



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in ingegneria meccanica

A.a. 2021/2022

Sessione di Laurea Luglio 2022

**Analisi numeriche e sperimentali
sulla colata in conchiglia a gravità
di leghe di alluminio**

Relatore:

Prof. Paolo Matteis

Candidata:

Elisabetta De Rocco

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il mio relatore, il professor Paolo Matteis, che mi ha seguita, con la sua infinita disponibilità, in ogni step della realizzazione dell'elaborato

Un sentito ringraziamento va al sig. A. Rabaioli, la cui idea ha permesso la scrittura di questa tesi

Un ringraziamento speciale va a tutto lo staff delle aziende STCast e F.O.M.T., il cui aiuto è stato fondamentale per completare questo percorso di studi. Dovrei ringraziarvi uno per uno, anche chi non c'è più, mi avete dato tanto e l'esperienza fatta insieme rimarrà sempre con me (insieme agli incubi con baricentrici e vernici)

Grazie ai miei amici dell'università, che hanno condiviso con me le gioie e i dispiaceri del poli... tra un progetto in caffetteria e uno in casa davanti ad un piatto di carbonara, il percorso è stato più completo con voi

Grazie agli amici storici, che ancora mi sopportano dopo tutto questo tempo, anche dopo mesi senza sentirvi so che possiamo sempre contare l'uno sull'altro

Grazie agli amici di energetica, che sono come una famiglia. Non saprei dire a parole ciò che mi avete dato in questi anni, senza far sembrare che in questo gruppo ci sia del bullismo... Quindi dirò solo: por dodos

Grazie ai miei coinquilini, con cui ho condiviso le emozioni di questi anni. Il vostro supporto pre e post esami è stato fondamentale

Grazie a Marco, che mi ha sostenuta in questi ultimi due anni ed è la mia roccia. Mi sproni a dare il meglio di me ed è anche grazie a te se sono arrivata "intera" in fondo a questo percorso

Grazie alla mia famiglia, che mi ha sempre sostenuta. Avete sempre creduto in me, anche quando io stessa avevo qualche dubbio. Senza di voi non sarei potuta arrivare fino a questo punto, grazie

Grazie ai nonni che sono lassù e spero siano fieri di me

Grazie a tutti quelli che non ho ancora ringraziato, ma che hanno contribuito e reso possibile il raggiungimento di questo traguardo

Sommario

1	Introduzione e scopo	1
2	Alluminio: storia e come si ottiene	2
2.1	Storia dell'alluminio	2
2.2	Processo di Bayer	2
2.3	Processo di Hall-Heroult	3
3	Processi di colata	4
3.1	Processi con forma transitoria	4
3.1.1	Colata in sabbia	4
3.1.2	Formatura a guscio (shell moulding)	5
3.1.3	Formatura ceramica o fusione a cera persa (investment casting)	5
3.1.4	Formatura lost foam (schiuma a perdere)	6
3.2	Processi con forma permanente	7
3.2.1	Colata in bassa pressione	7
3.2.2	Colata per centrifugazione	7
3.2.3	Formatura da liquido per colata sotto pressione (pressofusione)	8
3.2.4	Formatura allo stato semi-solido (tixoformatura)	8
3.2.5	Squeeze casting	9
4	Colata in gravità in conchiglia	10
4.1	Descrizione della conchiglia	12
4.2	Descrizione del processo produttivo	13
4.3	Descrizione del ciclo di lavoro	13
4.4	Leghe per colata in gravità	14
4.4.1	Controllo della composizione	14
4.4.2	Leghe per getti	15
4.4.3	Leghe per colata in gravità: elaborazione e preparazione del metallo liquido	16
4.4.3.1	Alliganti	16
4.4.3.2	Modifica	17
4.4.3.3	Affinamento	18
4.4.3.4	Solubilità dell'idrogeno nell'alluminio e degasaggio	19
4.5	Disegno e accorgimenti	21
4.5.1	Materozze	21
4.5.2	Dispositivo di colata	24
4.5.3	Anime	25
4.5.4	Spinte metallostatiche	25
4.5.5	Sottosquadri	26

4.5.6	Angoli di sformo e raccordi.....	26
4.6	Ritiro	27
4.7	Uso di rivestimenti superficiali dello stampo (vernici)	27
4.8	Difettosità nei getti.....	28
4.9	Descrizione dei trattamenti finali (finitura).....	29
4.9.1	Premessa ai trattamenti termici, la diffusione allo stato solido	30
4.9.2	Trattamenti termici	31
4.9.2.1	Ricottura	31
4.9.2.2	Trattamenti termici di indurimento	31
4.10	Controlli	33
5	Metodi di calcolo numerico per l'analisi di un getto in produzione.....	34
5.1	Premessa sui software di simulazione.....	35
5.2	Cenni sul funzionamento del software ProCAST	35
5.2.1	Equazioni alla base del software	36
5.2.2	Modello termico	38
5.2.3	Porosità.....	38
5.3	Simulazione della colata del supporto motore con conchiglia convenzionale	39
6	Metodi di caratterizzazione sperimentale.....	42
6.1	Analisi termica del supporto motore.....	42
6.1.1	Posizionamento della termocamera	42
6.1.2	Riscaldamento della conchiglia	44
6.1.3	Ciclo di lavoro medio	45
6.1.4	Transitorio termico della parte esterna della conchiglia.....	46
6.1.5	Temperatura dell'interno della conchiglia	49
6.1.6	Confronto tra temperatura reale e simulazione nel transitorio termico	51
6.2	Analisi microscopica del supporto motore.....	57
6.3	Analisi macroscopica	67
7	confronto con metodo alternativo.....	71
7.1	Simulazioni su supporto motore	72
7.1.1	Confronto temperature	73
7.1.2	Deformazioni della conchiglia	75
7.1.3	Frazione solida.....	76
7.1.4	Temperatura.....	78
7.1.5	Porosità.....	80
7.1.6	SDAS (secondary dendrite arm space)	81
7.2	Simulazione di una piastra.....	83

7.2.1	Temperature e deformazioni della conchiglia.....	85
7.2.2	Temperatura del getto	86
7.2.3	Frazione solida.....	86
7.2.4	Porosità del getto	87
7.2.5	SDAS.....	88
7.3	Simulazione piastra con raffreddamento artificiale.....	89
7.3.1	Temperatura e deformazioni della conchiglia.....	90
7.3.2	Temperatura del getto	91
7.3.3	Frazione solida del getto	91
7.3.4	Porosità del getto	92
7.3.5	SDAS.....	93
8	Conclusioni	94
9	Riferimenti.....	96

1 Introduzione e scopo

L'alluminio sta acquistando un ruolo sempre più importante in molti settori grazie al suo costo minore in confronto ad altri metalli non ferrosi e alle sue proprietà fisiche e chimiche. La produzione di componenti in lega di alluminio può seguire diversi processi di fusione, uno dei più utilizzati è la colata in gravità in conchiglia, che offre molti vantaggi, tra cui ripetibilità, accuratezza e precisione.

Sono molti gli studi che cercano di ottimizzare questo processo fusorio; nel seguente elaborato si vogliono valutare i possibili benefici dati dall'alleggerimento della conchiglia. La modifica consiste in una riduzione dello spessore delle due mezze forme della conchiglia, mantenendo una distanza dal getto uniforme, in modo da rendere più omogeneo il raffreddamento. Per valutare i risultati e capire se possano esserci miglioramenti rispetto alla conchiglia convenzionale, ciò che viene analizzato è il tempo di solidificazione e raffreddamento del getto e le caratteristiche del getto, quali porosità e SDAS (secondary dendrite arm spacing – distanza interdendritica). Il miglioramento del processo, infatti, si avrebbe nel caso in cui uno di questi parametri risultasse ottimizzato: tempo ciclo inferiore oppure caratteristiche del getto migliorate (SDAS minore o porosità inferiori).

La valutazione dell'alleggerimento della conchiglia è stata condotta tramite simulazioni effettuate con un software basato sugli elementi finiti, ProCAST. Per poter interpretare i risultati ottenuti dal software, come prima cosa sono state effettuate delle prove di validazione; utilizzando un componente realmente prodotto, è stata effettuata una simulazione che riproducesse la sua realizzazione e, confrontando i risultati ottenuti dalla simulazione numerica e dall'analisi del componente reale, è stato possibile valutare l'efficacia del software. Il componente in questione è un supporto motore e le analisi effettuate sono di tipo termico e metallurgico; in particolare l'analisi termica è stata svolta sulla conchiglia tramite l'utilizzo di una termocamera ad infrarossi, che ha permesso di registrare le temperature dello stampo nel tempo e, quindi, di analizzare il transitorio termico nei primi cicli produttivi. Per quanto riguarda, invece, le prove metallurgiche, sono state effettuate analisi microscopiche e macroscopiche. Innanzitutto, il componente è stato sezionato e lucidato, successivamente è stato osservato al microscopio e in questo modo si è calcolato lo SDAS in diversi punti del campione. Per l'analisi macroscopica, invece, è stato necessario svolgere un attacco chimico sul componente, in modo da mettere in evidenza le dimensioni dei grani cristallini.

Nel seguente elaborato, dopo un'introduzione al processo di colata in conchiglia a gravità e una breve illustrazione delle sue caratteristiche e principali difetti, viene descritta la configurazione della simulazione sul software ProCAST e la metodologia utilizzata per i controlli termici e metallurgici sul componente realizzato nella linea di produzione. I risultati ottenuti dalle analisi sperimentali e dalla simulazione vengono poi confrontati valutando l'efficacia del software. Successivamente, si espone il procedimento seguito per alleggerire la conchiglia per la produzione del supporto motore e si svolge la simulazione con la conchiglia così modificata. Lo stesso procedimento è seguito anche su un componente più semplice, una piastra modellata appositamente per questa prova, sulla quale è effettuata una terza simulazione in cui la conchiglia è raffreddata artificialmente. Infine, vengono mostrati e confrontati i risultati ottenuti e vengono fatte le dovute considerazioni.

2 Alluminio: storia e come si ottiene

L'alluminio è il terzo elemento più abbondante nella crosta terrestre (8,1%). Non esiste come elemento solitario, ma si trova come composto, come l'ossido di alluminio, idrossido di alluminio e solfato di alluminio di potassio (1). Nonostante la forte presenza sulla crosta terrestre, il suo utilizzo incontra non poche difficoltà: insieme alla complessità della sua estrazione, altro ostacolo è la grande quantità di energia che serve per trasformarlo.

2.1 Storia dell'alluminio

L'alluminio è stato scoperto nel 1809 da Humphrey Davy ed è stato isolato per la prima volta nel 1825 da H. C. Oersted, ma solo nel 1886 è stato inventato un processo industriale in grado di ottenerlo. Nel 1886 è stato concepito un processo elettrolitico per ridurre l'allumina in alluminio; a farlo son stati due scienziati indipendenti: Charles Martin Hall negli Stati Uniti e Paul Héroult in Francia, da loro infatti prende il nome di *processo di Hall-Héroult*. (2)

L'alluminio viene ricavato dalla bauxite, la cui estrazione si può dividere in tre stadi: l'estrazione, la raffinazione e la riduzione. La bauxite viene estratta, lavata e seccata, prima di essere spostata negli impianti di raffinazione, dove verrà ricavata l'allumina. Per farlo sono possibili diversi metodi, anche se il processo di Bayer è quello più usato. Infine, tramite il processo di Hall-Héroult, si ottiene l'alluminio fuso.

Nella Figura 1 vengono schematizzati i passaggi per la produzione di alluminio a partire dalla bauxite e vengono messe in evidenza le quantità iniziali e finali, oltre che la grande mole di energia necessaria per la trasformazione.

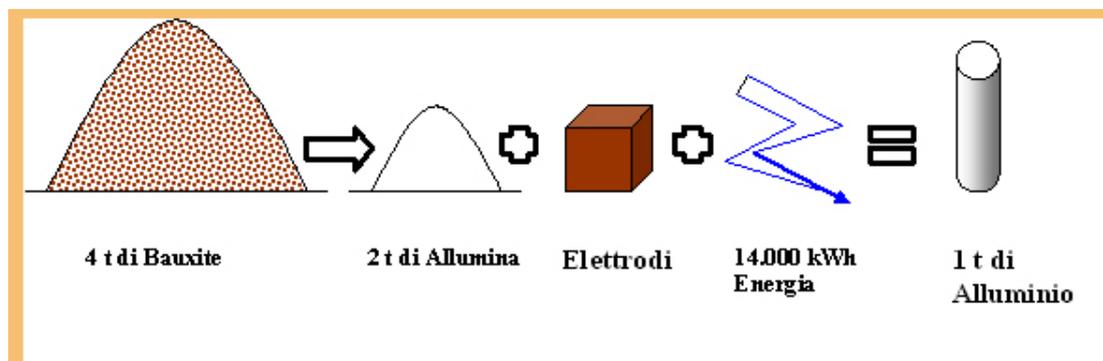


Figura 1 - passaggi per produzione alluminio

2.2 Processo di Bayer

La bauxite è una roccia sedimentaria che costituisce la principale fonte per la produzione dell'alluminio. La sua composizione è caratterizzata dalla presenza di diverse specie mineralogiche, tra cui prevalgono gli ossidi e gli idrossidi di alluminio e di ferro. La bauxite, dal punto di vista del suo utilizzo come fonte per l'alluminio, è ricca di impurità come silice e ossidi di ferro e titanio.

Il processo industriale di produzione dell'alluminio è il processo Bayer, che prevede come primo passo la separazione delle impurità dai sali di alluminio, mediante reazioni con soluzioni concentrate di idrossido di sodio: gli idrossidi di alluminio diventano alluminato sodico solubile in acqua, mentre le impurità non passano in soluzione e vengono, quindi, separate. Infine, l'alluminio dell'alluminato sodico viene fatto precipitare, per diluizione della soluzione, in idrossido di alluminio, che viene poi avviato alle successive fasi di purificazione.

2.3 Processo di Hall-Heroult

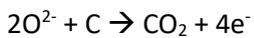
L'alluminio viene prodotto tramite il processo di Hall-Heroult, che prevede la dissoluzione dell'allumina in un bagno di criolite fusa e la conseguente formazione di un sale fuso che viene sottoposto a elettrolisi per ottenere l'alluminio. I soggetti principali del processo sono, quindi, l'allumina Al_2O_3 (78,4%), la criolite Na_3AlF_6 (2,9%) e il carbonio per gli elettrodi (18,7%). (3) Una delle reazioni principali è quella che mostra il passaggio da allumina a criolite:



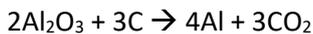
Al catodo i gruppi Al_xF_y sono ridotti e diventano alluminio fuso:



All'anodo le specie $\text{Al}_x\text{O}_2\text{F}_y$ si trasformano in bolle di diossido di carbonio invece di ossigeno O_2 per via dell'anodo di carbonio:



La reazione complessiva del processo è la seguente, in cui inizialmente sono presenti allumina e carbonio e alla fine si ottiene alluminio fuso e anidride carbonica:



Questo processo richiede una grande quantità di energia, circa 5kWh per kg di alluminio prodotto, in quanto prevede un'elettrolisi a due fasi che deve avvenire ad alta temperatura. (2) È possibile osservare una schematizzazione del processo nella Figura 2.

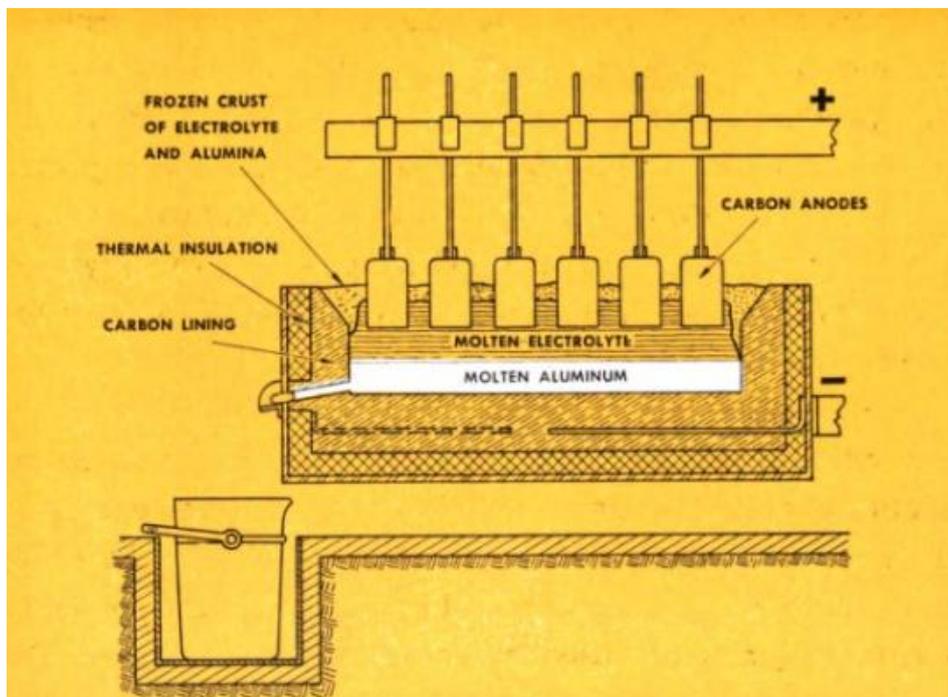


Figura 2 - schematizzazione del processo Hall-Heroult (fonte: (2))

3 Processi di colata

I processi sono molteplici e possono essere divisi in due grandi gruppi, quelli con forma permanente e quelli con forma transitoria. I fattori che possono essere presi in considerazione per scegliere il processo di colata sono molti (4), tra cui:

- Dimensione del getto
- Finitura della superficie richiesta
- Tolleranze dimensionali
- I costi delle attrezzature
- Spazio disponibile
- Caratteristiche della lega da colare
- Punto di fusione della lega da colare
- Forma del getto da colare

3.1 Processi con forma transitoria

Fanno parte di questa categoria i seguenti processi:

- colata in sabbia/terra,
- shell molding,
- lost foam,
- cera persa.

3.1.1 Colata in sabbia

Questo processo è il più diffuso e versatile ed è solitamente impiegato per la realizzazione di getti di grandi dimensioni (maggiori di 2m) e di getti di medie dimensioni nel caso in cui il numero di pezzi da costruire sia limitato (qualche decina). Innanzitutto, vengono realizzate le staffe, ovvero i due contenitori al cui interno si trova la miscela refrattaria su cui sono stati formati i negativi del modello voluto e dove viene colato il metallo fuso per realizzare il modello (Figura 3 e Figura 4). Una delle problematiche di questo processo è la grande quantità di aria che si forma durante la colata, il volume di gas che si forma è notevole, innanzitutto, per via dell'aria stessa della cavità che aumenta di volume con l'aumento della temperatura e poi l'aria presente tra grano e grano della sabbia che aumenta di volume e c'è anche sviluppo di vapor d'acqua quando questa è presente nella miscela. Tutti i gas e vapori non riescono a fuoriuscire attraverso la permeabilità della miscela della formatura e quindi è necessario realizzare dei condotti per favorire la loro uscita (condotti piccoli che vanno da pochi mm a circa 2cm). Altro problema reale è la possibile fuoriuscita di metallo liquido tra le due staffe; il piano di appoggio dei modelli sciolti non è preciso, inoltre, il piano delle placche potrebbe deformarsi nel tempo. Il materiale di formatura usato è la terra di fonderia (detta comunemente terra oppure sabbia verde) formata da sabbia silicea, bentonite e acqua.



Figura 3 - colata in terra (immagine da eurofondalp.com)

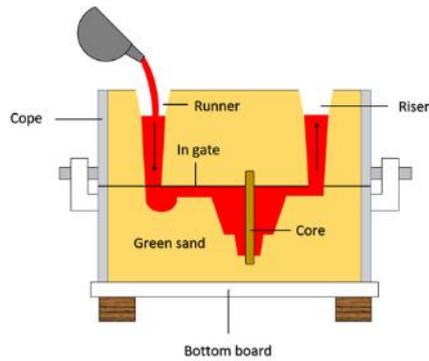


Figura 4 - colata in sabbia verde (immagine da (5))

3.1.2 Formatura a guscio (shell moulding)

Per la realizzazione delle forme a guscio, viene scaldata una placca metallica completa di dispositivi di colata a 250°C. Successivamente la placca viene cosparsa da una sostanza separante (costituita da emulsioni di siliconi) e poi capovolta su un contenitore riempito di sabbia agglomerata (Figura 5.1), andando a ruotare di 180° il complesso (Figura 5.2) la sabbia va a ricoprire la placca. Per effetto del calore, dopo pochi secondi, la miscela di sabbia e resina indurisce andando a formare un guscio, il cui spessore va dai 4 ai 10mm a seconda delle dimensioni e del peso dei getti da ottenere. Lo spessore varia in base alla durata del trattamento e va a modificare la solidità del guscio. A questo punto il guscio e la placca vengono inseriti in un forno di cottura (Figura 5.4) ad una temperatura di 400° per qualche minuto, di modo che il guscio acquisti durezza e resistenza elevate. Terminato questo processo, il guscio viene separato dalla placca (Figura 5.5) e si procede alla realizzazione del secondo mezzo guscio. Una volta pronti entrambi i mezzi gusci, è possibile unirli e procedere con l'inserimento del guscio all'interno della sabbia e poi eseguire la colata, alla quale seguirà, a raffreddamento dei getti, la demolizione dei gusci.

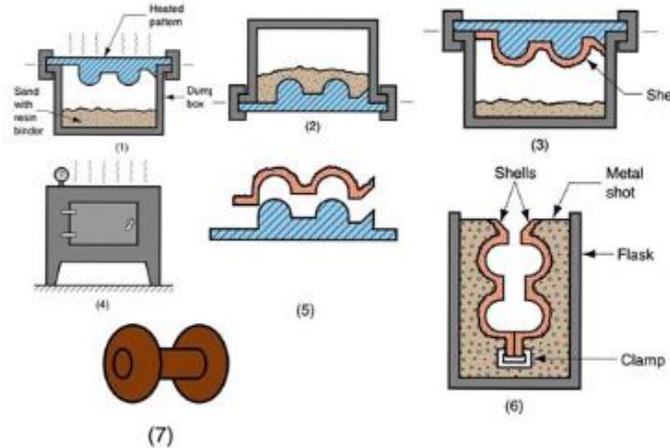


Figura 5 - shell moulding (immagine da (4))

3.1.3 Formatura ceramica o fusione a cera persa (investment casting)

Questo processo fusorio viene applicato nel caso in cui i componenti da realizzare abbiano una forma quasi finita, ovvero che necessita di poche lavorazioni alle macchine utensili per ottenere i requisiti richiesti in termini di tolleranza. La forma ottenuta può essere geometricamente molto complessa, difficilmente ottenibile con altre tecniche di lavorazione.

