco in questa fase non porterebbe ad uno svantaggio consistente in termini di tempo ed economici, ma se il numero dei pezzi da produrre fosse

alto, la possibilità di sottoporli a questo trattamento, porterebbe ad un vantaggio più considerevole. In ogni macchina possono essere inseriti infatti 4 bracciali.

Si riporta in Tabella 12 i tempi impiegati e le relative rugosità misurate nei passaggi del nuovo processo.

	<i>Tempo (min)</i>	<i>Tempo complessivo (min)</i>	<i>Rugosità Ra (μm)</i>
<i>Eliminazione residui sistema di alimentazione</i>	30	30	3,401
<i>Buratto ad aghi da 1mm</i>	180	210	1,519
<i>Limatura</i>	9	219	
<i>Smerigliatura (240+320)</i>	24	243	0,502
<i>Fissaggio fodere</i>	45	288	
<i>Smerigliatura (240+ 400)</i>	50	338	0,416
<i>Smerigliatura (800)</i>	20	358	0,193
<i>Smerigliatura (1200)</i>	20	378	0,156
<i>Rifinitura zona luce</i>	5	383	
<i>Smerigliatura (1500)</i>	12	395	0,119
<i>Sgrossatura in macchina</i>	20	415	0,090
<i>Lucidatura</i>	20	435	0,057

Tabella 12: Successione dei passaggi e dei tempi di lavorazione con variazione di rugosità corrispondente per il nuovo processo

I tempi complessivi sono sostanzialmente gli stessi, circa 7 ore. Se si considerano però i tempi di lavorazione al banco, si registra una diminuzione di circa il 25%.

Si riporta a tal proposito in Figura 78 il grafico di confronto dei tempi di interesse per i due processi. Si sono considerate in questo caso solamente le operazioni relative alla lavorazione al banco, ovvero quello che incidono maggiormente sul costo finale del

prodotto per l'azienda, trascurando il tempo in cui il bracciale è stato inserito nei buratti ad aghi prima e a sfere poi.

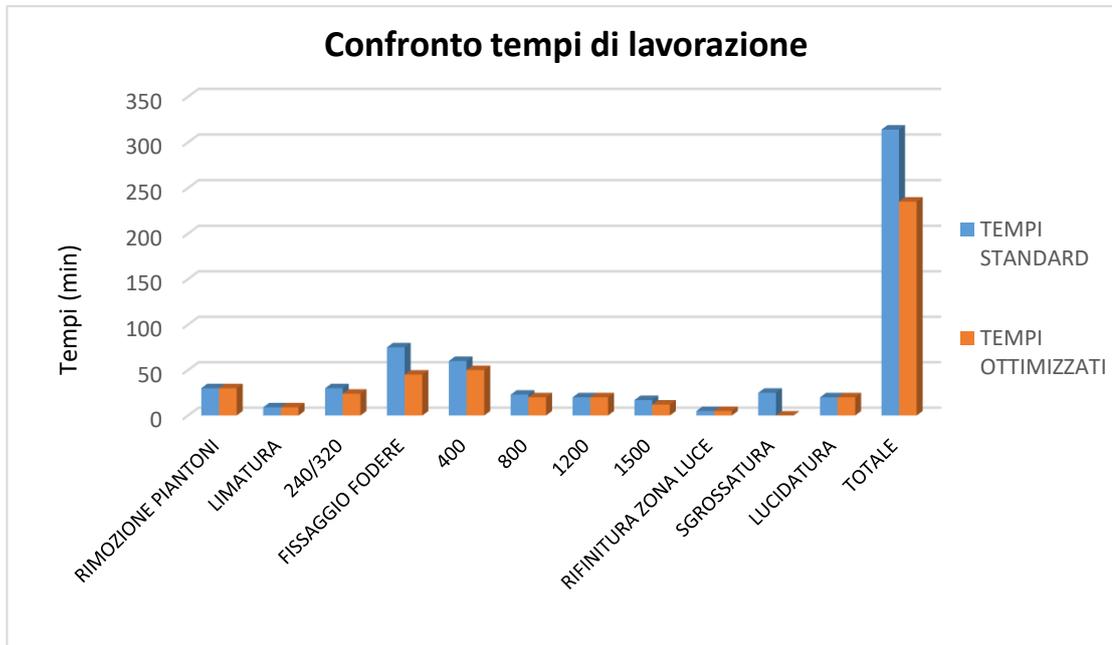


Figura 78: Tempi di lavorazione al banco a confronto per i due processi

Analizzando i dati si può notare che, grazie alle modifiche apportate, si è riuscito a ridurre complessivamente di più di un'ora la realizzazione del bracciale per le operazioni affidate all'orafo.