Il processo in questione viene mostrato nella Figura 6. Per ogni getto si parte da un modello in cera dello stesso, ottenuto iniettando questo materiale termoplastico in uno stampo o conchiglia. I modelli in cera così ottenuti vengono saldati su dei supporti in cera, andando a formare il cosiddetto "grappolo"; quest'ultimo viene immerso in impasti ceramici e conseguenti rivestimenti per aspersione con refrattari a granulometria crescente, ottenendo così il guscio ceramico. Dopo averlo essiccato, viene inserito all'interno di un'autoclave o di un forno per evacuare la cera. Il guscio subisce ancora un ciclo di preriscaldamento e cottura, necessario per il suo consolidamento meccanico e a garantire un adeguato riempimento del metallo liquido durante il colaggio. Infine, dopo solidificazione e raffreddamento, il grappolo viene liberato dal guscio tramite un processo di vibrazione e successivamente sabbiato e troncato. Dopo aver rimosso gli attacchi di colata, i componenti ottenuti sono pronti.

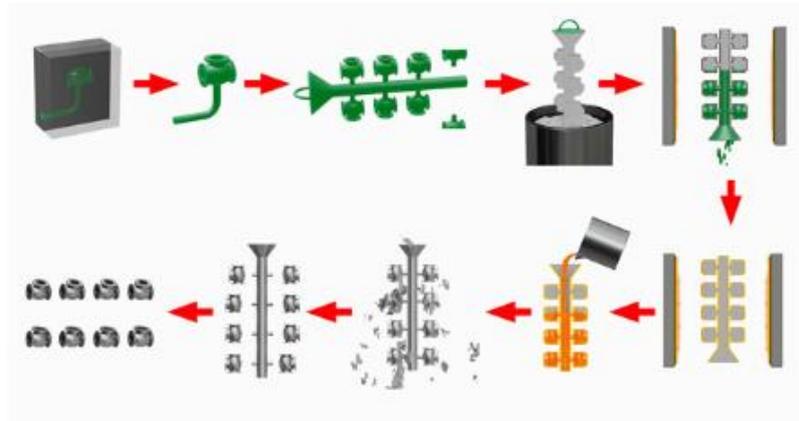


Figura 6 - fusione a cera persa (immagine da (5))

3.1.4 Formatura lost foam (schiuma a perdere)

Si tratta di un processo di colata in forma a perdere che prevede la realizzazione del modello in polistirene, la sua verniciatura, l'insabbiamento e la colata della lega liquida direttamente sul modello, come schematizzato nella Figura 7.

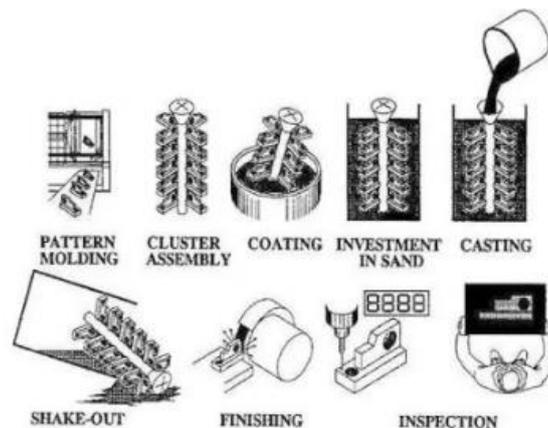


Figura 7 - processo lost foam (immagine da (5))

La degradazione del modello determina lo sviluppo di gas e la creazione di una sovrappressione che si oppone all'avanzamento del metallo fuso. La forma che sostiene il modello durante la colata, costituita dalla vernice e dalla sabbia, deve avere una permeabilità tale da consentire la fuoriuscita dei prodotti della combustione del grappolo; se questi rimanessero intrappolati, determinerebbero la discontinuità della matrice metallica. (6)

3.2 Processi con forma permanente

I principali processi di questo tipo sono:

- colata in conchiglia per gravità (di cui verrà discusso nel dettaglio in un capitolo a parte),
- colata in conchiglia a bassa pressione,
- colata per centrifugazione,
- formatura da liquido per colata sotto pressione (pressocolata),
- formatura allo stato semi-solido (thixoforming),
- squeeze casting.

3.2.1 Colata in bassa pressione

La lega fusa è mantenuta in un crogiolo a tenuta ermetica (in rosso nella Figura 8) riscaldato ad induzione. Mediante aria compressa (0,2-0,7 atm) il metallo è spinto attraverso un condotto fino alla conchiglia, posta superiormente (grigio scuro nella Figura 8). Questa pressione viene mantenuta per 10-15 minuti secondo le dimensioni del getto, finché la lega non si sia ben solidificata nella forma. Il metallo che rimane fuso (all'interno dell'attacco di colata e nel tubo verticale che lo collega al crogiuolo) ritorna nel crogiuolo una volta che sia cessata l'azione della pressione. Con questo processo è possibile ottenere getti del peso di oltre 40 kg. (6)

Tra i vantaggi della colata in bassa pressione c'è il maggior rendimento, dovuto al metodo di alimentazione dello stampo (il metallo utile è distinto da quello delle materozze e degli alimentatori) e da un'eccezionale compattezza del getto, in quanto la lega solidifica partendo dalla parte più lontana verso l'attacco di colata.

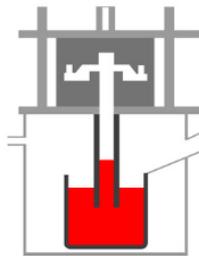


Figura 8 - colata in bassa pressione (immagine da (5))

3.2.2 Colata per centrifugazione

Questo processo prevede che lo stampo venga ruotato ad alta velocità in modo che la forza centrifuga distribuisca il metallo fuso nella cavità dello stampo. L'asse di rotazione può essere orizzontale o verticale (Figura 9), la conchiglia è in acciaio e la forma della figura da realizzare è cilindrica sia internamente che esternamente (Figura 10). Quando il getto solidifica, il tubo si contrae e può essere estratto facilmente. La superficie esterna assume la forma dello stampo, mentre quella interna è cilindrica ma presenta delle imperfezioni.

Tra i vantaggi di questa tecnologia ci sono:

- la contrazione esterna dovuta alla solidificazione non è importante perché la forza centrifuga rialloca continuamente il metallo fuso verso la parete dello stampo durante la solidificazione;
- le eventuali impurità tendono a concentrarsi sulla parete interna e, se necessario, possono essere facilmente rimosse mediante asportazione di truciolo.

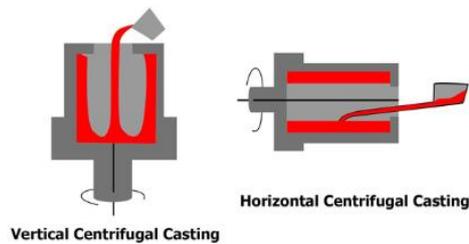


Figura 9 - colata per centrifugazione - verticale e orizzontale (immagine da (5))

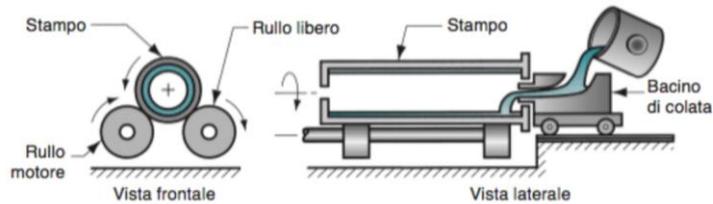


Figura 10 - colata per centrifugazione

3.2.3 Formatura da liquido per colata sotto pressione (pressofusione)

Questa tecnologia fusoria (Figura 11) prevede il riempimento della conchiglia mediante l'ausilio di un sistema d'iniezione del metallo liquido, in questo modo è possibile controllare e imporre la velocità del liquido durante il riempimento e la pressione sul materiale in via di solidificazione, che contrasta e compensa la contrazione dovuta al ritiro di solidificazione. Criticità di questo processo sono le turbolenze che si creano nel metallo fuso e la difficile fuoriuscita dei gas dalla cavità.

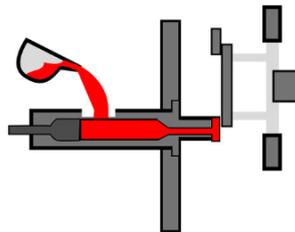


Figura 11 – pressocolata (immagine da (5))

3.2.4 Formatura allo stato semi-solido (tixoformatura)

In questo processo il materiale si trova sotto forma di stato semi-solido e arriva a questa condizione partendo dallo stato solido (in tal caso si chiama "sato mushy") oppure dallo stato liquido (in questo caso si parla semplicemente di stato "semi-solido"). Il termine "semi-solido" è in realtà usato in entrambi i casi, anche se le caratteristiche meccaniche che ne conseguono sono diverse, a meno che la temperatura del processo non sia molto simile. (6) Per quanto riguarda le leghe di alluminio, queste vengono portate allo stato liquido tramite agitazione elettromagnetica.

In generale, il processo di tixoformatura si può descrivere con i seguenti passaggi:

- Produzione del materiale grezzo per fusione
- Riscaldamento del materiale fino allo stato semi-solido
- Formatura semi-solida in una pressa per tixoformatura
- Modificazione delle proprietà finali attraverso post-trattamento.

In alcuni casi la formatura in pressa viene divisa in due fasi (come mostrato nella Figura 12): nella prima viene prodotta in condizioni isoterme una preforma e nella seconda fase si ottiene il prodotto finito per forgiatura. In questo modo il materiale non solidifica durante la formatura semi-solida e viene sfruttato completamente il comportamento tixotropico.

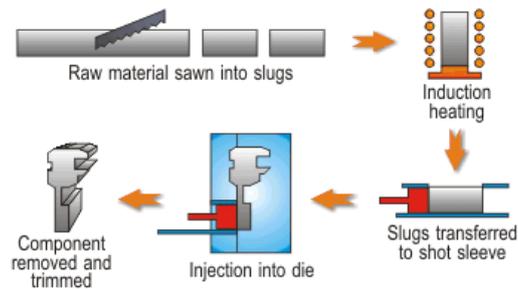


Figura 12 - tixoformatura - formatura in pressa divisa in due fasi (immagine da azom.com)

3.2.5 Squeeze casting

Esistono due versioni di questo processo: il metodo diretto e quello indiretto. In entrambi i casi il metallo liquido viene introdotto nella cavità dello stampo chiuso minimizzando la turbolenza in ingresso e solidificando sotto una forte pressione. L'alta pressione e l'intimo contatto tra il metallo fuso e la parete dello stampo permettono di ottenere una solidificazione rapida, una porosità minima ed eccellenti proprietà meccaniche. (6) Nel metodo diretto (schematizzato in Figura 13), il metallo fuso è inserito nella parte inferiore di uno stampo posto all'interno di una pressa idraulica, la parte superiore dello stampo poi si chiude e su questo viene applicata una pressione (di 100MPa e oltre) sull'intera cavità, fino a solidificazione.

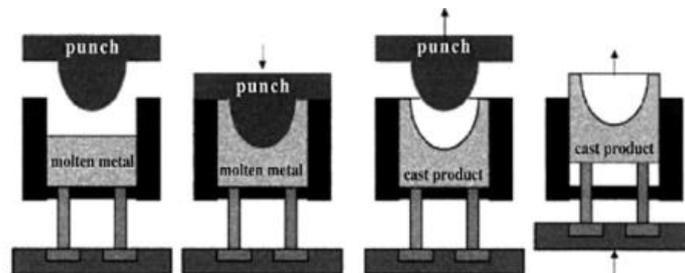


Figura 13 - squeeze casting diretto (immagine da (7))

Il processo indiretto (schematizzato nella Figura 14) può essere sia verticale che orizzontale; il metallo viene caricato in un manicotto dotato di un fondo costituito da un pistone idraulico mobile e viene iniettato nello stampo attraverso un gate largo ad una velocità relativamente bassa (0,5m/s). il fuso solidifica nello stampo sotto una pressione che può andare dai 55 ai 300MPa.

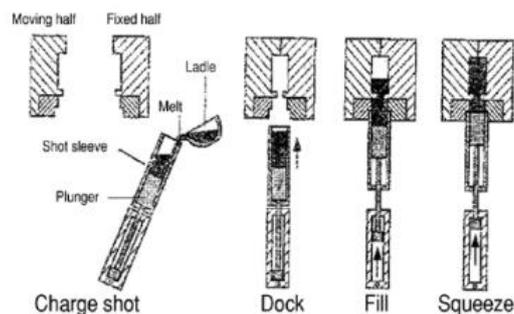


Figura 14 - processo di squeeze casting indiretto (figura da (7))

4 Colata in gravità in conchiglia

La colata in gravità può avvenire in forme di sabbia o stampi metallici (colata in conchiglia), del primo processo si è accennato nel capitolo 3.1.1, si vuole ora discutere in modo un po' più approfondito della colata in conchiglia. In questo processo viene usata la gravità per versare il metallo fuso, tramite un canale di riempimento, in stampi metallici realizzati in due metà che formano lo "stampo a conchiglia". Trascorso il tempo di raffreddamento necessario, vengono estratti i semilavorati, che, dopo le lavorazioni di finitura, diverranno prodotti finiti.

Le attrezzature per questo processo possono avere un'apertura orizzontale, verticale oppure possono disporre di una tecnologia di basculamento. Nella Figura 15 viene rappresentata una semplificazione del processo che verrà descritto più accuratamente del capitolo 4.3.

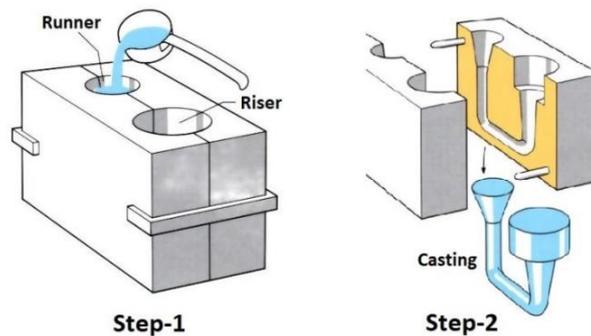


Figura 15 - colata in gravità in conchiglia con apertura orizzontale (runner: alimentazione, riser: materozza)

Questo processo è usato per produrre medie e medio-grandi serie di pezzi, poiché garantisce una buona finitura superficiale, una discreta accuratezza dimensionale e ottime caratteristiche meccaniche. È molto simile a quello che avviene in sabbia, i parametri che li distinguono sono principalmente: il coefficiente di scambio termico, la rigidità della forma e la permeabilità. Il coefficiente di scambio termico è molto diverso nei due casi, anche se, in realtà, il contatto diretto tra stampo e pezzo viene rapidamente sostituito da una intercapedine di aria che determina una drastica riduzione della velocità di raffreddamento; ciò avviene con le medesime modalità in conchiglia e nelle forme in sabbia, perciò, questo fattore non comporta sostanziali differenze tra i due processi di solidificazione. Per quanto riguarda la rigidità della forma, invece, la conchiglia ha una rigidità maggiore rispetto alle forme transitorie in sabbia e questo comporta la necessità di processare materiali affetti da una scarsa tendenza alla fragilità da ritiro. In quanto alla permeabilità, le forme in sabbia sono permeabili e consentono di evacuare l'aria presente nelle cavità e i gas che si formano durante il riempimento e la solidificazione del liquido, mentre la forma metallica è impermeabile e richiede opportuni sfoghi, o tirate d'aria, predisposti per l'evacuazione dei gas. (6) I vantaggi del processo di colata in conchiglia, rispetto a quello in forma in sabbia, sono molteplici, tra cui:

- **maggiore produttività** grazie ad un tempo ciclo inferiore;
- **dimensioni del grano cristallino inferiore** dovuta alla maggiore velocità di raffreddamento;
- **incremento delle caratteristiche meccaniche** sia resistenziali che di duttilità grazie alla riduzione del grano cristallino;
- **ristrette tolleranze dimensionali e buona finitura superficiale del getto** grazie alla maggiore precisione dimensionale e finitura superficiale della cavità;
- **ridotti sovrametalli** grazie all'elevata precisione dimensionale del getto, è possibile adottare sovrametalli dell'ordine dei decimi di millimetro. In ragione di ciò, si ottiene una riduzione dell'entità delle lavorazioni meccaniche e quindi risparmi in termini di peso del materiale colato e del materiale asportato alle macchine utensili;

- **durata pari alla produzione di 100.000 getti circa**, in realtà la durata dipende da molti fattori (materiale dello stampo, peso e geometria del getto, progetto del sistema di riempimento, fattori riguardanti il processo, ecc...). Con le conchiglie in ghisa tale durata è possibile solo quando la finitura superficiale e l'estetica del getto non siano un vincolo, in tutti gli altri casi sono preferibili gli acciai. (6)
- **possibilità di automatizzare il processo.**

Uno degli svantaggi del processo di colata in conchiglia, però, è l'elevato costo dell'attrezzatura che richiede la necessità di lotti produttivi consistenti. Nella Figura 16 viene mostrato il costo relativo per componente in funzione del numero di pezzi prodotti confrontando tre diversi processi di fusione: colata per gravità in conchiglia, colata in sabbia e bassa pressione. Si può osservare che il costo per piccoli lotti è molto alto nel caso di colata in conchiglia, ma si abbassa notevolmente per grandi produzioni.

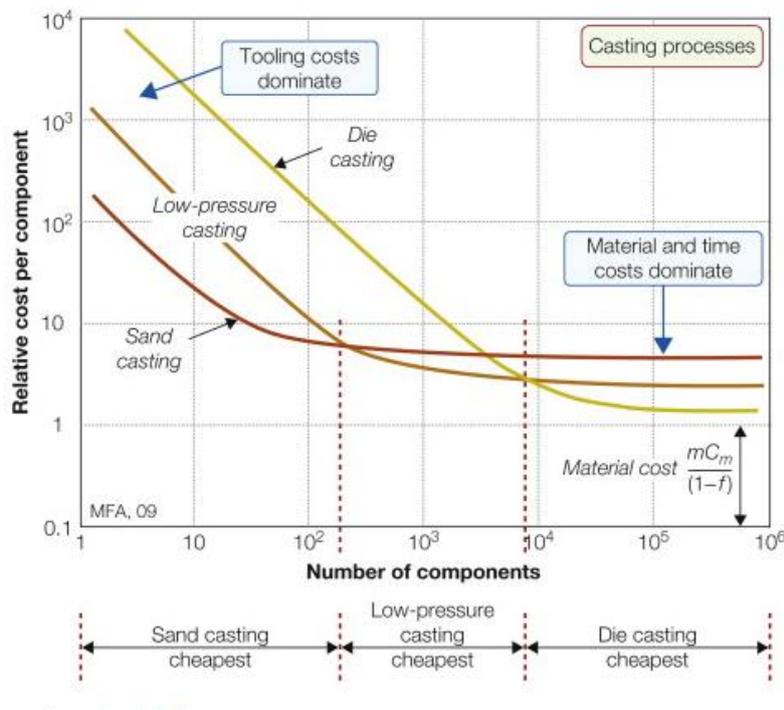


Figura 16 - confronto tra costo per componente in funzione del numero di pezzi prodotti – colata in sabbia, bassa pressione e in conchiglia (fonte (8))

La qualità di un getto prodotto in colata in conchiglia in gravità dipende da molteplici fattori, di seguito vengono elencati i principali:

- lubrificazione delle parti mobili,
- temperatura della conchiglia,
- superficie interna della conchiglia,
- presenza di materozze e come lavorano,
- canali di colata,
- turbolenze del metallo liquido quando entra nella forma: è importante riempire lo stampo con la minore turbolenza possibile per ridurre l'ossidazione e l'inclusione dell'aria.

4.1 Descrizione della conchiglia

La conchiglia è costituita da due mezze forme al cui interno è presente la cavità formante il componente voluto, il canale di colata e le materozze, come mostrato in Figura 17.

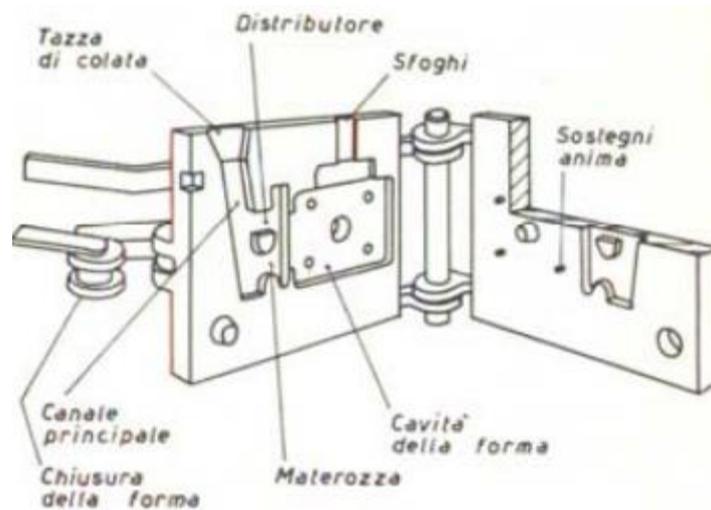


Figura 17 - conchiglia e parti principali che la costituiscono

Il sistema di colata è costituito da:

- La tazza (o bacino) di colata: la sua funzione è quella di permettere al fluido una discesa rapida e di impedire a pellicole e aria di scendere nella cavità,
- Il canale principale (o bastone di colata): la sua altezza è determinata dal getto e dall'altezza degli alimentatori,
- Il pozzetto posto alla base del colatoio: questo elemento è necessario per ridurre la turbolenza del fluido. Molto spesso vengono poste delle retine in modo da ridurre maggiormente l'effetto. Nella Figura 18 viene mostrato l'andamento del fluido con e senza pozzetto.