L'intervento sulla rugosità ha influenzato in realtà in maniera limitata i tempi di lavoro, in quanto, come si è ricordato prima, i macchinari utilizzati in azienda intervengono solo nella fase iniziale, quando la finitura superficiale è grossolana. La fase successiva invece rimane comunque associata al lavoro manuale, che grazie all'utilizzo della carta smeriglio permette di raggiungere valori di rugosità intorno ai $0,100 \mu\text{m}$. Il trattamento prolungato nel buratto ad aghi ha permesso comunque di migliorare la finitura della zona che verrà coperta parzialmente dalle fodere e che rimarrà visibile nel prodotto finito, e ad uniformare maggiormente l'aspetto del gioiello, caratterizzato inizialmente da forti segni della stampante 3D.

Ciò che invece ha influenzato molto i tempi di lavoro è stata la modifica apportata al disegno CAD del gioiello, che ha facilitato notevolmente l'inserimento dei perni delle fodere nelle loro sedi: questo ha permesso di risparmiare circa mezz'ora.

Anche l'utilizzo della macchina per l'elettrolucidatura ha portato ad un risparmio di circa 20 minuti. Come già ricordato, questa operazione, in generale, risulta vantaggiosa in modo sostanziale quando la richiesta di produzione aumenta: si possono infatti inserire più pezzi all'interno del macchinario facendoli lavorare contemporaneamente.

Le operazioni successive alla lucidatura sono le stesse descritte nel paragrafo 4.2.2. Se il pezzo presenta porosità ritorna al banco per delle riparazioni, altrimenti viene spedito in taglieria per l'alloggiamento delle pietre.

4.4.3 Considerazioni

Dopo aver analizzato il processo di produzione del bracciale nei dettagli, si sono fatte delle considerazioni economiche in relazione alle modifiche apportate.

Supponendo che la richiesta mensile di produzione di questo gioiello sia di 50 pezzi, e che l'azienda acquisti la lega in oro rosso al prezzo attuale di mercato pari a 39,5 €/g circa, con il risparmio di materia prima ottenuto grazie alla modifica apportata al design nella prima parte dell'analisi, pari ad 85g per il sistema complessivo, si è potuto risparmiare una quantità di metallo del valore di 165.000 € circa.

Inoltre, a partire dalla stessa richiesta di produzione mensile e ipotizzando un costo per l'azienda di 20€/h per la lavorazione al banco, su una riduzione totale del tempo impiegato pari a 50 ore, si risparmierebbero 1000 €.

Ovviamente se si considerano le stesse quantità produttive mensili per l'intero anno, il risparmio totale aumenta.

C'è inoltre da tener conto che l'analisi è stata fatta sulla realizzazione di un unico bracciale; la produzione in serie potrebbe far scendere ulteriormente i tempi di lavorazione al banco e come si è già ricordato, ridurre l'incidenza della prolungata fase di utilizzo dei macchinari sul tempo complessivo per tale produzione.

Capitolo 5 - Conclusioni

Nella prima parte sperimentale del seguente lavoro di tesi, si è dunque studiata ed ottimizzata la risposta del software di simulazione di colata ProCAST, confrontandolo con le reali condizioni di processo. Facendo un'analisi complessiva relativamente ad esso, si può affermare che, per quanto riguarda la fase di solidificazione, questo risulta un buono strumento per la valutazione preliminare di possibili difetti legati a porosità da ritiro e non idoneità del sistema di alimentazione di alcuni elementi, ancor prima che questi vengano messi in produzione. Da quello che si è potuto notare però, l'introduzione di parametri corretti e di proprietà specifiche e caratteristiche dei materiali con cui si lavora, rappresenta un punto fondamentale per avere dei risultati che siano affidabili e che riproducano quanto più possibile la condizione reale di processo. Con geometrie semplici, ProCAST è stato in grado di individuare i problemi che potevano nascere nei singoli elementi, ma, mentre con la lega in oro rosso l'entità dei difetti nata da problemi nella solidificazione era effettivamente quella prevista, nel caso di quella in oro giallo si è notata una maggiore discordanza. I pezzi in questo caso infatti risultavano più ricchi di porosità da ritiro rispetto a quanto era stato previsto. Va inoltre sottolineato che in entrambi i casi, ma in particolar modo per la lega in oro giallo, si sono riscontrate molte porosità da gas che il software non è in grado di segnalare in modo diretto. Queste risultavano molto diffuse a causa dell'elevata temperatura a cui viene mantenuto il metallo durante la fase di colaggio. A meno che non si tratti di pezzi particolarmente sottili infatti, una temperatura del materiale refrattario di 730°C è rischiosa, poiché potrebbe portare alla decomposizione dello stesso.

Per quanto riguarda invece l'analisi del profilo di solidificazione della lega in oro rosso, i risultati ottenuti dal software si avvicinano molto ai tempi reali di solidificazione nelle zone centrali analizzate, ovvero quelle dove sono presenti i pezzi, mentre si allontanano maggiormente in quelle più esterne. La qualità richiesta per i vari elementi è sicuramente più elevata rispetto a quella per l'albero: avere dunque una maggiore concordanza di risultati proprio nelle zone centrali è un notevole vantaggio per conoscere le condizioni reali di solidificazione.

Va sottolineato però che ProCAST si discosta nella fase iniziale della solidificazione, dove si è potuto notare uno scambio di calore con lo stampo minore di quanto è stato simulato, avendo cadute di temperatura iniziali meno rigide in tutte e quattro le zone.

Questo, come ricordato, può essere legato ad una discordanza sulle caratteristiche del rivestimento.

Questi risultati sono in accordo con lo studio portato avanti da Tiberto e Klotz in [12], dove viene sottolineata una concordanza di dati tra simulatore e quelli registrati nella zona lontana dall'alimentazione, mentre in quest'ultima la differenza di temperatura è maggiore, a causa di una più alta perdita di calore. Si è anche messo in evidenza, come nel caso preso in esame, ci sia una sovrastima del tempo di solidificazione da parte del software nella zona vicino all'alimentazione.

Inoltre si è notato che, mentre il sistema di alimentazione ha un'influenza notevole sulla qualità del gioiello, il posizionamento di questo lungo l'albero non influisce molto su di essa. Ciò che invece ha un ruolo importante nella qualità finale dei gioielli è la temperatura del materiale refrattario: una sua variazione può essere determinante per la generazione di porosità.

Infine, per quanto riguarda l'albero di produzione, si è potuto notare un'uniformità nei tempi di solidificazione tra le zone centrali e quelle più lontane dall'alimentazione, mentre per quelle più vicine ad essa ci potrebbero essere delle piccole differenze. Inoltre si è notato come le zone vicino al canale principale impieghino più tempo per lo smaltimento del calore rispetto a quello previsto. Come nel caso dell'albero semplificato, il tempo di transizione liquido-solido per gli elementi, viene sottostimato dal software di circa 20 secondi.

Per la fase di solidificazione dunque i risultati ottenuti sono buoni, ma per poter avere una migliore risposta del software si deve pensare ad una caratterizzazione più specifica non solo delle leghe trattate, ma anche del materiale di rivestimento, poiché ancora presenti dei discostamenti sui profili di temperatura. Sarebbe interessante anche studiare le condizioni di scambio termico tra i due elementi, in modo da avere dati di input più corretti.

Per quanto riguarda la parte della fluidodinamica invece, seppur non si sia affrontato uno studio specifico in merito, si può affermare sicuramente che il software necessita di un miglioramento sotto questo aspetto, almeno per quelle che sono le applicazioni in campo orafa. Anche se la solidificazione non è molto influenzata dal flusso del metallo, poiché avvengono con tempi nettamente diversi, può essere interessante capire come esso entri all'interno dello stampo e se alcune geometrie, o alcuni sistemi di alimentazione

possano generare turbolenze che vadano ad incidere sulla qualità finale. Nell'ambito della gioielleria, per quanto riguarda questo aspetto, come hanno dimostrato diversi studi [11, 12, 16], si è fatto sempre riferimento ad altri software per i quali c'era un maggiore sviluppo in tal senso. Nella prossima versione di ProCAST però, verrà apportata un'importante modifica sulla parte della fluidodinamica: sarà possibile inserire infatti delle condizioni di uscita del metallo dal crogiolo riferite alla differenza di pressione tra le due camere del forno, intesa questa volta come pressione totale del fluido. Rimane ancora una non corrispondenza per la fase di sovrappressione tipica della fase finale del processo di colata.

Per quanto riguarda invece la parte finale del lavoro di tesi ci si è incentrati sullo studio del processo produttivo di un gioiello, con analisi dettagliata dei tempi di lavorazione. È stato possibile inizialmente, proprio grazie all'utilizzo del software, studiare le condizioni di solidificazione e verificare, ancor prima di iniziarne la produzione, l'idoneità di un nuovo design per il sistema di alimentazione. In generale questa parte risulta fondamentale laddove le geometrie d'interesse siano più complicate; il software infatti ha mostrato una buona corrispondenza in riferimento ai difetti di natura dendritica con il processo reale. Si è preferito però abbassare la temperatura del materiale refrattario durante la fase di colaggio per evitare l'insorgere di porosità da gas.