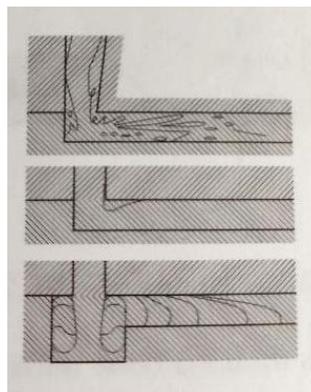


Figura 18 - andamento del fluido senza pozzetto (due figure superiori) e con pozzetto (immagine inferiore)

- Canali secondari: permettono al fluido l'ingresso nella cavità del pezzo da produrre.
- Trappole: la loro presenza in corrispondenza dei canali secondari evita il trascinarsi delle impurità nella cavità del getto.
- Sfiati: servono per permettere all'aria di uscire dalla cavità.

4.2 Descrizione del processo produttivo

Per comprendere meglio come avvenga il processo di fusione dell'alluminio è necessario descrivere i passaggi fondamentali partendo da quando arrivano i lingotti nella fonderia fino al momento in cui il prodotto esce finito:

- 1- Il processo inizia dai lingotti, che solitamente vengono prodotti esternamente e perciò si rende necessario controllare con il quantometro che la lega abbia la composizione richiesta.
- 2- I lingotti vengono inseriti nei forni fusori insieme agli sfridi (costituiti da canali di alimentazione, materozze o pezzi di scarto) in quantità che vengono decise internamente all'azienda (le percentuali possono variare da 50-50 fino a 70-30 di lingotti-sfridi).
- 3- Dai forni fusori viene estratto il metallo fuso e posto in una siviera, in cui deve avvenire il degasaggio.
- 4- Il metallo fuso viene versato nei forni di mantenimento, adiacenti le postazioni di lavoro.
- 5- Dai forni di mantenimento viene prelevato il metallo fuso da colare all'interno delle conchiglie tramite una tazza (questo passaggio può essere manuale oppure automatizzato con robot).
- 6- A questo punto inizia il ciclo di lavoro, che verrà descritto nel capitolo 4.3.
- 7- La conchiglia si apre automaticamente a fine solidificazione e raffreddamento del getto e, una volta estratto dallo stampo, è pronto per le lavorazioni finali (descritte nel capitolo 4.9).
- 8- Conclusi i trattamenti di finitura è possibile effettuare i controlli richiesti per i componenti.

La verniciatura è un'operazione molto importante, che non rientra nel ciclo appena visto ma che è fondamentale per la buona riuscita dei componenti. Dopo un certo numero di battute è richiesta l'intera verniciatura della conchiglia (trattamento che verrà descritto meglio nel capitolo 4.7), ma a volte è necessario intervenire con la conchiglia in produzione ed effettuare una rinfresatura.

4.3 Descrizione del ciclo di lavoro

Il ciclo di lavoro prevede i seguenti passaggi:

1. Concluso il ciclo di lavoro, con le due mezze forme aperte, se necessario, si effettua una rinfresatura della conchiglia
2. Si effettua una pulizia delle due metà delle conchiglie in modo da eliminare possibili residui che non permetterebbero la corretta chiusura dello stampo (Figura 19.1)
3. Vengono inserite eventuali anime e retine in prossimità del pozzetto alla base del canale di colata (Figura 19.2)
4. La conchiglia si chiude
5. Viene prelevato il metallo fuso dal forno di mantenimento e viene colato nel bacino di colata (Figura 19.3)
6. Avviene il processo di solidificazione e raffreddamento
7. La conchiglia si apre e si può estrarre il getto (Figura 19.4). Il ciclo di lavoro può ricominciare.

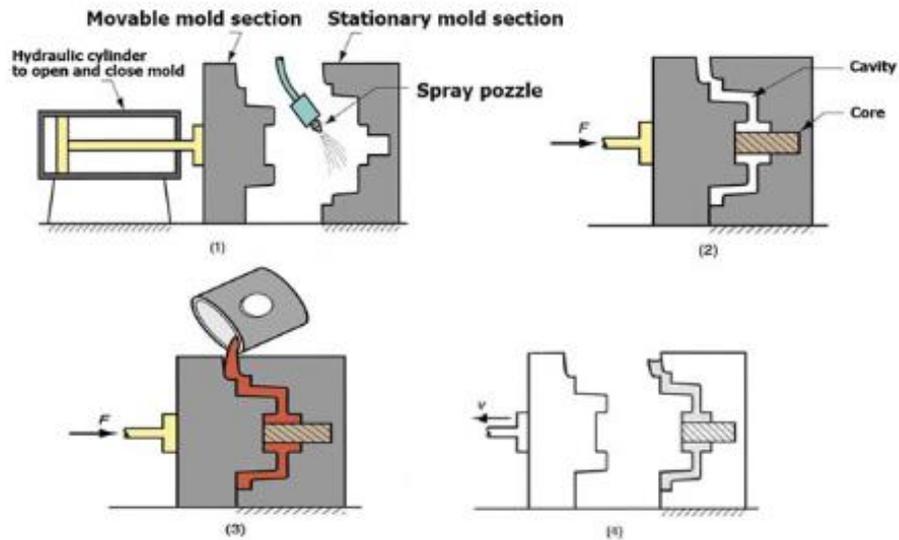


Figura 19 - processo schematicizzato di colata in conchiglia

4.4 Leghe per colata in gravità

4.4.1 Controllo della composizione

Composizione della lega viene controllata almeno due volte: quando i lingotti arrivano in azienda dal fornitore e dai forni di mantenimento per verificare che la composizione sia corretta, dopo le varie modifiche effettuate.

Per verificare la composizione della lega, si utilizza il quantometro (o spettrometro). La spettrometria ad emissione ottica (OES) è una tecnica analitica, universalmente riconosciuta e utilizzata per determinare la composizione chimica delle leghe metalliche. La parte dello spettro elettromagnetico utilizzato da questa tecnologia include lo spettro del visibile e parte di quello ultravioletto; in particolare, dai 130 nm a 800 nm.

Un provino della lega da analizzare viene posizionato sul quantometro, in modo che la punta dell'elettrodo sia posizionata sopra la superficie del campione; tra elettrodo e provino viene generata una scarica elettrica che, interagendo con gli atomi, fa in modo che gli elettroni più esterni vengano allontanati. In questo modo gli elettroni che si sono allontanati creano delle vacanze che rendono gli atomi instabili. Per tornare alla condizione di equilibrio, gli elettroni si spostano nuovamente dall'orbita più distante a quella dove avevano lasciato la vacanza. L'energia rilasciata dagli elettroni per spostarsi tra i due livelli di energia è emessa in forma di emissione ottica specifica per ogni elemento. Perciò, ogni elemento emette una serie di linee spettrali che corrispondono alla diversa transizione di elettroni tra i diversi livelli di energia e ogni transizione produce una specifica linea ottica con una lunghezza d'onda specifica o energia di radiazione. (9)

Successivamente, i segnali dei picchi di ogni linea spettrale vengono collezionati e processati in modo da generare uno spettro che mostri i picchi di intensità luminosa rispetto alle lunghezze d'onda. La lunghezza d'onda del picco identifica l'elemento, mentre l'area del picco dà indicazioni sulla sua quantità nel provino.

4.4.2 Leghe per getti

Circa il 40% delle leghe in alluminio impiegate in Italia viene utilizzato in fonderia per la produzione di getti. Le leghe per getti non presentano un unico sistema di unificazione riconosciuto a livello mondiale; nell'Unione Europea si utilizzano attualmente due sistemi di designazione, uno numerico (norma EN 1780-1) e uno simbolico (norma EN 1780-2).

Secondo la normativa EN 1780-1 la designazione numerica deve essere costituita nel seguente ordine: (10)

- I. Prefisso EN seguito da uno spazio vuoto;
- II. Lettera A indicante alluminio;
- III. Una lettera rappresentante la forma del prodotto:
 - B nel caso di lingotti di lega di alluminio da fondere,
 - C nel caso di getti,
 - M nel caso di lega madre;
- IV. Un trattino;
- V. Cinque cifre rappresentanti la composizione della lega, come viene mostrato nella Tabella 1.

Tabella 1 - designazione leghe di alluminio secondo normativa EN 1780-1

macro-gruppi leghe	principale elemento di lega	gruppi di leghe	elementi di lega principali
1xxxx	-	10xxx	(Al puro al 99,5%)
2xxxx	rame	21xxx	Al Cu
4xxxx	silicio	41xxx	Al SiMgTi
		42xxx	Al Si7Mg
		43xxx	Al Si10Mg
		44xxx	Al Si
		45xxx	Al Si5Cu
		46xxx	Al Si9Cu
		47xxx	Al Si(Cu)
48xxx	Al SiCuNiMg		
5xxxx	magnesio	51xxx	Al Mg
7xxxx	zinco	71xxx	Al ZnMg

La prima cifra rappresenta il principale elemento di lega, la seconda gli altri elementi principali, la terza è arbitraria, la quarta generalmente è pari a 0 e l'ultima solitamente è 0, fatta eccezione per le applicazioni aerospaziali.

In alternativa, secondo la normativa EN 1780-2, le cinque cifre possono essere sostituite dagli elementi di lega principali. (11)

Nella Tabella 2 viene mostrato un esempio di designazione secondo le due normative.

Tabella 2 - esempio di designazione di una lega secondo le due normative

normativa	EN 1780-1	EN 1780-2	entrambe
designazione	EN AB-45400	EN AB-Al Si5Cu3	EN AB-45400 [Al Si5Cu3]

4.4.3 Leghe per colata in gravità: elaborazione e preparazione del metallo liquido

Sono adatte alla colata in conchiglia a gravità le leghe di alluminio caratterizzate da: (12)

- scarsa tendenza alla fragilità a caldo (necessaria perché la rigidità della forma determina nel getto la nascita di rilevanti tensioni durante la solidificazione, a causa della contrazione volumetrica);
- buona colabilità: capacità di un materiale allo stato liquido di riempire una forma riproducendone la geometria, ma non solo, con “buona colabilità” si intende anche la capacità di ottenere un getto omogeneo, uniforme nella sua composizione, senza porosità e cricche (13);
- buona fluidità: attitudine delle varie parti di un fluido di scorrere le une sulle altre;
- scarsa tendenza ad inglobare gas (principalmente ossigeno e idrogeno);
- (preferibile) direzionalità di solidificazione.

Le leghe che rispondono a queste esigenze sono preferibilmente quelle che presentano un ristretto intervallo di solidificazione, tra cui: Al-Si, Al-Si-Cu e Al-Si-Mg. Altre leghe impiegate sono Al-Mg, Al-Zn-Cu, Al-Zn-Mg e Al-Zn-Mg-Cu. (6)

Poiché nella maggioranza dei casi il silicio è l'elemento principale in lega con l'alluminio, si pone l'attenzione su questo elemento e su come altri elementi possano migliorarne le caratteristiche.

4.4.3.1 Alliganti

Il silicio è uno dei principali alliganti utilizzati nelle leghe di alluminio, la cui presenza può variare dal 2 al 13%. La sua aggiunta permette di:

- aumentare la colabilità e la fluidità,
- ridurre la fragilità da ritiro,
- aumentare le caratteristiche meccaniche,
- abbassare la temperatura di fusione in prossimità dell'eutettico.

Come si può vedere dal diagramma di stato in Figura 20, l'alluminio forma un eutettico con l'11,7% di silicio avente punto di solidificazione pari a 577°C. La scelta della lega eutettica (o prossima all'eutettico) consente di limitare il contenuto di gas disciolti e ridurre l'ampiezza dell'intervallo di solidificazione, da cui dipende la fragilità a caldo.

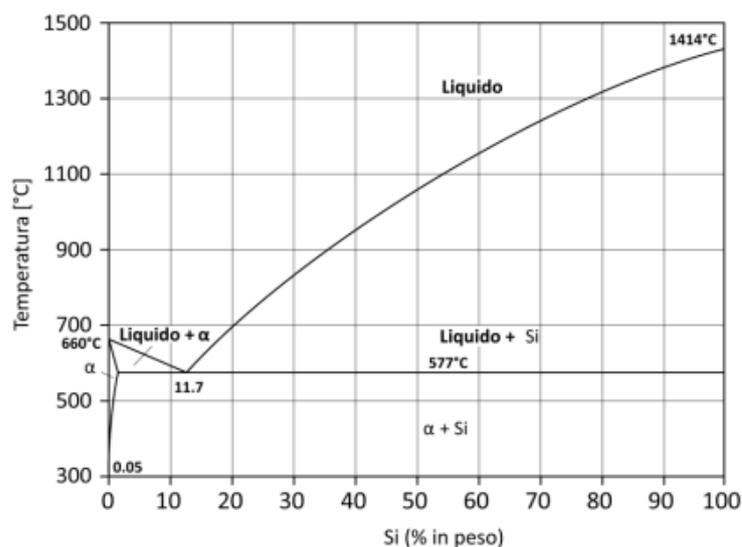


Figura 20 - diagramma di stato Al-Si (immagine da (14))

Per quanto riguarda la variazione di fluidità, in Figura 21 viene mostrato come vari all'aumentare della presenza di silicio nella lega. Con fluidità si intende la distanza che un metallo fuso percorre in un condotto a sezione sottile prima di solidificare. (14)

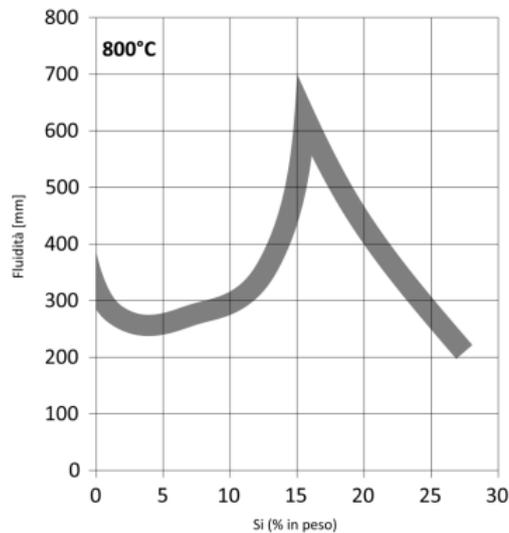


Figura 21 - effetto del silicio sulla fluidità dell'alluminio (immagine da (14))

Le leghe Al-Si sono caratterizzate da bassi valori di tenacità e di deformabilità a freddo, per via della microstruttura costituita da dendriti di alluminio e strutture aciculari ricche di silicio. Tenacità e deformabilità possono essere migliorate con opportune modifiche del fuso: vengono aggiunti elementi chimici che, pur non entrando in lega, favoriscono la formazione di aggregati cristallini di silicio molto fini e di forma globulare. Relativamente alla modifica, verrà discusso più avanti nel dettaglio di cosa si tratta.

Le leghe Al-Si presentano le seguenti proprietà meccaniche:

- carico unitario di rottura $R = 150-190$ MPa;
- carico unitario di snervamento $R_{p0.2} = 100-160$ MPa;
- durezza Brinell = 50-90 HB;
- modulo elastico $E = 70000$ MPa;
- allungamento percentuale a rottura $A\% = 0.5-3\%$.

Gli elementi che possono entrare nelle leghe Al-Si sono molteplici, in particolare, si trovano il rame e il magnesio. Il **rame** migliora la resistenza, la durezza e comportamento a trattamenti termici, a scapito, però, della resistenza a corrosione e della colabilità. Il **magnesio** è fondamentale per l'aumento di resistenza e di durezza nei trattamenti termici delle leghe Al-Si. La fase indurente Mg_2Si mostra un limite di solubilità pari a circa 0,70% Mg, oltre il quale non si nota un aumento delle caratteristiche meccaniche. Solitamente le percentuali di Mg presente nelle leghe Al-Si vanno da 0,4 a 0,7%. Il problema di questa lega è l'estrema facilità con la quale si può perdere il Mg nel bagno fuso, per via della sua affinità con l'ossigeno rispetto a quella con l'alluminio. Per questo motivo le leghe contenenti Mg devono essere tenute allo stato fuso il minor tempo possibile e si deve evitare di surriscaldare la lega liquida. (15)

4.4.3.2 Modifica

Le leghe Al-Si sono suscettibili al trattamento metallurgico di modifica strutturale detto "modifica", il quale permette di incrementare le caratteristiche meccaniche e la duttilità. È possibile intanto osservare in Figura 22 l'effetto della modifica sulla lega.

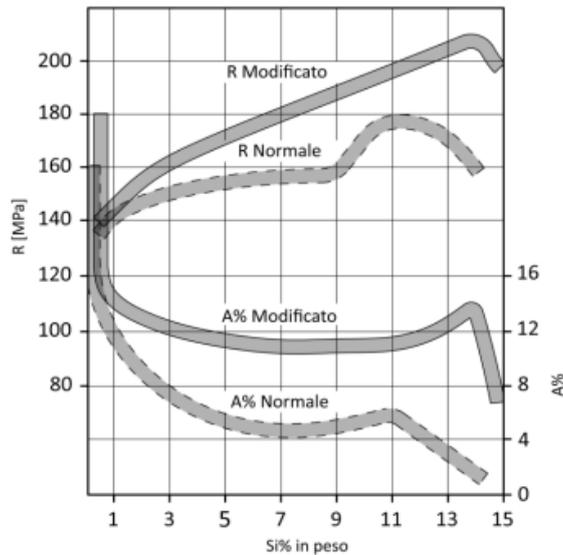


Figura 22 - effetto della modifica su carico unitario a rottura (R) e allungamento percentuale a rottura (A%) (immagine da (14))

Tra gli elementi che vengono utilizzati a questo scopo, i principali sono: **sodio** e **stronzio** (in quantità limitate, 0.008-0.04%, poiché quantità maggiori creerebbero porosità nei getti e peggiorerebbero il degasaggio), ma anche **calcio** e **antimonio** possono essere utilizzati.

L'aggiunta di questi elementi alla lega permette di ottenere un reticolo lamellare o fibroso più fine. Il meccanismo per cui ciò avviene ancora non è chiaro, ma l'opinione più comune è che gli additivi blocchino la crescita dei cristalli di silicio, portando ad avere una distribuzione più fine del grano, simile a quanto avviene nel punto di eutettico. (15)

L'aggiunta degli elementi modificanti, tuttavia, è collegata ad un aumento della presenza di idrogeno. Nel caso di sodio e calcio, sono coinvolti in reazioni turbolente o da reazioni che per loro natura aumentano i livelli di idrogeno disciolto. Per quanto riguarda lo stronzio, invece, aumenta la solubilità dell'idrogeno nella lega. Per questo motivo è importante effettuare la modifica all'interno della siviera, subito dopo aver prelevato il metallo fuso dal forno fusorio e, soprattutto, effettuare subito dopo il degasaggio tramite il flusso di gas inerte. (15)

4.4.3.3 Affinamento

La solidificazione inizia con la formazione delle dendriti in soluzione liquida e lo spazio tra la struttura dendritica corrisponde alla distanza tra i bracci delle dendriti primarie, che dipende solo dalla velocità di solidificazione. Tramite analisi micrografica è possibile definire la velocità alla quale ogni regione si è solidificata. Nella Figura 23 si può vedere come la variazione di velocità di solidificazione, e quindi variazione di distanza interdendritica (SDAS), comporti un cambiamento nelle caratteristiche meccaniche della lega.

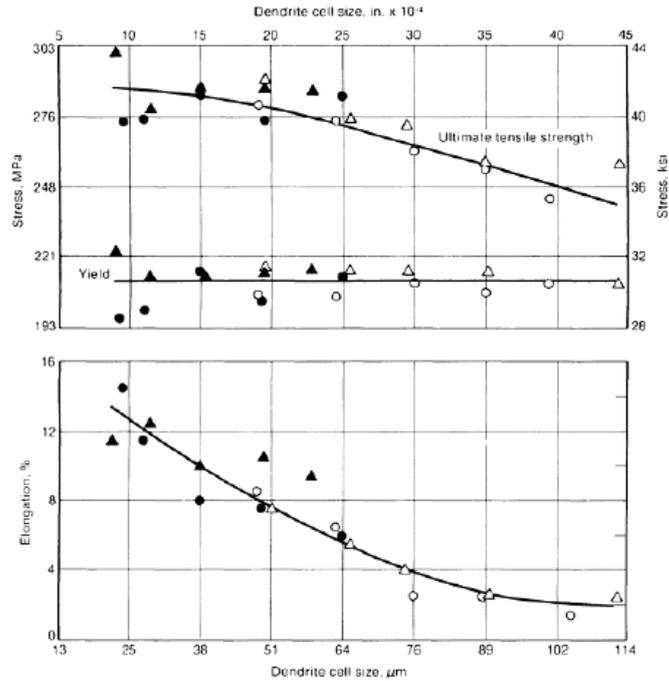


Figura 23 - resistenza e allungamento rispetto a dimensioni dello spazio interdendritico (immagine da (15))

Una microstruttura più fine ha diversi vantaggi nei getti, come: (15)

- Minor ritiro volumetrico,
- Maggior resistenza a caldo,
- Minor porosità da idrogeno,
- Migliori caratteristiche meccaniche,
- Miglior risposta al trattamento termico,
- Miglior aspetto dopo finiture di vario genere.

Per l'affinamento del grano vengono utilizzati i seguenti elementi: **titanio (TiAl₃)** oppure **titanio e boro (TiB₂)**. Il titanio viene aggiunto in lega all'alluminio, lega che contiene tra il 3 e il 10% di Ti. Le stesse percentuali sono utilizzate in leghe Al-Ti-B, in cui il boro è presente tra 0.2 e 1% e il rapporto tra titanio e boro va da 5 a 50 (l'eccesso di fase TiB₂ è necessario per un buon affinamento).

Come per la modifica, anche l'aggiunta di elementi per l'affinamento del grano deve essere effettuato a parte e di questi devono essere controllate le quantità, la forma, la dimensione e la distribuzione.

4.4.3.4 Solubilità dell'idrogeno nell'alluminio e degasaggio

L'alluminio ha una forte affinità con l'idrogeno, che entra in soluzione nel metallo allo stato liquido. La solubilità del gas disciolto si riduce drasticamente alla solidificazione e ciò comporta la nucleazione e l'accrescimento di bolle che rimangono intrappolate nel getto. Una eccessiva quantità di gas disciolto porta ad avere getti caratterizzati da una dispersione uniforme di piccole cavità tondeggianti che compaiono sottopelle. Generalmente si presentano in dispersione uniforme e forma sferica, per via della loro forma prendono il nome di "punte di spillo" e queste possono compromettere qualità e integrità del getto, riducendone le caratteristiche di resistenza, tenuta idraulica e affidabilità. La dimensione delle bolle si riduce all'aumentare della velocità di solidificazione, a favore di una più uniforme dispersione. Nella Figura 24.b si può vedere come ci siano altri materiali in grado di disciogliere più idrogeno rispetto a quanto non faccia l'alluminio, ma l'alluminio è quello che ne risente maggiormente al diminuire della temperatura, proprio a

causa dell'alta differenza di solubilità tra liquido e solido (Figura 24.a). Da questa figura si vede anche che con l'aggiunta di alcuni leganti la solubilità può diminuire, ma la forma della curva non cambia in ogni caso. Per ridurre le percentuali di idrogeno in soluzione nella lega metallica, deve essere effettuato il processo di degasaggio.

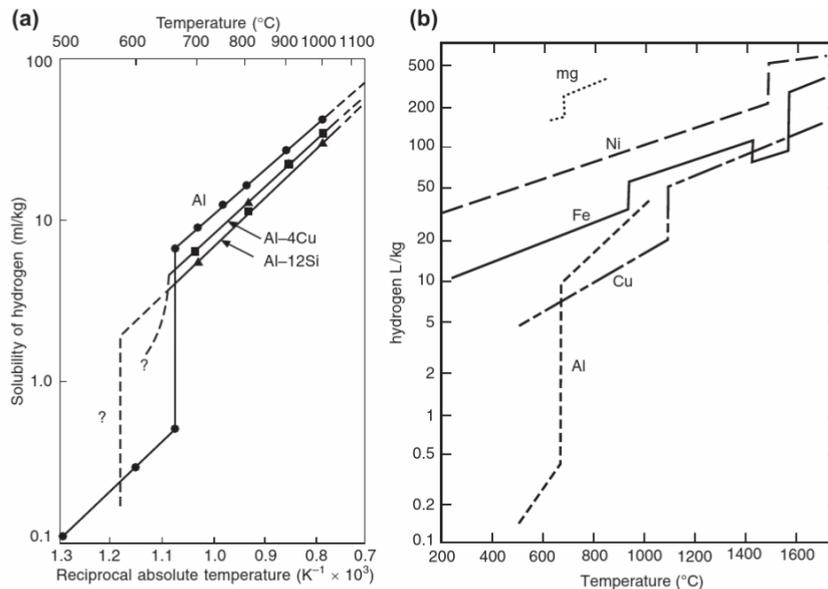


Figura 24 - solubilità dell'idrogeno nell'alluminio puro e in alcune sue leghe (a) e in diversi metalli (b) (immagine da (16))

Il degasaggio delle leghe leggere consiste nei trattamenti metallurgici in fase liquida che hanno lo scopo di ridurre la percentuale di idrogeno in soluzione nella lega metallica. Esistono diversi metodi:

- Degasaggio naturale
- Degasaggio mediante pre-solidificazione
- Degasaggio mediante flussi di gas attivi
- Degasaggio mediante flussi solidi granulari o sottoforma di compresse
- Degasaggio in corrente gassosa con apporto di flussi solidi granulari

I primi due trattamenti sono di difficile applicazione in ambito industriale in quanto richiedono tempi molto lunghi, infatti, queste procedure prevedono che la lega si stabilizzi naturalmente con l'ambiente esterno.

Il terzo metodo, invece, prevede l'utilizzo di gas attivi, i quali, reagendo con l'idrogeno, escono dal metallo fuso sottoforma di gas. Inizialmente veniva usato il cloro, ma per via dello sviluppo di fumi tossici durante il trattamento e per le difficoltà legate alla gestione dei fumi, tale pratica non è più adoperata. Il metodo è stato migliorato utilizzando cloruri di varia composizione, anche questi però con il problema dei fumi tossici.

La successiva adozione di reagenti attivi allo stato solido, quali l'esacloroetano (CCl_3-CCl_3), una serie di cloruri, fluoruri o borati e loro miscele, ha consentito una più semplice modalità operativa. Questi reagenti vengono utilizzati in forma di flussi salini granulari o compresse da introdurre in profondità nel bagno di fusione, i quali, decomponendosi alla temperatura del metallo fuso, sviluppano bolle di cloro che risalgono sulla superficie asportando progressivamente l'idrogeno disciolto. A questo scopo si utilizzano, in genere, lance dotate all'estremità di campanelle forate, nelle quali si pone il degasante solido racchiuso in sottili fogli di alluminio oppure in forma di compresse.

Per ridurre i tempi di degasaggio e per ottenere una buona qualità del trattamento metallurgico si opera normalmente utilizzando flussi di gas in combinazione a flussi salini granulari (6). Il gas utilizzato è un gas neutro, solitamente azoto. Il gas viene insufflato in pressione sul fondo del bagno di fusione e, durante la

risalita delle bolle di gas neutro dal fondo della siviera di trattamento alla superficie dell'alluminio fuso, avvengono i seguenti fenomeni:

- L'idrogeno diffonde nelle bolle di gas inerte e si separa dalla fase liquida
- Le inclusioni non metalliche presenti nel metallo liquido sono trascinate per azione meccanica.

La lancia per l'introduzione del gas in pressione è costituita da un albero cavo rotante dotato all'estremità di un rotore. La geometria del rotore deve essere studiata per favorire:

- La formazione di bolle di gas inerte di piccole dimensioni, la loro uniforme distribuzione e l'ottenimento di un lungo tempo di sosta nel metallo liquido;
- Un adeguato movimento del metallo liquido;
- Una superficie del bagno metallico tranquilla, per evitare ulteriore assorbimento di idrogeno dall'ambiente esterno.

Molto spesso vengono aggiunti manualmente flussi salini granulari in grado di reagire direttamente con gli elementi chimici indesiderati del bagno di fusione; si tratta di elementi scorificanti che permettono la risalita in superficie degli ossidi e di varie scorie. Eliminando la parte superficiale del metallo fuso, quindi, è possibile ottenere una purificazione completa del bagno.

4.5 Disegno e accorgimenti

Con il processo di colata per gravità in conchiglia, si possono ottenere i seguenti parametri:

- Spessore minimo di un getto ottenibile è intorno ai 4mm, in funzione della fluidità della lega,
- Finitura superficiale ottenibile è di circa $Ra = 1,8-5 \mu m$,
- Occorre prevedere angoli di sforno pari a 3° ,
- Dimensione del diametro minimo ottenibile per i fori è di 2mm.

4.5.1 Materozze

La loro giusta realizzazione è di fondamentale importanza per la buona riuscita del getto. Le materozze sono serbatoi di metallo che devono rimanere liquidi fino alla solidificazione ultimata del getto, in modo da alimentare le cavità di ritiro (Figura 25) che si formano inevitabilmente per via della differenza volumetrica tra lega liquida e solida (vedere capitolo 4.6 Ritiro). I ruoli delle materozze sono i seguenti:

- Evitare che si formi il cono di ritiro all'interno del getto, andando a compensare la contrazione di volume nel raffreddamento in fase liquida e nel passaggio liquido/solido;
- Rifornire il getto (o una sua parte) di metallo liquido per compensare al ritiro in fase liquida;
- Contenere completamente il difetto provocato dal ritiro.

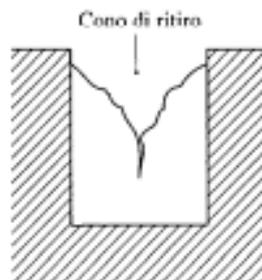


Figura 25 - cono di ritiro

Per progettare le materozze è necessario scegliere alcuni parametri, come:

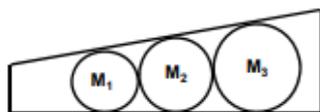
- Posizionamento: la zona adiacente la materozza deve essere l'ultima a solidificare e la materozza deve solidificare dopo di essa,
- Tipologia:
 - a cielo aperto (in tal caso affiorano sulla parte superiore della forma) oppure cieche (totalmente immerse nella forma);
 - di forma emisferica, cilindrica, ecc...
 - di metallo o di ceramica: le materozze di ceramica vengono utilizzate per permettere alla materozza di rimanere più calda e quindi solidificarsi per ultima e anche quando non è possibile realizzare delle materozze delle dimensioni volute ma devono essere contenute. Questo aspetto verrà richiamato anche nel capitolo relativo alle vernici, in quanto normalmente vengono usate vernici particolari in corrispondenza di queste zone e degli attacchi di colata (zone che devono rimanere più calde);
- Dimensionamento di ognuna e del collare (canale tra materozza e pezzo); per ridurre le dimensioni della materozza ci sono due possibilità: utilizzare materozze di ceramica (coibentanti) oppure dei raffreddamenti artificiali nel pezzo.

Come accennato, è fondamentale che la materozza sia l'ultima a solidificare, per verificare che accada, è possibile dividere il pezzo in parti elementari e calcolare il modulo termico di ogni singola parte. La velocità di solidificazione è collegata al modulo termico M , per il suo calcolo non si considerano come scambianti le superfici di sezione ideale tra le parti e la formula è:

$$M_x = \frac{\text{volume della parte } x}{\text{superficie scambiante della parte } x}$$

La solidificazione deve essere direzionale, per verificarlo ci sono dei metodi pratici (Figura 26), a cui è legata una regola empirica: $M_{i+1} = 1.1 - 1.2 M_i$:

- Cerchi di Heuvers



Divisione in parti

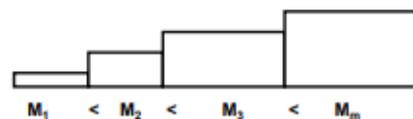


Figura 26 - divisione in parti per verificare solidificazione unidirezionale

Una volta constatata la solidificazione unidirezionale, per progettare la materozza in modo che solidifichi dopo il getto, c'è una regola pratica:

$$M_m = 1.2 M_g$$

M_m = modulo di raffreddamento della materozza

M_g = modulo di raffreddamento del getto (zona adiacente alla materozza)

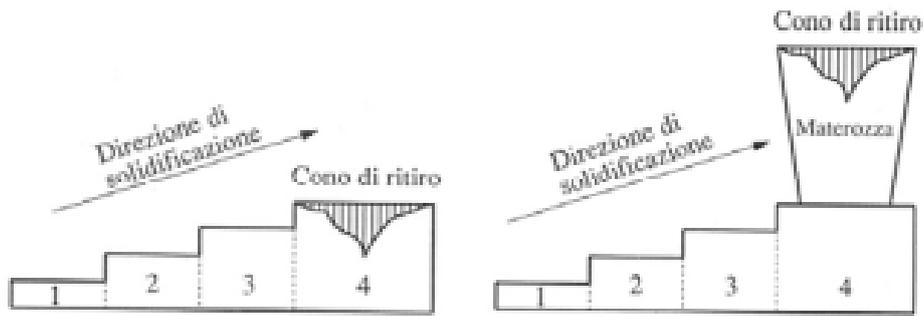


Figura 27 - cono di ritiro senza materozza (sinistra) e con la materozza (destra)

Per essere certi che il cono di ritiro sia integralmente contenuto nella materozza (Figura 27), solitamente viene fissato che l'altezza del cono di ritiro sia pari a non più dell'80% dell'altezza della materozza (Figura 28). Per assicurarsi di ciò, esistono varie formule in base al tipo di materozza scelto (sferica, cilindrica, ecc...); di seguito vengono date poche informazioni di base perché una descrizione dettagliata richiederebbe uno studio approfondito che esula dallo scopo di questo elaborato.

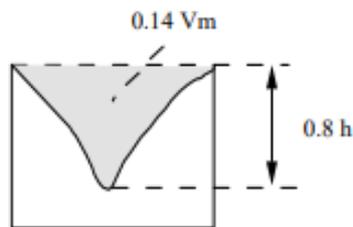


Figura 28 - altezza massima consentita del cono di ritiro rispetto alla materozza

Esiste inoltre un grafico, ottenuto sperimentalmente, che mostra quali sono i parametri accettabili per dimensionare una materozza: diagramma di Caine (Figura 29). Vengono definiti due parametri: il rapporto tra il modulo di raffreddamento della materozza e quello della parte del getto che solidifica per ultima come $X = \frac{M_m}{M_p}$ e il rapporto tra il volume della materozza e il volume della parte del getto alimentata dalla materozza come $Y = \frac{V_m}{V_g}$. La coppia di valori ammissibili per avere una materozza funzionante è la parte destra della curva ottenuta sperimentalmente. Inoltre, indicando con "a" la costante sperimentale relativa al materiale, con "b" la contrazione in fase L-S del metallo e con "c" la velocità di raffreddamento relativa della materozza, la formula di Caine per la verifica di ammissibilità di una materozza è: $Y \geq \frac{a}{X-c} + b$.

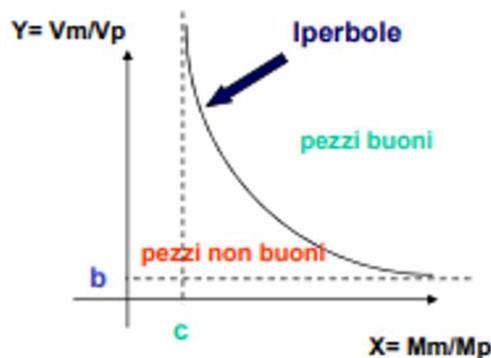


Figura 29 - diagramma di Caine

4.5.2 Dispositivo di colata

Il dispositivo di colata è costituito da tazza (dove viene versato il metallo fuso), pozzetto di colata e condotti attraverso cui il fuso giunge nella cavità della forma (Figura 30). Il dispositivo di colata ha lo scopo di:

- Fare in modo che la cavità della forma sia completamente riempita, conferendo al fluido la corretta velocità e direzione;
- Impedire che il metallo fuso eroda la forma, evitando urti violenti (a questo scopo vengono anche usate le vernici, di cui si parlerà nel capitolo 4.7)
- Bloccare le inclusioni non metalliche, grazie all'azione filtrante.

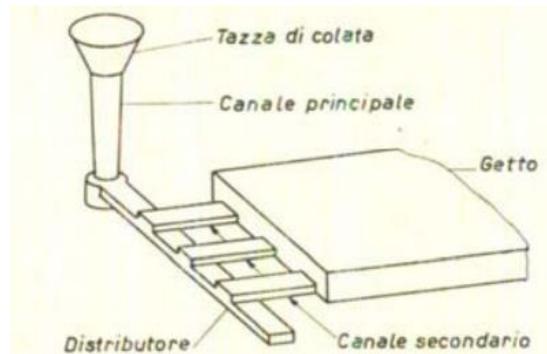


Figura 30 - dispositivo di colata

Le tipologie di sistemi di colata in gravità sono i seguenti:

- In sorgente (Figura 31.a)
Questa tipologia permette di avere un riempimento con poca turbolenza, insieme ad una buona evacuazione dell'aria. Di contro, però, necessita di un tragitto più lungo, di conseguenza arriva più freddo nelle materozze e presenta maggiori sfridi.
- Laterale (Figura 31.b)
Questo sistema è atto per pezzi alti. L'altezza di caduta è inferiore e migliora la solidificazione direzionale. Il canale di colata deve essere inclinato in modo da favorire il basculamento. Ne risulta, però, una dissimmetria nella distribuzione della temperatura.
- Dall'alto (Figura 31.c)
È il migliore dal punto di vista della solidificazione direzionale, permette di utilizzare materozze di ridotte dimensioni. Presenta, però, il pericolo di spruzzi che provocano il difetto delle gocce fredde.

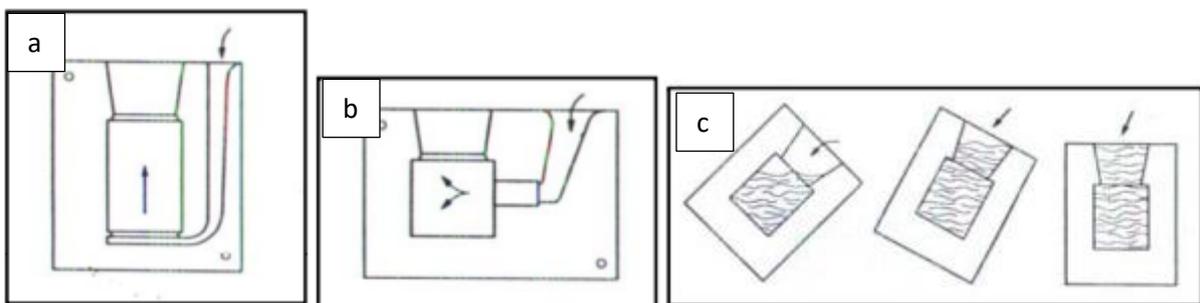


Figura 31 - sistema di colata in sorgente (a), sistema di colata laterale (b) e sistema di colata dall'alto (c)

4.5.3 Anime

Quando sono presenti cavità nel getto, queste vengono realizzate mediante l'apposizione di anime, costruite in materiale refrattario, solitamente in sabbia silicea o quarzifera con l'aggiunta di leganti, ovvero miscele chimiche che aderiscono ai grani per fornire resistenza meccanica all'anima. Il contenuto dei leganti può variare dall'1 al 5%, mentre il restante 95-99% è sabbia. Necessitano di alcune caratteristiche:

- resistenza meccanica (non deve deformarsi durante la colata),
- permeabilità (è necessario un agevole deflusso dei prodotti gassosi caldi che si formano durante la colata),
- cedevolezza (durante il ritiro occorre evitare tensioni residue nel getto),
- sgretolabilità (l'estrazione del materiale costituente l'anima deve essere rapida e agevole, questo processo si chiama "sterratura", di cui si parla nel capitolo 4.9).

È importante tenere conto delle portate d'anima, devono essere previste sul modello per creare nella forma idonee sedi di appoggio per le anime (e/o tasselli necessari per risolvere i problemi dei sottosquadri).

4.5.4 Spinte metallostatiche

Per tutto il tempo nel quale la lega si mantiene liquida, ogni punto della forma è soggetto, secondo il principio di Stevino, ad una pressione che dipende dalla densità della lega e dalla profondità del punto considerato rispetto al pelo libero del fluido. Tale pressione esercita su tutte le superfici della forma una spinta detta "metallostatica". La componente verticale della spinta è particolarmente importante perché tende a sollevare la parte superiore della forma lasciando fuoriuscire il metallo fuso dal piano di divisione creando bave e getti incompleti.

La spinta metallostatica può essere calcolata su ogni superficie di contatto tra getto e forma e, per effettuare un calcolo corretto, sarebbe necessario effettuare l'integrale della pressione metallostatica lungo la superficie dell'impronta. Nella pratica, invece, viene calcolata la componente diretta verso l'alto al fine di assicurare la perfetta chiusura della conchiglia (Figura 32). È calcolabile come la pressione perpendicolare alla superficie in ogni punto per la superficie stessa e risulta dipendente dalla distanza di quel punto dalla superficie libera del liquido e dal peso specifico del liquido:

$$F = S * p = S * h * \gamma$$

Dove p = pressione metallostatica

S = area della superficie considerata

h = profondità del baricentro del metallo fuso rispetto al pelo libero

γ = peso specifico della lega liquida

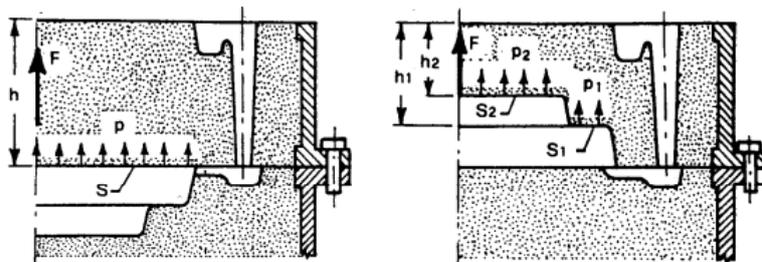


Figura 32 - spinta metallostatica sulla parte superiore della conchiglia

La presenza di anime costituisce un ulteriore contributo alla spinta di sollevamento della parte superiore della conchiglia (Figura 33); per il principio di Archimede sulle anime agir  una forza pari a:

$$F_a = V * \gamma - V_t * \gamma_a$$

Dove V = volume dell'anima circondata dal metallo liquido

γ = peso specifico del metallo liquido

V_t = volume totale dell'anima con le portate d'anima

γ_a = peso specifico dell'anima

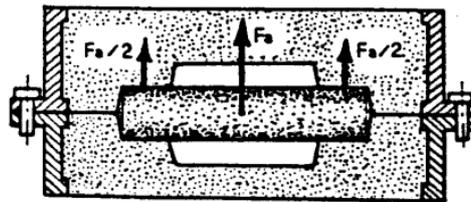


Figura 33 - spinta metallostatica sull'anima

4.5.5 Sottosquadri

Durante la progettazione della conchiglia,   molto importante la scelta del piano di divisione della forma, affinche il modello possa essere estratto dalla forma stessa senza danneggiarla. Le parti che durante l'estrazione rovinerebbero la forma si dicono in sottosquadro (o controsformo). Tra le soluzioni a questi problemi si trova:

- cambiare piano,
- cambiare progetto,
- l'utilizzo di tasselli,
- l'uso di un modello scomponibile.

4.5.6 Angoli di sformo e raccordi

L'operazione di estrazione del modello dalla forma   detta "sformatura". Per agevolare questa azione vengono evitate superfici piane perpendicolari al piano di divisione, andando ad inclinare tali superfici di un piccolo angolo, detto angolo di sformo (Figura 34.a). Inoltre, gli spigoli vivi devono essere eliminati tramite raggi di raccordo (Figura 34.b), perch  queste zone costituiscono zone di concentrazione delle tensioni, derivanti dalle sollecitazioni termiche e meccaniche a cui la conchiglia   sottoposta durante la colata, con possibili inneschi di frattura; inoltre, cos , si riduce anche l'erosione della conchiglia durante la colata.