L'analisi dei tempi e gli interventi fatti in merito, hanno permesso una riduzione del 25% del lavoro effettuato al banco da parte di un orafo. Mentre l'utilizzo dei macchinari per la finitura superficiale ha portato ad un limitato vantaggio, la variazione del disegno CAD ha permesso di facilitare il lavoro di assemblaggio del bracciale. È importante per ogni nuovo gioiello che viene prodotto, fare uno studio dettagliato su quelli che sono i passaggi che caratterizzano la sua realizzazione in modo da poter intervenire laddove si manifestino problematiche che fanno aumentare il tempo di lavorazione. Ottimizzare la produzione giornaliera sarà sempre un obiettivo fondamentale per un'azienda.

Riferimenti

- [1] M. Actis Grande e I. Forno, «Innovation and Optimization of the investment casting of precious alloys,» *Acta Metallurgica Slovaca*, pp. 341-352, 2014.
- [2] S. Pattnaik, P. K. Jha e B. Karunakar, «A review of rapid prototyping integrated investment casting processes,» *Mechanical Engineers: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. Vol 18, n. 4, pp. 249-277, 2014.
- [3] V. Faccenda e M. Condò, «Investment Casting: an Integrated process,» *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, pp. 97-119, 2001.
- [4] S. Kalpakjian e S. Schmidt, *Tecnologia Meccanica, Seconda Edizione Italiana*, Milano-Torino: Pearson Italia, 2014.
- [5] T. Phetrattanarangsi, C. Puncreobutr, A. Khamkongkao, C. Thongchai, B. Sakkomolsri, S. Kuimalee, P. Kidkhunthod, N. Chanlek e B. Lohwongwatana, «The behavior of gypsum-bonded investment in the gold jewelry casting process,» *Thermochimica Acta*, pp. 144-150, 2017.
- [6] B. Lohwongwatana, C. Puncreobutr, T. Phetrattanarangsi, A. Khamkongkao, C. Thongchai, E. Nisaratanaporn, B. Sakkomolsri e S. Kuimalee, «X-Ray Diffraction Analysis, Calorimetric and Thermogravimetric Characterization and Topographic Study of Gypsum-Bonded Investment Materials,» *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, pp. 1-18, 2017.
- [7] P. H. Horton, «Investment Powder Technology – The present and the future,» *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, pp. 213-239, 2001.
- [8] C. W. Corti, «Basic Metallurgy of the Precious Metals: Part I,» *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, pp. 25-61, 2017.
- [9] [Online]. Available: <https://it.3dsystems.com/>.
- [10] P. Sbornicchia, G. Montesperelli, G. M. Ingo e G. Gusmano, «Advances in Jewellery Microcasting,» *Thermochimica Acta*, pp. 195-204, 2004.
- [11] J. Fisher-Buhner, «Computer Simulation of Jewelry Investment Casting: What Can We Expect?,» *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, pp. 193-216, 2006.
- [12] M. Actis Grande, L. Porta e D. Tiberto, «Computer Simulation of the Investment Casting Process: Widening of the Filling Step,» *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, pp. 1-18, 2007.
- [13] D. Tiberto e U. E. Klotz, «Computer simulation applied to jewellery casting: challenges, results and future possibilities,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 33, 2012.

- [14] P. Sbornicchia, S. Rappo, D. Zito, V. Doppio, F. Tiso e G. Cepeda, «Understanding Gold Alloy Features From Thermodynamic Phenomena,» *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, pp. 517-559, 2018.
- [15] M. Grimwade, «Solidification and Casting,» *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, pp. 231-254, 2002.
- [16] M. A. Grande e S. Wannarumon, «Comparison of Computer Fluid Dynamic Software Programs applied to Jewelry Investment Casting Process,» *World Academy of Science, Engineering and Technology* 55, pp. 88-95, 2009.

Ringraziamenti

Al termine di questo elaborato vorrei ringraziare tutte le persone che, in modo differente, mi hanno aiutato nella sua realizzazione.

Ringrazio il Prof. Marco Actis Grande, mio relatore, per la disponibilità e professionalità dimostratami in questi mesi di lavoro, supportandomi e guidandomi nelle scelte che mi sono trovata a fare.

Ringrazio la Mattioli S.p.A per avermi dato la possibilità di svolgere il mio lavoro di tesi, permettendomi di mettermi in gioco in un'esperienza nuova che mi porterò nel futuro. Grazie in particolare ai miei tutor Vera Benincasa e Claudio Mancuso che mi hanno assistito sin dal primo giorno, e a tutte le persone che, nel corso dei mesi, mi hanno dimostrato una grande disponibilità, aiutandomi ogni qualvolta ne avessi avuto bisogno.

E infine grazie alla mia famiglia e ai miei amici che mi hanno mostrato il loro affetto in questi anni.