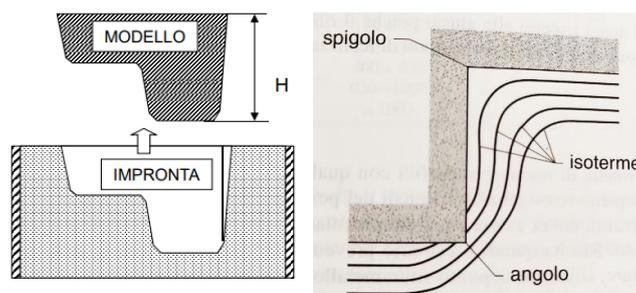


Figura 34 - (a): angoli di sformo per una buona estrazione del getto (sinistra) - (b): isoterme in prossimit  degli spigoli (fonte: (6))

4.6 Ritiro

Le leghe subiscono una contrazione volumetrica nell'intervallo compreso tra la temperatura di colata e quella ambiente. Il getto avrà dimensioni inferiori a quelle della forma, perciò la forma deve essere opportunamente maggiorata dimensionalmente per poter ottenere le dimensioni finali desiderate. Solitamente viene utilizzato un coefficiente di ritiro lineare medio per maggiorare tutta la forma. È molto importante capire come si comporti il ritiro durante la solidificazione, infatti, ritiri e tensioni residue possono causare rotture a caldo. Inoltre, nel caso di un raffreddamento disomogeneo (per esempio se le dimensioni e gli spessori del pezzo variano molto da una zona all'altra), c'è il rischio di avere nel getto delle distorsioni. Il problema principale, però, è la formazione delle cavità da ritiro, che è una diretta conseguenza del ritiro di volume in un certo intervallo di temperatura di solidificazione (13):

$$\varepsilon_{vol} = \frac{V_L - V_T}{V_L} 100\%$$

Dove V_L = *volume specifico della lega liquida alla temperatura di liquidus*

V_T = *volume specifico della lega solidificata alla temperatura di solidus*

È chiara, quindi, l'importanza di utilizzare delle leghe che si trovino in prossimità del punto eutettico, in modo da avere un intervallo di solidificazione minore e ridurre già in partenza il ritiro. La qualità del getto deve essere definita non dal valore di ε_{vol} ma dalla morfologia delle cavità da ritiro, a prescindere dal fatto che compaiano sotto forma di una sola grande cavità o di una porosità diffusa (come nella Figura 35).

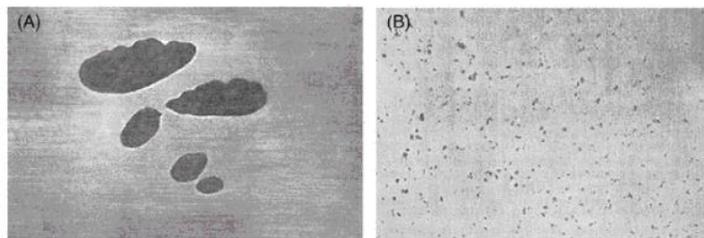


Figura 35 - getto contenente poche grandi cavità da ritiro (A) e getto con porosità diffusa (B) (immagine da (13))

4.7 Uso di rivestimenti superficiali dello stampo (vernici)

Le superfici interne della conchiglia vengono verniciate con vernici a base acquosa con polveri refrattarie e lubrificanti (come grafite, allumina, talco, mica, ecc...). Gli scopi di questa procedura sono molteplici:

- Controllare il trasferimento del calore (infatti, vengono usate vernici diverse in base al tipo di zona);
- Controllare lo scorrimento della lega (a questo scopo viene talvolta fatto uso del talco, in aggiunta alla vernice);
- Consentire un semplice distacco del pezzo una volta solidificato: il getto non deve aderire alla conchiglia;
- Consentire un miglioramento della finitura superficiale (è necessario porre attenzione a come viene data la vernice per non rischiare di avere l'effetto opposto);
- Aumentare la durata della conchiglia: l'alluminio fuso interagisce con l'acciaio di cui è costituita la conchiglia, producendo usura da erosione e metallizzazione delle superfici con cui entra in contatto.

Nel caso di verniciatura inefficace si corre il rischio di produrre uno scarto di produzione elevato, rendendo necessari interventi manutentivi durante la produzione che aumentano tempi e costi. Tuttavia, l'esecuzione di una verniciatura ottimale è ancora molto legata alla capacità pratica dell'operatore. (17)

I fattori chiave alla base di una buona verniciatura risiedono:

- nella rugosità di base della conchiglia: una elevata rugosità produce un ridotto scambio di calore tra alluminio e acciaio, ma una maggiore fluidità e scorrevolezza della lega fusa;
- nella temperatura alla quale si trova la conchiglia in fase di verniciatura: la conchiglia deve essere riscaldata in modo da permettere l'aggrappaggio ottimale della vernice;
- nella tipologia di prodotto impiegato (e sua diluizione): solitamente vengono usate due tipologie di vernici, la prima è quella che viene data sulla conchiglia dopo sabbiatura ed è definita "aggrappante", la seconda, invece, è lo strato più esterno, che viene utilizzata sopra l'aggrappante. Entrambi i prodotti sono fondamentali per la buona riuscita della produzione.

La procedura è la seguente: (17)

- 1- sabbiatura della conchiglia (in modo da eliminare i residui delle vernice vecchia e rendere omogenea la cavità),
- 2- riscaldamento della conchiglia (solitamente intorno ai 200°C),
- 3- diluizione della vernice con acqua distillata,
- 4- spruzzatura della vernice aggrappante,
- 5- spruzzatura della vernice refrattaria (diversa per le zone, infatti attacco di colata e materozze devono rimanere più calde e quindi vengono usate delle vernici apposite che coibentano maggiormente queste parti),
- 6- pulizia delle zone di accoppiamento della conchiglia.

4.8 Difettosità nei getti

I difetti si possono classificare per causa, posizione o gravità. Le cause possono essere molteplici, divisibili in difetti da fonderia o per altre cause; la posizione dei difetti è da intendere come superficiale, sub-superficiale o interna; la gravità è indice fondamentale che permette di capire se il componente si possa utilizzare o se sia da scartare, nel caso in cui la presenza di difetti comprometta la funzionalità del prodotto. La normativa internazionale classifica decine di difetti comuni che si verificano all'interno dei getti. Di seguito vengono portati alcuni dei principali difetti che possono presentarsi.

- **Fuoriuscita di metallo:** una delle cause è l'insufficiente tenuta della forma o delle anime, che, cedendo, causano l'aumento dello spessore del getto e creano delle bave (strati più o meno sottili di metallo dovuti alla penetrazione del metallo fuso all'interno di fessure delle anime o all'imperfetta chiusura della conchiglia). Questo fenomeno rischia di compromettere le dimensioni del getto.
- **Fusione incompleta:** avviene quando il metallo solidifica prima di aver completamente riempito la forma. È facilmente visibile ad occhio nudo in quanto manca una parte del getto o ci sono riprese (verticali o orizzontali o sull'interno metallico).
- **Deformazione da ritiro:** di solito si presentano come deformazioni rispetto al disegno, modello o forma. Sono localizzate principalmente nelle zone aventi spessori diversi.
- **Deformazione differita:** deformazione del pezzo rispetto alla sua forma iniziale. Si riscontra dopo l'immagazzinamento o dopo trattamento termico e/o dopo lavorazione meccanica (per rilassamento parziale o totale delle tensioni residue).
- **Cavità da gas (porosità e soffiature):** si presentano come cavità tondeggianti, a pareti lisce, di varie dimensioni, generalmente visibili a occhio nudo. Sono generate dai gas della colata, che non trovano sfogo verso l'esterno. I gas possono provenire dal metallo per la diminuita solubilità nel passaggio da liquido a solido, da reazioni metallo-anima o dall'aria trascinata dalla turbolenza del metallo che riempie la forma. Si parla di origine endogena alla lega quando le porosità sono piccole e

uniformemente distribuite (chiamate punte da spillo); si parla, invece, di origine esogena quando ci si riferisce alle porosità che si presentano più isolate.

- **Ritiro (risucchio):** è provocato dalla non sufficiente compensazione del ritiro volumetrico del metallo prodotta durante il raffreddamento allo stato liquido e durante la contrazione di solidificazione. I risucchi possono essere macroscopici o microscopici; nel primo caso si parla di “ricalo” e può essere interno o esterno. Nel secondo caso, invece, i ritiri si localizzano tra le dendriti.
- **Screpolature (cricche):** sono fessure che si vengono a formare tra i grani cristallini e, perciò, hanno un percorso irregolare che può essere più o meno profondo; inoltre, possono originarsi a caldo o a freddo. Compaiono solitamente nelle zone che si solidificano per ultime e dove si concentrano le tensioni nel corso della solidificazione (variazioni di sezione, spigoli, ecc...)
- **Segregazioni:** sono disomogeneità o concentrazioni casuali di alcuni dei costituenti strutturali della lega in certe zone del getto.
- **Inclusioni di scorie, schiume, pelli e ossidi:** sono inclusioni metalliche di forma non regolare e solitamente sono dei difetti superficiali. Durante la colata possono essere inglobati prodotti di ossidazione delle leghe, materiali metallici e non, estranei alle leghe stesse. Pericolosi soprattutto per le lavorazioni meccaniche
- **Goccia fredda:** è una inclusione metallica, solitamente sferoidale e con superficie ossidata, che si situa nella parte inferiore del getto. Si presentano quando delle gocce di metallo fuso cadono prematuramente all'interno della forma prima dell'inizio della colata.
- **Metallizzazioni:** sono penetrazioni del metallo tra le microaperture superficiali dello stampo, con conseguente deterioramento delle caratteristiche superficiali del getto e dello stampo.
- **Strappature:** sono incisioni superficiali rettilinee lungo l'asse di estrazione, generate da un forte contatto tra lo stampo e il getto.
- **Erosioni:** sono asportazioni locali dell'anima per insufficiente coesione, generate dal metallo caldo o dai gas caldi. Danno luogo a rugosità e protuberanze metalliche. La sabbia erosa può essere trascinata in altre parti del getto e generare inclusioni esogene.
- **Cedimenti delle anime:** può capitare che le anime non vengano posizionate nel modo corretto o che si spostino dalla loro posizione oppure che non abbiano uno spessore adeguato e ci sia una rottura al momento della colata. In questi casi possono esserci mancanze o riduzioni di spessori nei primi due casi oppure penetrazione del metallo fuso all'interno dell'anima nel caso di rottura di quest'ultima.

4.9 Descrizione dei trattamenti finali (finitura)

Lo scopo dei trattamenti di finitura è quello di conferire al particolare meccanico le caratteristiche (estetiche, dimensionali, funzionali e meccaniche) che sono richieste dal progetto. Si possono distinguere trattamenti di finitura preliminari e trattamenti di finitura definitivi. I primi sono preparatori, ovvero hanno uno scopo funzionale e rendono il getto atto a ricevere i successivi trattamenti definitivi. I secondi donano le caratteristiche finali richieste. (6)

Tra le operazioni di finitura preliminari, che molto spesso vengono svolte all'interno della fonderia, ci sono:

- **Sterratura** (in presenza di anime): operazione che consente di eliminare le anime dai getti. Questo processo può essere effettuato tramite vagli vibranti oppure con trattamento termico. Nel primo caso, l'eliminazione della sabbia formante le anime viene eliminata tramite vibrazioni, senza danneggiare i getti. Il trattamento termico, invece, permette di deteriorare i leganti (le anime sono costituite di sabbia e leganti, come spiegato nel capitolo 4.5.3);
- **Eliminazione del sistema di riempimento e alimentazione:** consiste nel distacco del canale di colata e delle materozze. Può avvenire per tranciatura oppure per taglio meccanico, in questo caso possono

essere utilizzati diversi attrezzi, come: sega a nastro, fresa a disco, robot antropomorfo oppure macchine utensili;

- **Sbavatura:** operazione che consente di eliminare le bave create a fronte di filtrazioni sul piano di divisione oppure in corrispondenza di portate d'anima o inserimento tasselli. Tale operazione può essere realizzata manualmente, in automatico su macchine utensili o isole robotizzate oppure mediante burattatura.

I trattamenti di finitura definitivi, invece, spesso sono eseguiti da aziende esterne e sono i seguenti:

- **Trattamento termico** (se richiesto),
- **Lavorazione alle macchine utensili.**

Esistono anche altre operazioni che sono meno usuali che determinano una variazione delle caratteristiche del getto e possono essere inseriti, secondo le esigenze, prima o dopo le lavorazioni per asportazione di truciolo. Tra questi trattamenti si possono trovare:

- **Pallinatura tradizionale o controllata:** la pallinatura è un processo di lavorazione a freddo che consiste nel martellamento della superficie del particolare meccanico sottoposto al trattamento per opera di microsfero o micrograniglie, che vengono proiettate a elevata velocità sui componenti. La pallinatura tradizionale (o granigliatura o sabbiatura) è usata per scopi estetici e non sono richiesti particolari controlli dei parametri di processo. La pallinatura controllata, invece, viene effettuata per incrementare la resistenza a fatica dei componenti e richiede un elevato controllo dei parametri di processo, per consentire costanza e ripetibilità.
- **Impregnazione:** lo scopo dell'impregnazione è quello di incrementare la tenuta a pressione dei getti. Il trattamento consente di sigillare le microporosità mediante infiltrazione per capillarità di composti dotati di bassa viscosità, bassa tensione superficiale e ritiro contenuto alla reazione di consolidamento.
- **Pressatura isostatica a caldo:** consiste nel sottoporre il getto all'effetto combinato di elevata temperatura e pressione isostatica esercitata tramite un gas inerte (in tal caso si parla di HIP, Hot Isostatic Pressure) oppure tramite un liquido (si parla, quindi, di LHIP, Liquid Hot Isostatic Pressure). Lo scopo di questo trattamento è quello di eliminare alcuni difetti nei getti, in quanto si attivano meccanismi di deformazione plastica, scorrimento e diffusione
- **Trattamenti di conversione superficiale:** l'alluminio ha una buona affinità con l'ossigeno e ha la tendenza a coprire la superficie di un sottile strato di ossido (circa 0,2 µm) che protegge il materiale sottostante da una ulteriore ossidazione, con i trattamenti di ossidazione è possibile aumentare la resistenza a corrosione dei componenti. L'ossidazione può essere chimica o anodica. Nel primo caso, i getti vengono immersi in bagni ossidanti di opportuna composizione. Nel caso di ossidazione anodica, invece, si impiegano metodi elettrolitici e richiedono l'impiego di correnti elettriche.

4.9.1 Premessa ai trattamenti termici, la diffusione allo stato solido

Lo scopo principale di alcuni trattamenti termici è quello di favorire la diffusione di specie chimiche all'interno della matrice metallica. I meccanismi coinvolti sono: il meccanismo di diffusione per vacanza o per sostituzione e il meccanismo di diffusione interstiziale. La diffusione allo stato solido è governata dalle leggi di Fick. La prima legge parte dal presupposto che la diffusione avvenga in condizioni di stato stazionario:

$$J = -D * \frac{\partial c}{\partial x}$$

Dove:

- J = flusso di atomi attraverso una sezione piana di area unitaria in un determinato istante. Il segno è negativo perché il flusso ha verso opposto rispetto al gradiente
- D = coefficiente di diffusione. Dipende dalle specie chimiche interessate alla diffusione e dalla temperatura. La dipendenza dalla temperatura è data dalla seguente relazione: $D = D_0 e^{(-\frac{Q}{RT})}$.
 D_0 indica la costante di diffusività, Q rappresenta l'energia di attivazione per le specie che si devono diffondere (gli atomi possono muoversi all'interno dei reticoli cristallini quando le loro vibrazioni termiche superano l'energia di attivazione), R è la costante dei gas e T indica la temperatura assoluta
- $\frac{\partial c}{\partial x}$ = gradiente di concentrazione riferito ad un determinato istante

Solitamente i fenomeni che si vogliono osservare, però, non sono stazionari e per questi è necessario far riferimento alla seconda legge di Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Su questa relazione si basano tutti i calcoli e le modellizzazioni riguardanti i trattamenti termici dei metalli e delle loro leghe.

4.9.2 Trattamenti termici

I getti in lega di alluminio possono essere sottoposti a diversi tipi di trattamenti termici, nella Tabella 3 vengono presentati i trattamenti termici secondo la norma EN 1706. I trattamenti T4 e T6 sono i più usati e vengono chiamati "trattamenti termici per indurimento". (18)

Tabella 3 - trattamenti termici per leghe di alluminio da getto - EN 1706

F	Grezzo di fabbricazione
O	Ricottura
T1	Raffreddamento controllato e invecchiamento naturale
T4	Solubilizzazione, tempra e invecchiamento naturale
T5	Raffreddamento controllato e invecchiamento artificiale
T6	Solubilizzazione, tempra e invecchiamento artificiale
T7	Solubilizzazione, tempra e stabilizzazione

4.9.2.1 Ricottura

Esistono diversi tipi di ricottura (di omogeneizzazione, di ricristallizzazione di distensione, ecc...), ma solo uno viene utilizzato per le leghe di alluminio da getto, ovvero la ricottura di distensione. Questo trattamento è utile per ridurre le tensioni residue generatesi durante la solidificazione. Solitamente i getti in lega di alluminio vengono mantenuti a 400°C per qualche ora e poi raffreddati. Il raffreddamento deve essere molto lento per evitare il rischio di generare nuove tensioni; è possibile raffreddare i pezzi in aria, anche se è consigliabile effettuare un raffreddamento controllato fino a 200-250°C e poi raffreddamento in aria. (6)

4.9.2.2 Trattamenti termici di indurimento

I trattamenti termici di indurimento sono solitamente effettuati per componenti strutturali e di sicurezza. Lo scopo è quello di effettuare un rafforzamento per precipitazione: portando ad alte temperature i pezzi si ottiene una distribuzione fine e dispersa di precipitati in una matrice metallica e raffreddando velocemente si bloccano i precipitati, i quali, a temperatura ambiente, permetteranno di ostacolare il movimento delle

dislocazioni generando il rafforzamento. Il trattamento consiste in tre passaggi (di cui viene mostrato un esempio in Figura 36):

- 1- **Solubilizzazione:** trattamento termico per riportare in soluzione gli elementi leganti. Il suo obiettivo è quello di ottenere una soluzione solida sovrassatura a temperatura ambiente, cercando di raggiungere il massimo contenuto di atomi di leganti in soluzione allo stato solido, che saranno bloccati grazie ad un raffreddamento rapido.
- 2- **Tempra di soluzione:** raffreddamento rapido che permette di ottenere le soluzioni solide sovrassature a temperatura ambiente
- 3- **Invecchiamento:** è fondamentale per ottenere rafforzamento per precipitazione e permette di ottenere la formazione di precipitati finemente dispersi.

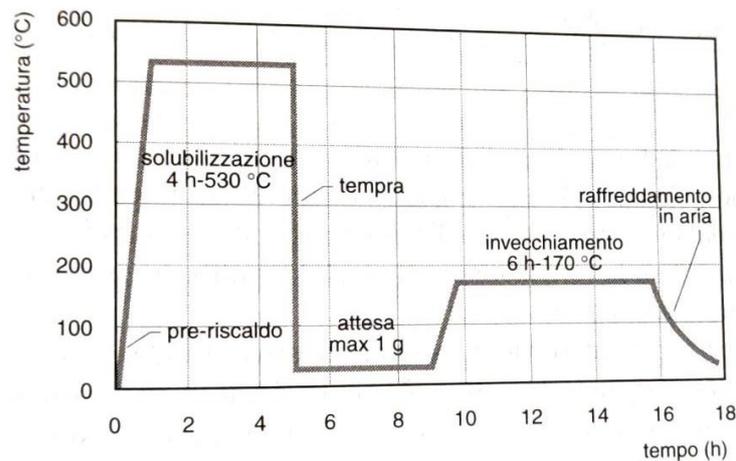


Figura 36 - esempio di diagramma di trattamento termico (T6)

La solubilizzazione consiste nel portare la lega ad alte temperature per un tempo sufficiente a raggiungere una soluzione solida con una distribuzione omogenea dei leganti. La temperatura a cui riscaldare i pezzi deve essere scelta in base alla lega, osservando il diagramma di stato e il tempo di mantenimento nel forno deve essere necessario ad ottenere una soluzione solida uniforme. La durata può variare dai pochi minuti alle 20h, in base alla dimensione dei pezzi, alle caratteristiche della lega e alla temperatura alla quale si è deciso di effettuare il trattamento. Infatti, il meccanismo alla base della solubilizzazione è di tipo diffusivo e a temperature elevate corrispondono tempi di trattamento più brevi, in quanto la diffusione dipende esponenzialmente dalla temperatura.

La tempra segue la fase di solubilizzazione e ha lo scopo di portare la soluzione solida sovrassatura a temperatura ambiente. È necessario ridurre al minimo il tempo che intercorre tra l'uscita dal forno e la tempra in modo da raffreddare velocemente i pezzi solubilizzati. È importante sottolineare che per ogni lega esistono velocità critiche di tempra, al di sotto delle quali non si riesce a bloccare la microstruttura desiderata. Per verificare la velocità adeguata bisogna fare riferimento alle curve temperatura-tempo-trasformazione (TTT), che cambiano per ogni lega e con il grado di sovrassaturazione della lega stessa (dipendente dal contenuto in peso di soluto). Il mezzo temprante e la sua temperatura devono essere scelti accuratamente perché da questi dipendono la drasticità della tempra e l'efficacia del trattamento. Queste indicazioni vengono date dalle normative, dove solitamente si richiede l'utilizzo di acqua a basse temperature (sotto i 30°C), anche se per alcune leghe può essere concesso di utilizzare temperature più alte nel caso di componenti con forme complesse. La temperatura del mezzo temprante deve essere costante: le vasche per la tempra devono essere dimensionate accuratamente, prevedendo anche un adeguato ricircolo del liquido per fare in modo che lo scambio termico avvenga in modo efficace.

Dopo la tempra di soluzione la lega si trova ad un alto livello energetico e, quindi, è relativamente instabile. La lega tende a raggiungere uno stato energetico più basso attraverso la trasformazione spontanea della soluzione solida sovrassatura in fasi metastabili o nella fase di equilibrio. La fase di invecchiamento ha, quindi, lo scopo di permettere la precipitazione controllata degli elementi di lega. Può essere naturale (i pezzi vengono lasciati a temperatura ambiente per giorni) o artificiale (i pezzi vengono inseriti in forno a temperature superiori ai 110°C per alcune ore).

La decomposizione della soluzione solida sovrassatura è un processo complesso che dispone di una ridotta quantità di energia di attivazione e si articola in due fasi principali: pre-precipitazione e precipitazione. I meccanismi di questo fenomeno sono articolati e non verranno esaminati nel dettaglio.

4.10 Controlli

Per assicurare una certa qualità dei getti è necessario effettuare dei controlli sulla produzione. Le prove possono essere distruttive o non distruttive, queste ultime, se richiesto dal cliente, possono essere effettuate su tutta la produzione. Tra i controlli principali si possono trovare:

- **Ispezione liquidi penetranti:** metodo di analisi non distruttivo che permette di localizzare i difetti superficiali. La procedura prevede la pulizia dei componenti, l'applicazione di un liquido penetrante e un secondo lavaggio del pezzo, viene poi applicato un liquido rilevante che mette in evidenza le possibili cricche e difetti superficiali.
- **Esami radiografici:** vengono utilizzati raggi X o γ e l'intensità della radiazione deve essere abbastanza forte da attraversare il componente e visualizzare un'immagine su un rivelatore. Possono essere svolte radioscopie (esami radioscopici in tempo reale) oppure radiografie (che permettono di visualizzare immagini statiche del componente).
- **Ispezione mediante ultrasuoni:** il componente viene attraversato con onde sonore a elevata frequenza (0.1-25MHz) e permette di rilevare eventuali riflessioni o attenuazioni per opera di cavità, inclusioni o discontinuità in generale. (6)
- **Analisi microstrutturali:** sono prove e analisi distruttive. Il componente deve essere sezionato e levigato mediante abrasivi a granulometria progressivamente decrescente, fino ad utilizzare un panno in velluto o tela caricato con polvere di granulometria decrescente da 3 μm a 0.25 μm . Per mettere in evidenza i bordi dei grani, è possibile ossidare selettivamente la superficie del campione mediante un cosiddetto attacco acido.
- **Controllo di tenuta in pressione:** la tenuta a pressione di un getto dipende da diversi fattori, come difetti interni, cavità da ritiro, cricche... Teoricamente le condizioni di prova dovrebbero replicare quelle di esercizio del componente (temperatura, carichi applicati, ecc...), in generale le prove vengono caratterizzate da due parametri principali: il fluido di prova e la pressione di prova. È possibile dividere le prove in due categorie: quelli che fanno uso di un gas come fluido di prova (misurandone le variazioni di pressione o visualizzandone la fuoriuscita) e quelli che vengono immersi in un liquido e usano il gas come elemento tracciante.
- **Collaudi dimensioni prima e dopo le lavorazioni meccaniche:** i controlli dimensionali possono avvenire in linea o in laboratorio. I controlli in linea permettono di analizzare l'intero ciclo di produzione e non solo il singolo elemento prodotto. Invece, i controlli in laboratorio sono più specifici e complessi; per esempio, è possibile utilizzare macchine di misura a coordinate (CMM) ed effettuare scansioni punto a punto o in continuo.
- **Verifica delle proprietà meccaniche:** prove di durezza, prove di resistenza a trazione, prove di fatica, ecc...

5 Metodi di calcolo numerico per l'analisi di un getto in produzione

È qui esaminato un componente già in produzione nell'azienda STCast, un supporto motore. La scelta di questo particolare è dovuta alla sua forma complessa, che presenta parti massicce e altre sottili. La conchiglia, inoltre, è a quattro figure, perciò, ad ogni colata, vengono prodotti quattro pezzi. L'alta produzione di questo componente è ulteriore motivo per cui è importante comprendere se sia possibile ottimizzarne il processo. In Figura 37 viene mostrato il getto completo di canali di colata primari e secondari e le materozze; in Figura 38 viene mostrato il componente con le materozze e senza materozze.

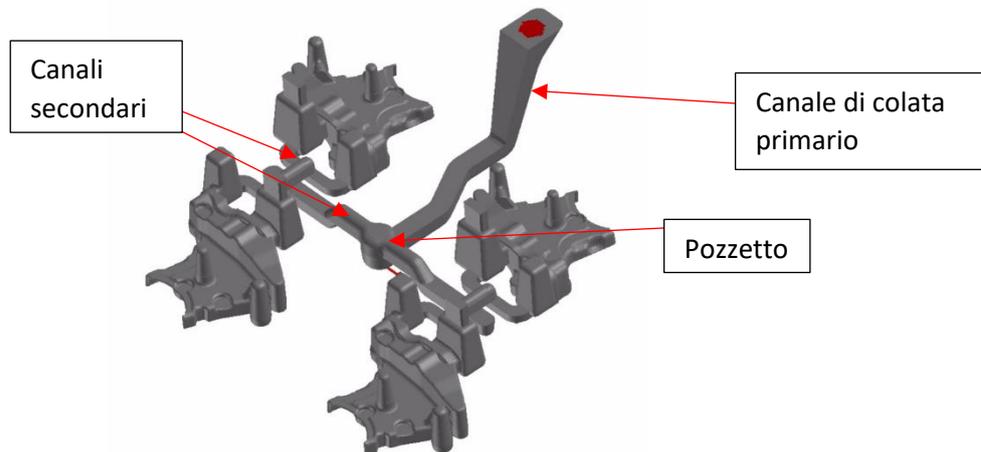


Figura 37 – getto completo del supporto motore (4 figure)

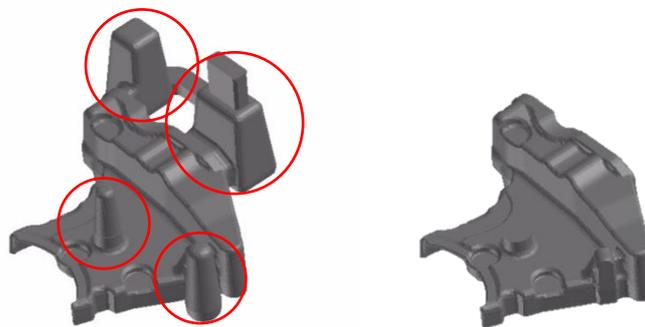


Figura 38 - supporto motore con materozze (sinistra) e senza materozze (destra)

L'utilizzo di un componente già in produzione ha permesso di effettuare un confronto tra ciò che avviene nella realtà e cosa si ottiene dalle simulazioni, in questo modo è stato possibile, quindi, validare la simulazione effettuata con il software ProCAST. Per farlo sono state effettuate delle analisi:

- Analisi termica effettuata in azienda tramite una termocamera, andando ad osservare l'andamento della temperatura della conchiglia durante il transitorio termico;
- Analisi micrografica in laboratorio, con microscopio ottico, in cui si è andato ad analizzare la microstruttura del supporto motore in alcuni punti specifici;
- Esame macroscopico andando ad effettuare sui campioni un attacco chimico per mettere in risalto la dimensione dei grani.

5.1 Premessa sui software di simulazione

La modellazione dei software di simulazione è molto complessa e richiederebbe un grande approfondimento, qui si vogliono presentare solamente alcune delle informazioni base per poter comprendere al meglio i risultati ottenuti nei capitoli successivi.

In collaborazione con l'azienda F.O.M.T., è stata eseguita la simulazione utilizzando ProCAST, un software che si basa sugli elementi finiti. Con questo programma è possibile ottenere diversi risultati, da quelli termici e fluidodinamici a quelli relativi alla microstruttura. Discretizzazioni agli elementi finiti permettono una descrizione precisa di geometrie complesse con un ridotto numero di elementi; tuttavia, per ottenere risultati relativamente alla microstruttura una mesh grossolana non è adeguata. La soluzione più semplice al fine di raggiungere una risoluzione soddisfacente sarebbe quella di usare una mesh fine per tutto il getto fin dall'inizio, ma lo svantaggio di questa tecnica è il conseguente aumento di tempo di calcolo per lo studio macroscopico. Le soluzioni più avanzate consistono nell'utilizzo in contemporanea di una mesh grossolana per fenomeni macroscopici e una più fine per calcoli microscopici.

È importante anche far presente che i primi modelli sviluppati (intorno agli anni '80) erano modelli deterministici, vale a dire che i risultati di un calcolo erano completamente determinati dalle condizioni iniziali e al contorno. I risultati finali ottenuti con un modello simile sono ripetibili e sempre uguali, ma si ottengono risultati quantitativi medi. L'opposto dei modelli deterministici sono i modelli stocastici, nei quali, invece, i fenomeni fisici sono descritti utilizzando dei numeri casuali: il risultato della simulazione può variare ad ogni esecuzione. Questi modelli sono più adatti per la previsione della nucleazione di nuove caratteristiche microstrutturali, ma consentono anche di combinare contemporaneamente anche aspetti deterministici. Principio generale dei metodi moderni è di combinare aspetti deterministici del comportamento fisico della solidificazione (velocità di nucleazione, cinetica di crescita e diffusione del calore) con la natura randomica di certi fenomeni (posizioni dei grani nello spazio e le orientazioni cristallografiche).

5.2 Cenni sul funzionamento del software ProCAST

I passaggi principali per effettuare una simulazione con il software ProCAST sono i seguenti:

- Creazione della mesh del getto e della conchiglia che si vogliono analizzare,
- Imposizione delle condizioni al contorno e tutti i parametri di processo (scelta della lega e temperatura iniziale di colata, tempo impiegato per colare e tempi di ogni operazione del ciclo produttivo, termodinamica del sistema e coefficienti di scambio termico HTC - heat transfer coefficients - tra i vari componenti, ecc.),
- Soluzione del problema, per la quale servono le informazioni precedenti (geometria e condizioni al contorno) unitamente alle equazioni necessarie per poter risolvere il problema,
- Visualizzazione dei risultati (temperatura, frazione solida, tempo di solidificazione, porosità da ritiro...).

Una schematizzazione delle informazioni necessarie per impostare la simulazione viene mostrata nel flow chart in Figura 39.

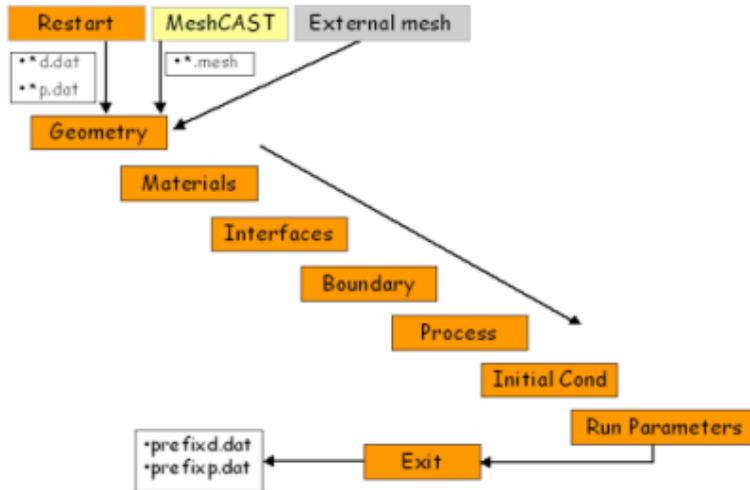


Figura 39 - flow chart indicante i diversi passaggi per poter realizzare la simulazione

Per quanto riguarda lo svolgimento della simulazione, di solito viene inizialmente effettuato un certo numero di cicli in cui viene simulata solo la fluidodinamica del metallo fuso e gli scambi termici tra colata e conchiglia. L'analisi completa si sviluppa successivamente al raggiungimento del regime termico dello stampo, infatti, i risultati di riempimento, solidificazione e termica dello stampo, sono più attendibili rispetto a quelli che si sarebbero ottenuti nelle fasi precedenti, a scapito di un tempo di elaborazione più lungo. (6) È importante notare che il regime termico dello stampo non dipende solo dalla lega colata, che rappresenta la vera sorgente di calore, ma da tutte le operazioni che intervengono durante il ciclo. Quindi, è importante simulare ogni singola fase che interviene nel ciclo produttivo: versamento del metallo fuso, solidificazione del getto, raffreddamento del getto, apertura dello stampo, estrazione del getto, pulizia della conchiglia e chiusura della stessa. Per impostare i coefficienti di scambio termico (HTC) tra i diversi domini, viene utilizzata un'entrata specifica, "die combo", per definire il tipo di scambio termico nel caso di colata in conchiglia, in quanto permette di definire automaticamente la sequenza di stampo chiuso e aperto andando a modificare i coefficienti di scambio termico. Quando lo stampo è aperto, per esempio, l'interfaccia delle mezze conchiglie è con l'aria e durante la fase di soffiatura il coefficiente di scambio termico cambia.

5.2.1 Equazioni alla base del software

I risultati che si andranno ad analizzare nei capitoli successivi riguardano la temperatura dello stampo e le caratteristiche finali del getto, quali: temperatura, frazione solida, porosità e SDAS. Ogni risultato è strettamente dipendente da come viene simulata la solidificazione e il raffreddamento del getto. A questo proposito, vengono richiamate di seguito le equazioni di bilancio necessarie per la risoluzione del problema fluido-termodinamico.

1- *Equazione di conservazione della massa*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u}) = 0 \quad (5.1)$$

Dove ρ è la densità del metallo e \bar{u} la sua velocità.

2- *Equazione di conservazione dell'energia*

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} h) - \nabla(\lambda \nabla T) = 0 \quad (5.2)$$

dove h è l'entalpia del metallo e λ è la conduttività termica.

Questa equazione di conservazione dell'energia corrisponde all'equazione di Fourier per la conduzione scritta in termini di entalpia:

$$\lambda \nabla^2 T + q_g = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (5.3)$$

Dove q_g è il calore generato all'interno del sistema e c è il calore specifico. Nel modello di ProCAST, l'entalpia ha una formulazione del tipo $h(T) = \int_0^T c_p dT + L_F [1 - f_s(T)]$. In cui c_p è il calore specifico a pressione costante, L_F è il calore latente di fusione del metallo e $f_s(T)$ è la frazione di soluto, che è funzione della temperatura. Grazie a questa formulazione è possibile valutare la variazione di tale grandezza in relazione al cambiamento di fase.

3- Equazione di conservazione della quantità di moto

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} + \nabla p - \mu \left[\nabla^2 \bar{u} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \bar{u}) \right] + \rho \bar{g} + \frac{\mu}{K} \bar{u} = 0 \quad (5.4)$$

Dove μ è la viscosità del metallo. Questa equazione, se si omette il termine finale $\left(\frac{\mu}{K} \bar{u}\right)$, rappresenta l'equazione di Navier-Stokes per fluidi incomprimibili sotto la sola forza del campo gravitazionale. Il termine $\left(\frac{\mu}{K} \bar{u}\right)$ permette di modellare il moto di un fluido attraverso un mezzo poroso secondo la legge di Darcy:

$$\bar{v} = - \frac{K}{\mu} (\nabla P - \rho \bar{g}) \quad (5.5)$$

Dove K è la permeabilità del mezzo attraverso cui avviene il moto, determinata tramite la relazione di Kozeny-Carman $K = \frac{f_l^3}{5M_s^2(1-f_l)^2}$; M_s è una costante dipendente dalla forma e dalle dimensioni delle dendriti secondarie.

Questa formulazione viene usata perché durante il cambiamento di fase, si può avere moto di liquido attraverso la "mushy zone", ossia una zona in cui la solidificazione è già parzialmente avvenuta secondo una struttura dendritica. Tale regione viene considerata come mezzo poroso con una sua permeabilità K . Per definire la mushy zone, il codice identifica due temperature all'interno delle quali avviene la solidificazione (temperatura di liquidus e di solidus) e un punto viene considerato appartenente a questa zona se la sua temperatura è compresa in tale intervallo. Una volta definita la mushy zone, solitamente il software genera un numero maggiore di nodi in corrispondenza di questa zona, per poter risolvere in modo preciso le equazioni di previsione delle porosità.

Le equazioni esposte sono le principali leggi che governano i fenomeni macroscopici e microscopici. Queste sono poi completate dalle equazioni costitutive, che descrivono fenomeni macroscopici come quelle che correlano il comportamento di un materiale con le sue proprietà (es: legge di Fick che consente il collegamento tra coefficiente di diffusione e l'equazione di conservazione del soluto; la legge di Fourier, che collega la conducibilità termica con la conservazione dell'energia, ecc.), come quelle relative alla fluidodinamica di riempimento (che seguono l'equazione di Navier-Stokes), il flusso di calore e la deformazione. Ci sono anche equazioni che descrivono la formazione della microstruttura: una formulazione entalpica, ad esempio, prende in considerazione l'emissione di calore latente relativa alla solidificazione e alle successive trasformazioni allo stato solido. (19)

5.2.2 Modello termico

Il modello termico permette di calcolare il flusso termico tramite la risoluzione dell'equazione di Fourier della conduzione del calore, equazione $\lambda \nabla^2 T + q_g = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}$ (5.3), la quale include anche il calore latente rilasciato durante la solidificazione. (20)

Per impostare lo scambio di calore in prossimità delle interfacce con l'ambiente esterno è necessario definire lo scambio termico tra le facce della conchiglia e l'ambiente esterno. Per farlo il software segue la seguente equazione:

$$Q = \Phi + h(T - T_a) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4) \quad (5.6)$$

Il primo termine corrisponde ad un flusso specifico, il secondo è il termine convettivo (h è il coefficiente di convezione) e il terzo è importante quando le radiazioni sono alte, ovvero ad alte temperature (σ è la costante di Stefan-Boltzmann e ε è l'emissività).

Per quanto riguarda il trattamento delle interfacce tra getto e forma, il contatto termico tra le varie parti è considerato adattando il coefficienti di trasferimento di calore (HTC) con riferimento o all'ampiezza del gap di aria o alla pressione di contatto come calcolato nell'algoritmo di contatto meccanico. Quando l'ampiezza del gap è maggiore di zero, il coefficiente di trasferimento del calore assume la forma $h_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + \frac{1}{h_{air} + h_{rad}}}$

dove h_0 è il valore iniziale del coefficiente di scambio termico, $h_{air} = \frac{K_{air}}{g}$ in cui K_{air} è la conduttività dell'aria e g l'ampiezza del gap, h_{rad} è il coefficiente di scambio termico di irraggiamento.

5.2.3 Porosità

Quando un getto solidifica, si creano delle "sacche di liquido" che sono circondate dalle "mushy zones". Automaticamente, il getto viene diviso in regioni entro le quali la frazione solida è più bassa di 1 (dove 1 indica il 100% di getto solidificato). Durante la solidificazione, in base alla complessità della geometria, il numero di regioni può variare nel tempo, una regione si può dividere in più regioni oppure una regione può sparire quando tutti i nodi sono solidificati. Quando una regione si raffredda, la densità aumenta con il diminuire della temperatura e avviene, quindi, il ritiro volumetrico. Prendendo come riferimento l'immagine Figura 40 - regioni con diverse frazione solide durante la solidificazione in cui vengono evidenziate, durante il raffreddamento, due regioni più calde la cui frazione solida è minore. I termini MACROFS e FEEDLEN si riferiscono a parametri per definire la macroporosità e devono essere compresi tra 0 e 1; il primo segna il valore di frazione solida limite tra la formazione di microporosità e macroporosità, mentre il secondo indica la distanza alla quale possono formarsi macroporosità fuori dalla superficie limite di MACROFS. Ad ogni istante di tempo, viene calcolato il ritiro accumulato per ogni nodo che ha una frazione solida uguale o minore di MACROFS, più i nodi la cui frazione solida è compresa tra MACROFS e MACROFS+FEEDLEN e contemporaneamente vengono effettuati calcoli relativi al ritiro volumetrico e alle microporosità. (20)

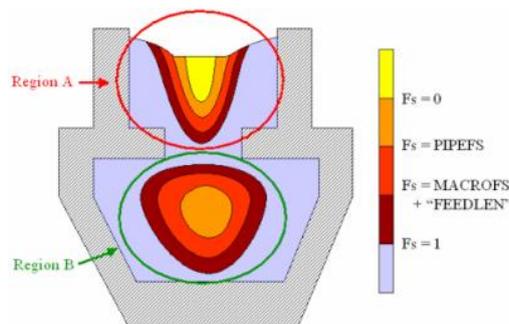


Figura 40 - regioni con diverse frazione solide durante la solidificazione

5.3 Simulazione della colata del supporto motore con conchiglia convenzionale

Partendo dai modelli CAD 3D del getto e della conchiglia, è stata creata la mesh di entrambi i componenti. È necessario fare presente che la conchiglia è stata simulata come un monoblocco invece che due mezzeforme, come mostrato in Figura 41 (alla figura vengono aggiunte le linee di separazione delle due forme per rendere più chiara l'immagine). Questa scelta è stata presa d'accordo con l'azienda, che, con i molti anni di esperienza nel settore della fonderia e con il software, ritengono sufficiente impostare la simulazione in questo modo. Questa semplificazione, infatti, permette di risparmiare tempo e risorse di memorizzazione, consentendo, comunque, di simulare correttamente lo scambio termico tra la cavità e lo stampo, in quanto i coefficienti di scambio termico di ogni componente sono condizionati dai tempi ciclo che tengono conto di ogni passaggio (apertura della conchiglia, pulizia, ecc...) con i relativi valori di conduttanza. Questa similitudine tra i risultati viene confermata anche dagli stessi produttori del software, i quali scrivono, nel manuale per utenti, che utilizzando un "virtual mold" (stampo virtuale in cui vengono definite solamente le dimensioni esterne della conchiglia) è possibile simulare la colata in gravità del getto voluto ottenendo risultati molto simili a quelli che si otterrebbero utilizzando una conchiglia convenzionale (20). Perciò, utilizzando una conchiglia monoblocco, i risultati termici e metallurgici non presentano miglioramenti o peggioramenti rispetto ad una simulazione con due mezzeforme piuttosto che un monoblocco. Per mostrare i risultati relativi alla conchiglia, quindi, è necessario sezionare la forma in corrispondenza della linea di separazione dei due stampi, come mostrato in Figura 42; in Figura 43, invece, viene mostrata la conchiglia inferiore come verrà mostrata nei capitoli futuri. Altre considerazioni relative all'utilizzo del monoblocco verranno fatte nel capitolo 6.1 Analisi termica del supporto motore.

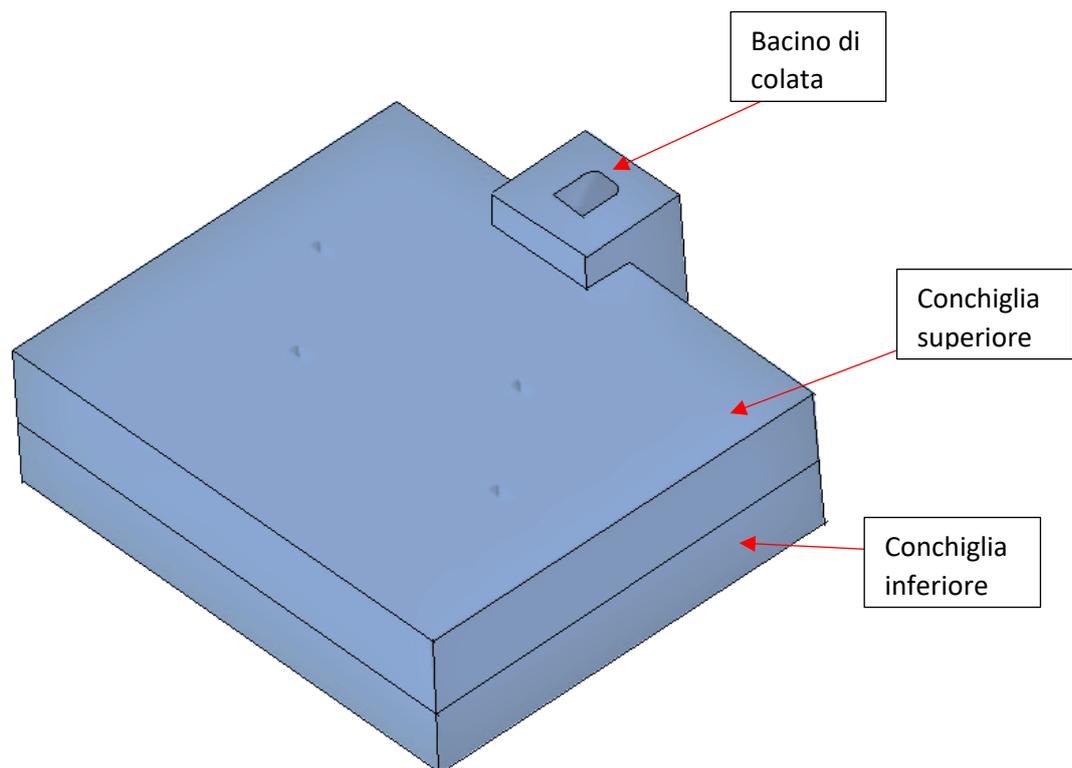


Figura 41 - conchiglia chiusa – monoblocco

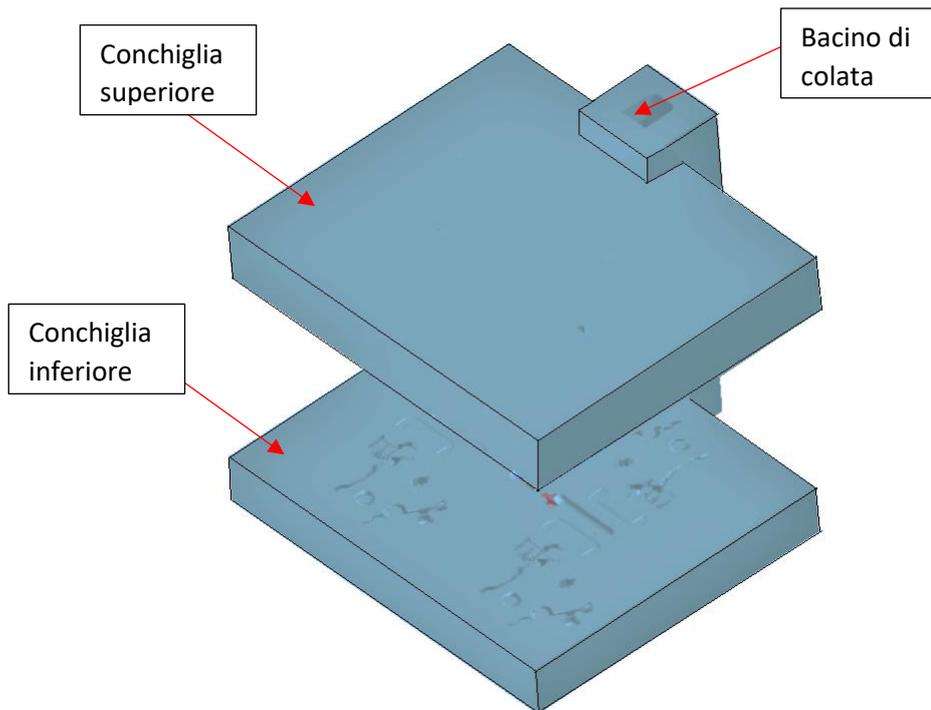


Figura 42 - conchiglia monoblocco sezionata e aperta - in questo modo sono visibili sia la conchiglia inferiore che la conchiglia superiore

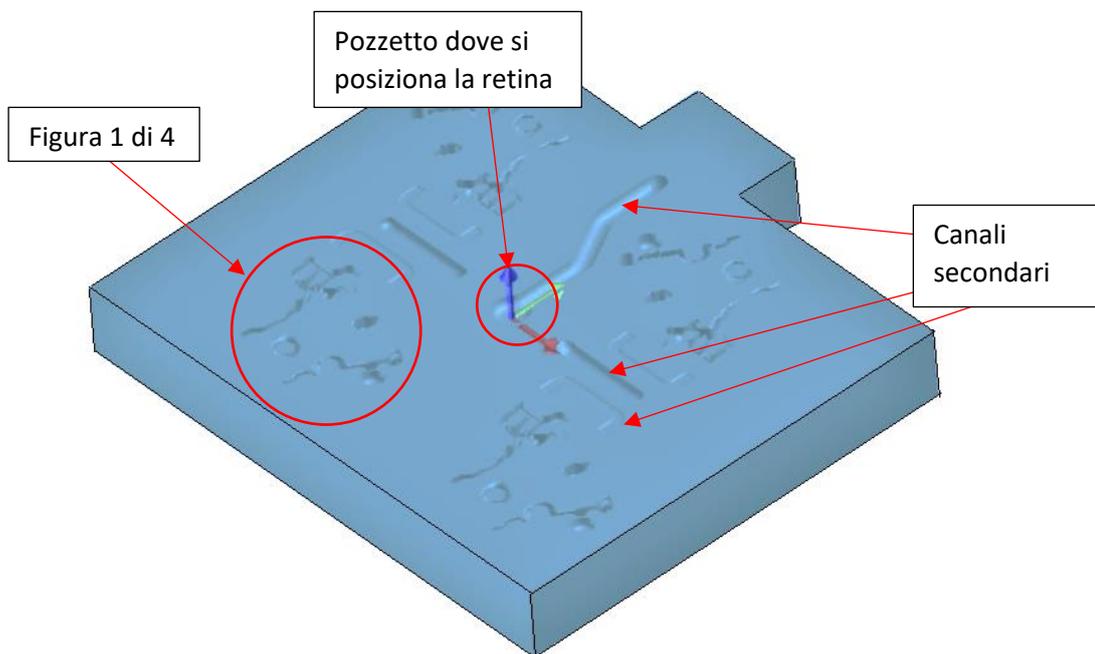


Figura 43 - conchiglia inferiore

Sono, poi, stati impostati i seguenti parametri per effettuare la simulazione:

- Tempo ciclo e tempi di alcune operazioni
- Temperatura del fuso
- Temperatura iniziale della conchiglia
- Numero di cicli che si vogliono visualizzare

La temperatura del fuso e la temperatura della conchiglia sono state riportate secondo l'impostazione attuale. La temperatura del fuso è impostata a 715-720°C, mentre la temperatura iniziale della conchiglia, alla quale viene scaldata ad ogni turno prima di iniziare la produzione, deve essere compresa tra 320 e 350°C, nella simulazione è stato impostato un valore pari a 350°C.

Per quanto riguarda i tempi, è importante far notare che la postazione non è completamente automatizzata, è presente un braccio robotico che versa l'alluminio fuso all'interno della conchiglia, ma per estrarre il getto è necessario l'intervento di un operatore, che preleva i pezzi con l'aiuto di un manipolatore industriale. Per questo motivo le tempistiche di alcune operazioni non sono uguali da un ciclo all'altro ma variano in base ai ritmi degli operatori. Osservando diversi cicli, è stato possibile ottenere una media dei tempi:

- Tempo di apertura della conchiglia e uscita degli estrattori: 20s
- Tempo variabile operatore (presa del getto, posa nell'apposita cesta, soffiatura della conchiglia e inserimento della retina): 50-60s
- Tempo chiusura della conchiglia: 22s
- Tempo ulteriore affinché il braccio robotico versi il metallo fuso (quando l'operatore dà l'input alla conchiglia di chiudersi, il segnale arriva anche al robot, che si avvia a riempire la tazza del metallo fuso, il tempo segnato in questa voce è il tempo restante che ci impiega per arrivare alla conchiglia): 30s
- Tempo versamento: 11.5 s
- Tempo raffreddamento: 195s

Sommando tutti i tempi si è ottenuto un tempo ciclo totale medio pari a 327 s. Tutti i tempi citati devono essere inseriti come input nel software, per simulare correttamente l'apertura e chiusura della conchiglia.

In quanto al numero di cicli, per ottenere un transitorio termico adeguato basterebbero 5-6 cicli di lavoro, in questo caso si è deciso di osservarne 10, in modo da avere un tempo maggiore per effettuare il confronto con la temperatura reale della conchiglia (di cui verrà discusso nel capitolo 6.1).

Come già anticipato nel capitolo 5.2, è consigliato in un primo momento effettuare un certo numero di cicli andando a simulare l'entrata del metallo fuso all'interno dello stampo e il conseguente riscaldamento della conchiglia e raffreddamento all'apertura dello stampo. Successivamente, dopo aver ottenuto una storia termica, si effettua un ulteriore ciclo in cui viene simulato sia l'entrata del fuso all'interno della conchiglia con conseguente variazione della temperatura della forma, sia la solidificazione e il raffreddamento del getto, ottenendo così tutti i parametri relativi al getto (temperature, frazione solida, porosità e SDAS). Questa tipologia di simulazione (completa) è stata effettuata anche a inizio simulazione per ottenere i valori di SDAS, infatti, questo parametro viene usato come parametro di confronto con i risultati reali ottenuti dal supporto motore nel capitolo 6.2.

6 Metodi di caratterizzazione sperimentale

Nei capitoli seguenti (6.1, 6.2 e 6.3) vengono presentate le analisi termiche e metallurgiche effettuate sul supporto motore. In particolare, il capitolo 6.1 mostra l'analisi termica della conchiglia che stampa il supporto motore, mentre nei capitoli 6.2 e 6.3 segue l'analisi microscopica e macroscopica di un componente. Tutti i risultati ottenuti vengono confrontati con ciò che è stato ricavato dalle simulazioni effettuate con il software ProCAST.

6.1 Analisi termica del supporto motore

Per effettuare un confronto tra le temperature ottenute nella simulazione e le temperature reali della conchiglia relativa al supporto motore descritto, si è fatto uso di una termocamera ad infrarossi. Una termocamera è un dispositivo senza contatto che rileva l'energia a infrarossi (calore) e la converte in un segnale elettronico, che viene poi elaborato per produrre un'immagine o un video termico. La termocamera utilizzata è di marca *IRtech* (Figura 44). I dati acquisiti tramite la termocamera sono stati registrati tramite il software *Timage Connect* e, in un secondo momento, importati in *MATLAB* per poterli analizzare e creare i grafici che verranno mostrati in questo capitolo. Il software *Timage Connect* permette di selezionare zone e osservarne l'andamento della temperatura nel tempo, specificando anche se ciò che si vuole osservare è la temperatura minima, media o massima.



Figura 44 - termocamera *IRtech*

È stato necessario impostare alcuni parametri, come il range di temperatura, che è stato fissato tra 150 e 900°C, perciò tutto ciò che si trova al di fuori di questo intervallo compare nell'inquadratura di colore nero. Un altro parametro da impostare è l'emissività dell'acciaio di cui è costituita la conchiglia. L'intensità delle radiazioni infrarosse, emesse da ogni corpo, dipende dalla temperatura e dalle caratteristiche di radiazione della superficie dell'oggetto che si vuole misurare, l'abilità dell'oggetto di emettere energia infrarossa viene definita emissività (ϵ). L'emissività può variare tra 0 e 100%; un corpo nero, che è la sorgente ideale di radiazioni, ha emissività pari a 1. Per poter trovare il giusto coefficiente di emissività della conchiglia è stata contrassegnata una parte della conchiglia con una cera nera, in modo da ottenere un "punto nero" con emissività pari a 1. Dal software, successivamente, è stato possibile determinare la temperatura di un punto appena adiacente al punto nero (in modo che avessero la stessa temperatura) e modificare la sua emissività fino ad ottenere un valore corrispondente alla temperatura del punto nero. In questo modo si è ottenuto che la superficie della conchiglia ha una emissività ϵ pari a 0,878.

6.1.1 Posizionamento della termocamera

Il posizionamento della termocamera non è ottimale, non è stato possibile collocarla vicino alla conchiglia in quanto avrebbe intralciato il lavoro dell'operatore. Per questo motivo scegliere un punto preciso della conchiglia in cui osservare le temperature sarebbe riduttivo e poco affidabile; perciò, per la conchiglia inferiore e per la parte interna della conchiglia sono state selezionate delle zone rettangolari (Figura 45).

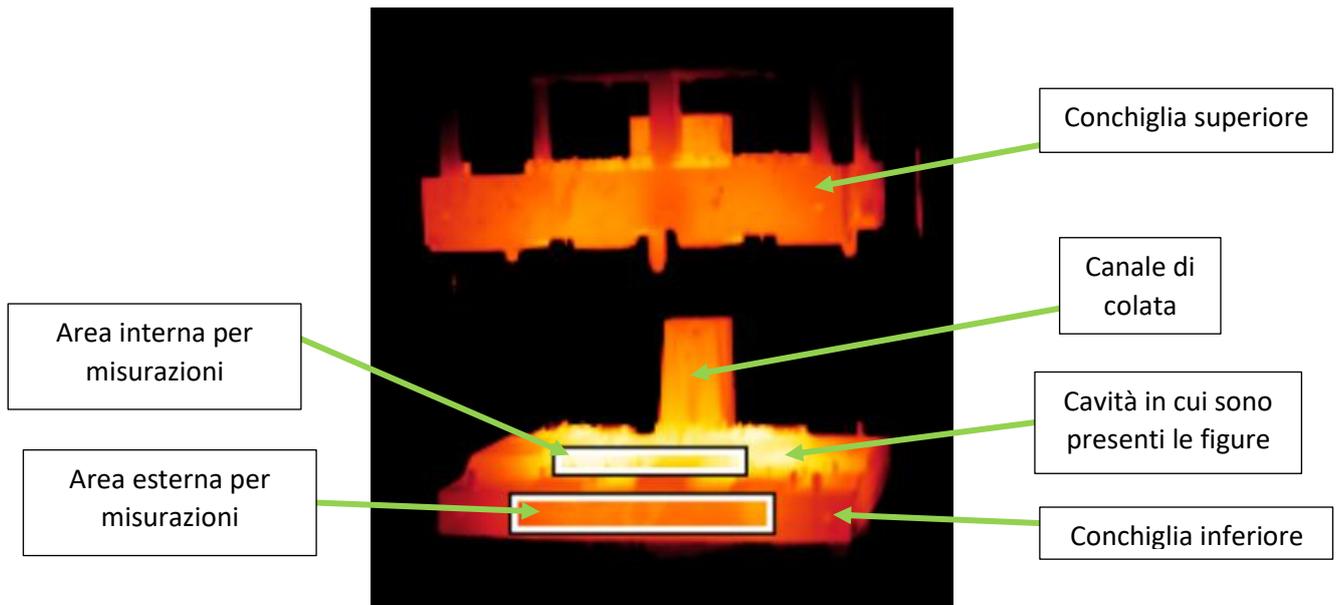


Figura 45 - posizionamento delle aree prese in considerazione per le misurazioni

La termocamera è posizionata, quindi, dietro la zona in cui lavora l'operatore. Come è stato evidenziato precedentemente, il range di temperatura alla quale la termocamera registra le temperature va da 150 a 900°C, ciò che ha una temperatura esterna a questo intervallo viene mostrato come una figura nera. Perciò, le temperature registrate vedono dei picchi in negativo ogni volta che l'operatore si posiziona davanti alla termocamera o, in generale, quando nelle aree selezionate entra un oggetto con una temperatura esterna ai valori limite. In Figura 46 ne viene mostrato un esempio, in cui compare il transitorio termico della parte esterna della conchiglia inferiore; vengono mostrate la temperatura minima, media e massima e sono evidenti le brusche variazioni di temperatura soprattutto lungo l'andamento della temperatura media e minima.

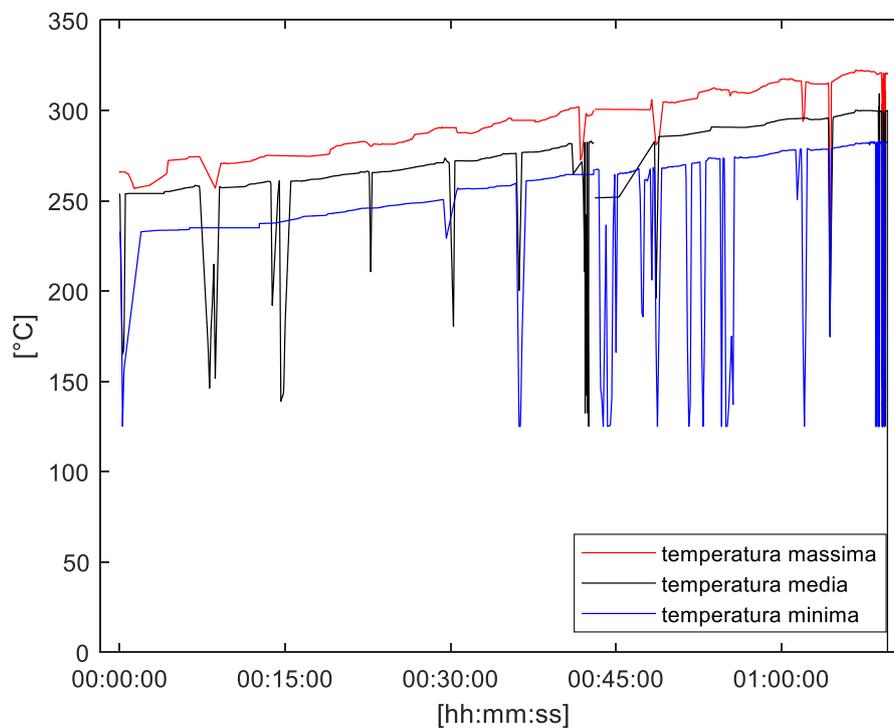


Figura 46 - andamento temperature della conchiglia inferiore esternamente

Osservando il grafico in Figura 46 è necessario porre attenzione ai numerosi picchi in negativo, ma anche al fatto che la temperatura minima raggiunta sia pari a 125°C (25°C al di sotto del valore minimo impostato inizialmente). La maggior parte delle variazioni brusche sono dovute al passaggio dell'operatore, il quale ha una temperatura corporea di 36°C circa, molto più bassa della temperatura minima ottenuta tramite la termocamera. Si rende necessario, quindi, comprendere come lavori il software e come si comporti nel caso in cui la temperatura esca dal range stabilito.

Nel caso di temperatura minima, il software restituisce come output la temperatura minima rilevata nell'area selezionata. Lo stesso procedimento avviene nel caso in cui venga richiesta la temperatura massima o quella media. È chiaro, quindi, che nel caso in cui all'interno dell'area selezionata ci fosse qualche punto con un valore oltre i limiti fissati, i risultati finali sarebbero compromessi. In questo caso si è distanti dal limite superiore di 900°C, ma molto spesso quello inferiore di 150°C viene oltrepassato. La temperatura massima, quindi, non risente di questi disturbi, a meno che tutta l'area non venga coperta; mentre gli andamenti della temperatura media e minima potrebbero risentirne. L'andamento della temperatura minima rimane chiaro nonostante questi rumori esterni, mentre viene alterato l'andamento della media; infatti, se parte dell'area viene coperta dall'operatore (a 36°C circa), ciò che viene registrato dalla termocamera è una temperatura di quella zona pari a 125°C, la media della temperatura calcolata sull'area prescelta, quindi, non sarà corretta.

Per risolvere i problemi elencati, si è proceduto con la modifica dei grafici tramite l'utilizzo di MATLAB, eliminando i disturbi creati da variazioni errate di temperatura. Inoltre, nei capitoli Temperatura dell'interno della conchiglia 6.1.5 e 6.1.6, in cui vengono mostrate le temperature della parte interna della conchiglia ottenute con la termocamera all'apertura dello stampo, viene mostrato solo l'andamento della temperatura massima, in modo da eliminare il problema dei disturbi esterni; infatti, il disturbo principale si osserva all'apertura della conchiglia, quando l'operatore deve estrarre il getto ed effettuare le operazioni di pulizia.

6.1.2 Riscaldamento della conchiglia

Il riscaldamento della conchiglia avviene tramite dei bruciatori a gas che vengono posti in corrispondenza della parte interna della conchiglia, bruciatori creati appositamente in modo da ottenere una temperatura il più omogenea possibile all'interno dello stampo, come mostrato in Figura 47. La temperatura interna per un buon inizio di produzione (per non scartare i primi getti) è fissata tra i 320 e i 350°C. In base al tempo per cui viene scaldata la conchiglia, queste temperature possono essere più o meno raggiunte.

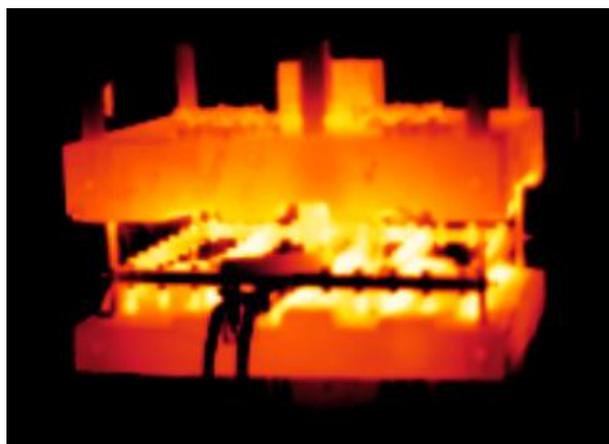


Figura 47 - riscaldamento della conchiglia

È importante notare, inoltre, che se la produzione non iniziasse nel momento in cui si conclude il riscaldamento, i primi getti potrebbero non avere le caratteristiche richieste. Nel grafico in Figura 48 viene

mostrato l'andamento della temperatura nel caso in cui la conchiglia rimanesse aperta e non venisse subito utilizzata dopo il riscaldamento.

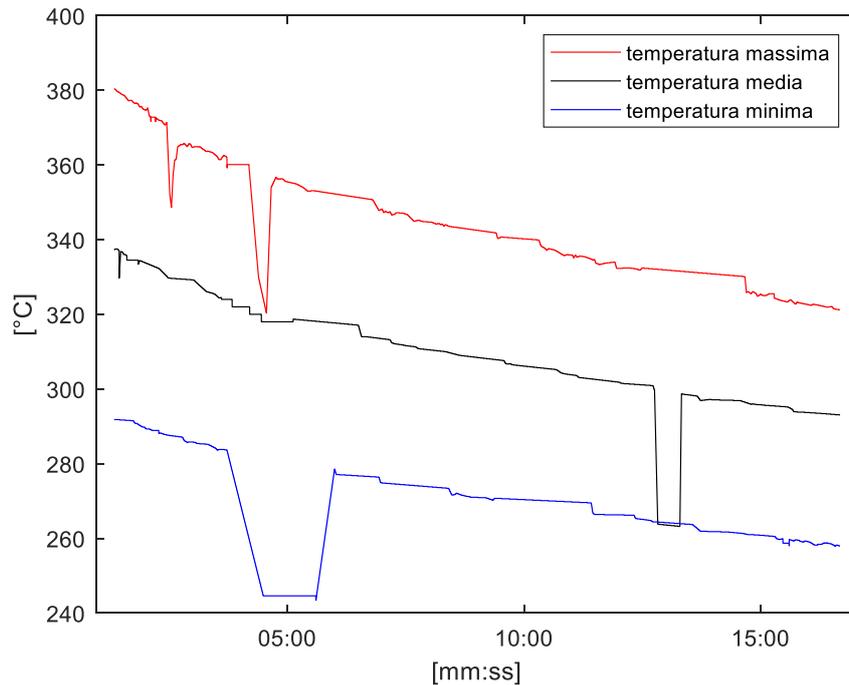


Figura 48 - raffreddamento naturale della parte interna della conchiglia - ottenuto con termocamera

Come si può vedere, in 15 minuti la temperatura massima scende da 380°C fino a 321°C, la media da 337°C a 293°C e la minima da 292°C a 258°C. Ne risulta, quindi, che mediamente la temperatura scende di 3°C al minuto. Quest'informazione è importante perché permette di capire quanto influisca il tempo nella variazione di temperatura nel caso in cui la conchiglia non venga adoperata subito dopo il riscaldamento o nel caso di eventuali interruzioni.

Per confrontare la simulazione con i cicli reali, è possibile confrontare soltanto la temperatura interna della conchiglia, infatti, nella simulazione la conchiglia parte da una temperatura omogenea di 350°C, mentre nella realtà, come appena spiegato, solo la parte interna raggiunge questa temperatura.

6.1.3 Ciclo di lavoro medio

Il ciclo di lavoro prevede i seguenti passaggi:

1. L'operatore manda l'input di chiusura della conchiglia e, in automatico, viene inviato il segnale anche al braccio robotico
2. Il braccio robotico si sposta verso il forno di mantenimento e preleva il metallo fuso, si sposta verso la conchiglia e cola l'alluminio
3. Avviene il processo di solidificazione e raffreddamento
4. La conchiglia si apre automaticamente
5. L'operatore preleva il getto tramite l'ausilio di un movimentatore industriale e lo posiziona nell'apposita cesta
6. L'operatore effettua la pulizia della conchiglia tramite un compressore ad aria e utilizza del talco per permettere alla lega un miglior scorrimento lungo la cavità

La postazione di lavoro, quindi, non è completamente automatizzata e la stretta dipendenza dall'operatore rende complesso il confronto tra simulazione e realtà. I tempi variabili sono due: il primo è direttamente

collegato alle operazioni effettuate dall'operatore e il secondo è il tempo che impiega il braccio robotico per arrivare alla conchiglia dopo che è arrivato l'input. Questo tempo non è sempre costante perché nell'isola di lavoro sono presenti quattro conchiglie attorno allo stesso robot, infatti, osservando le tempistiche di dieci cicli consecutivi, è possibile vedere che in alcuni casi il tempo di attesa raddoppia o addirittura quadruplica (da 30s circa a quasi 2 minuti) perché in quei casi il robot aveva avuto un input precedente di fornire un'altra conchiglia. In Figura 49 e in Figura 50 si può vedere quanto possano variare queste due tempistiche in dieci cicli di lavoro.

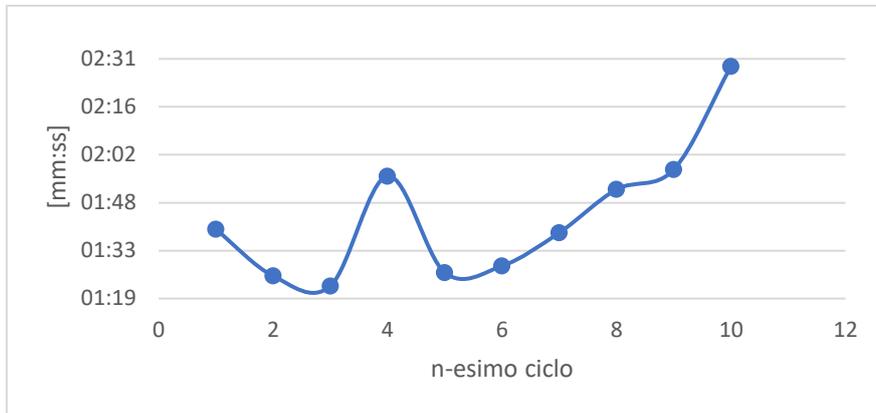


Figura 49 - tempo dell'operatore per estrarre il getto ed effettuare operazioni di pulizia - confronto su 10 cicli di lavoro

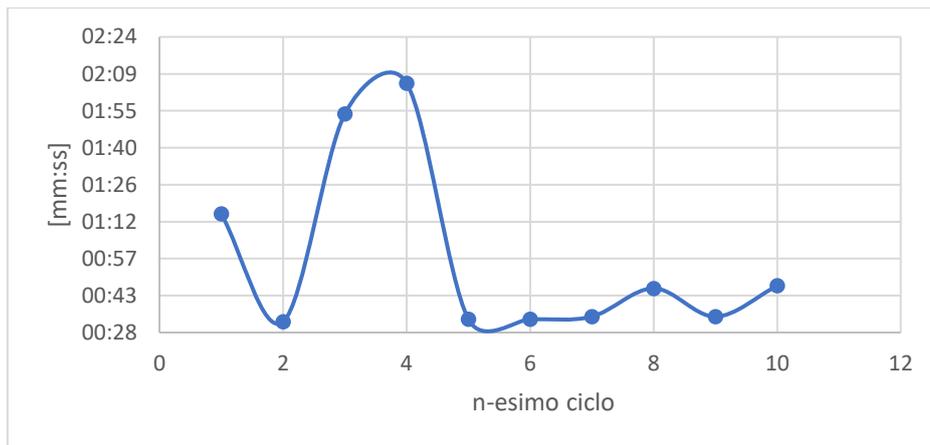


Figura 50 - tempo che intercorre tra la chiusura della conchiglia e l'inizio del versamento della lega - confronto su 10 cicli di lavoro

Un ciclo medio, quindi, ha durata pari a 7 minuti e i tempi che rimangono costanti sono:

- Tempo di chiusura della conchiglia: 22s
- Tempo di versamento: 12s
- Tempo di raffreddamento e solidificazione: 195s
- Tempo di apertura della conchiglia: 20s.

6.1.4 Transitorio termico della parte esterna della conchiglia

Nel sottocapitolo 6.1.2 è stato spiegato come la conchiglia venga scaldata tra i 320 e i 350°C. Le misurazioni che seguono iniziano da una temperatura interna della conchiglia pari a 320°C, ma si vede che basta un ciclo di lavoro per arrivare alla temperatura di 350°C e poterla confrontare con la simulazione. I risultati che seguono mostrano l'andamento della temperatura nei primi dieci cicli di lavoro; anche la simulazione è stata effettuata per dieci cicli.

In Figura 51 viene mostrato il transitorio termico della parte inferiore della conchiglia, preso in corrispondenza della parte esterna anteriore; la temperatura aumenta molto lentamente: in poco più di un'ora la temperatura massima passa da 266°C a 320°C, la media da 254°C a 309°C e la minima da 233°C a 282°C. Mediamente, quindi, la temperatura della conchiglia inferiore cresce di 0,77°C al minuto.

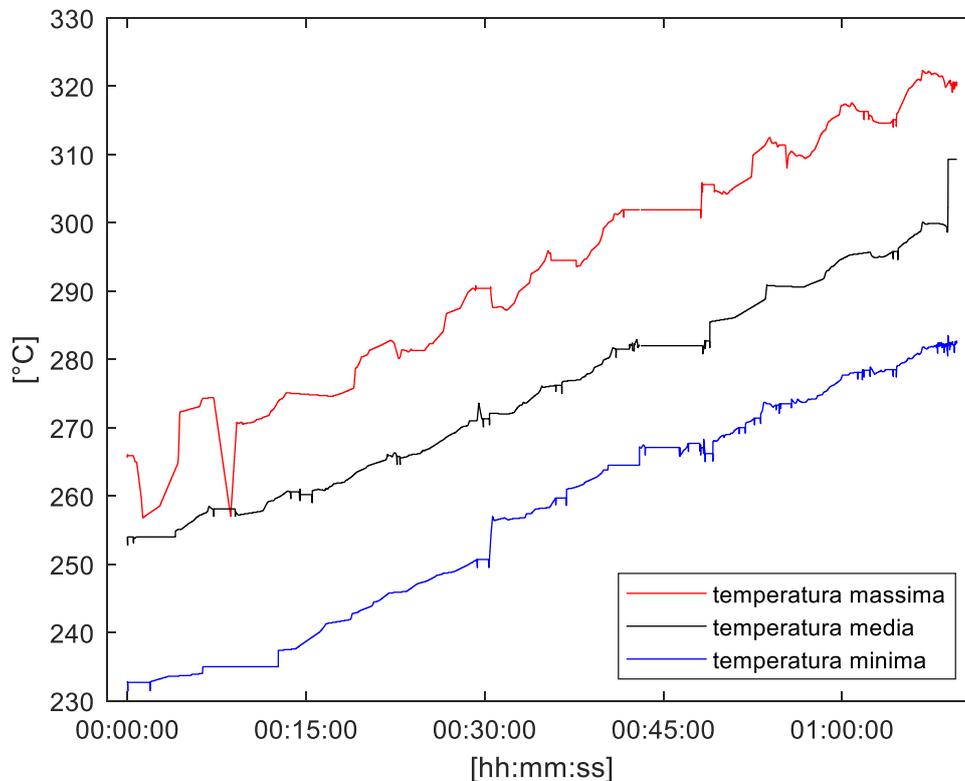


Figura 51 - andamento della temperatura della conchiglia inferiore - primi dieci cicli di lavoro - ottenuto con termocamera

Confrontando le temperature massime registrate alla fine di ogni ciclo nel caso reale (Figura 52) e nel caso della simulazione (Figura 53), si ottiene l'andamento mostrato nel grafico in Figura 54. Come già anticipato, nella simulazione viene impostata la temperatura di base della conchiglia pari a 350°C che è costante in tutto lo stampo, invece, nella realtà, si parte da una temperatura più bassa, ottenuta per conduzione dalla parte interna dove vengono posti i bruciatori a gas per il riscaldamento. Ciò che emerge è che la temperatura massima ottenuta nella simulazione non scende oltre i 320°C e, quindi, l'equilibrio nella simulazione viene raggiunto dopo solo un paio di cicli; mentre nel caso reale si vede che dieci cicli non bastano per raggiungere l'equilibrio termico, infatti, la temperatura reale massima aumenta di circa 4,6°C ad ogni ciclo di lavoro. Sarebbe utile effettuare un'ulteriore misurazione, seguendo più cicli produttivi, per verificare che la temperatura di regime sia pari a quella ottenuta nella simulazione; se così fosse, la temperatura massima esterna della conchiglia inferiore non dovrebbe più variare dopo il quindicesimo ciclo.

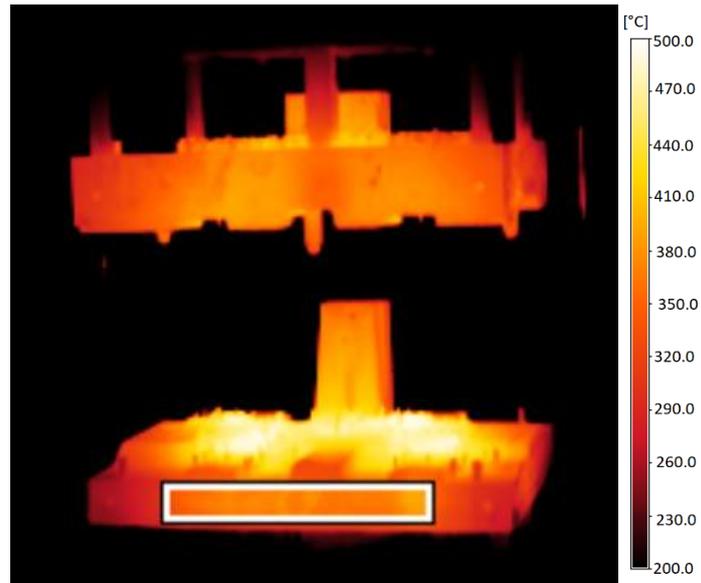


Figura 52 - conchiglia inferiore al decimo ciclo

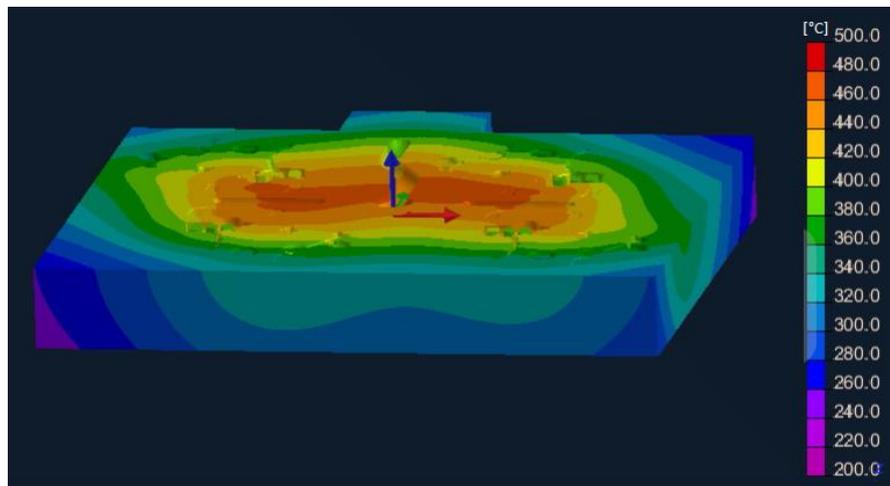


Figura 53 - conchiglia inferiore - simulazione - decimo ciclo

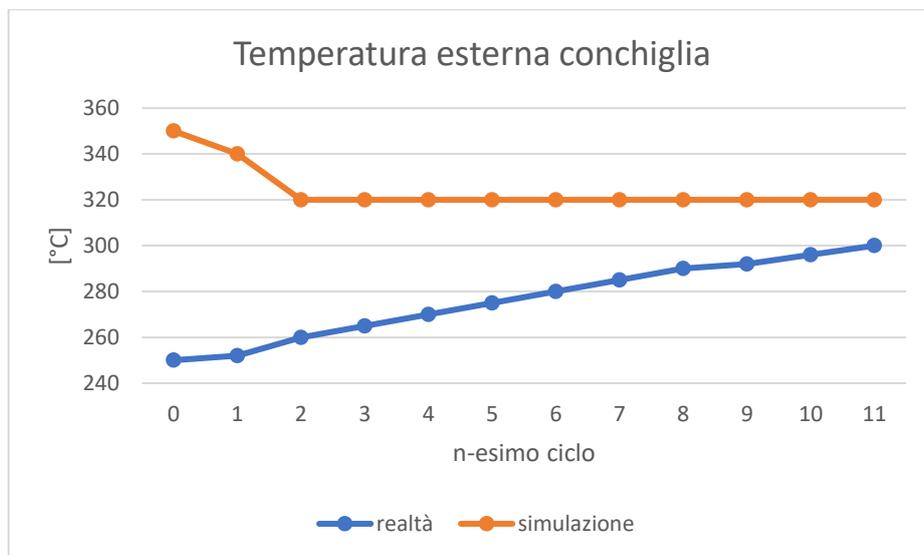


Figura 54 - confronto tra transitorio termico nella realtà e nella simulazione - esterno della conchiglia

6.1.5 Temperatura dell'interno della conchiglia

Per quanto riguarda, invece, la temperatura interna della conchiglia, è possibile osservarla solo all'apertura dello stampo, perciò, il grafico che mostra la continuità nel tempo non è di facile interpretazione ed è necessario separarli in base alle aperture della conchiglia. Infatti, impostando un'area di misura, non è possibile, tramite il software *Timage Connect*, salvare solo alcuni istanti di tempo. La termocamera vede intervalli di tempo in cui la conchiglia è chiusa (Figura 55.a), altri in cui è aperta ed è presente il getto (Figura 55.b) e altri in cui è aperta e non c'è il getto (Figura 56). Gli intervalli di tempo che si vogliono osservare sono solo quelli in cui lo stampo è aperto ed è libero dal getto (Figura 56), perciò questi istanti sono stati separati tramite il software *MATLAB* e i risultati vengono mostrati nelle figure seguenti.

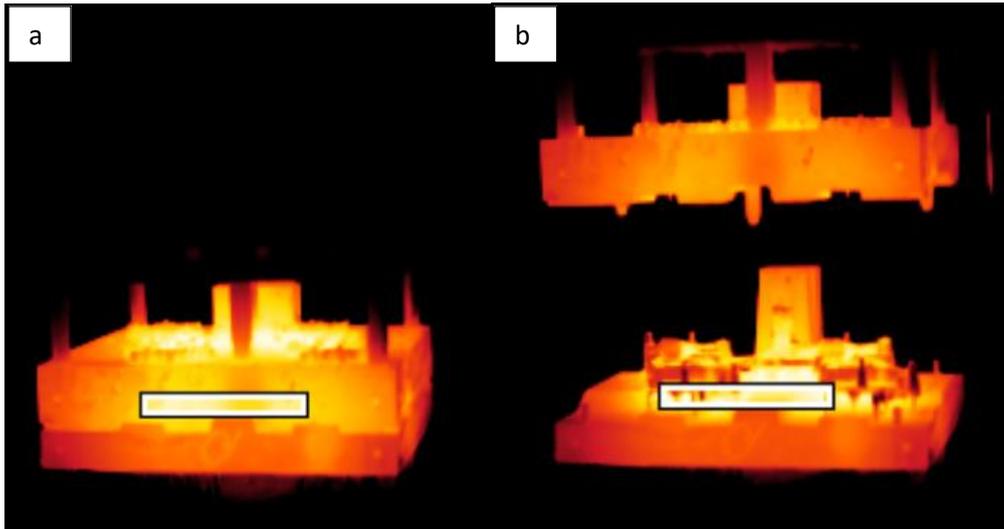


Figura 55 - conchiglia chiusa durante solidificazione e raffreddamento (a) e conchiglia aperta con getto (b)

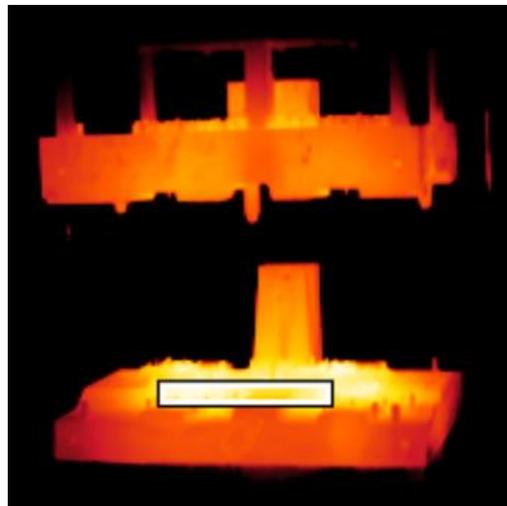


Figura 56 - conchiglia aperta senza getto

Dopo il riscaldamento della conchiglia, prima di iniziare a colare, la temperatura alla quale si trova la parte interna della conchiglia è di 320°C circa (Figura 57 e Figura 58).

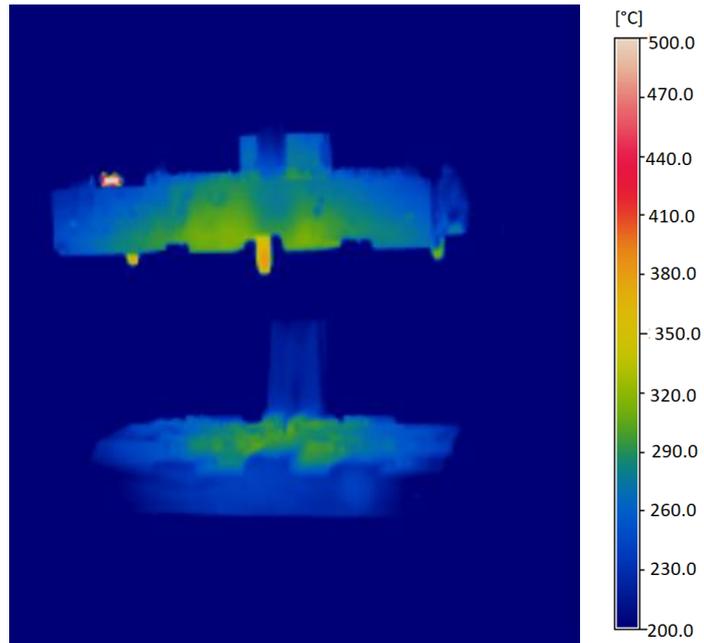


Figura 57 - conchiglia aperta prima di iniziare

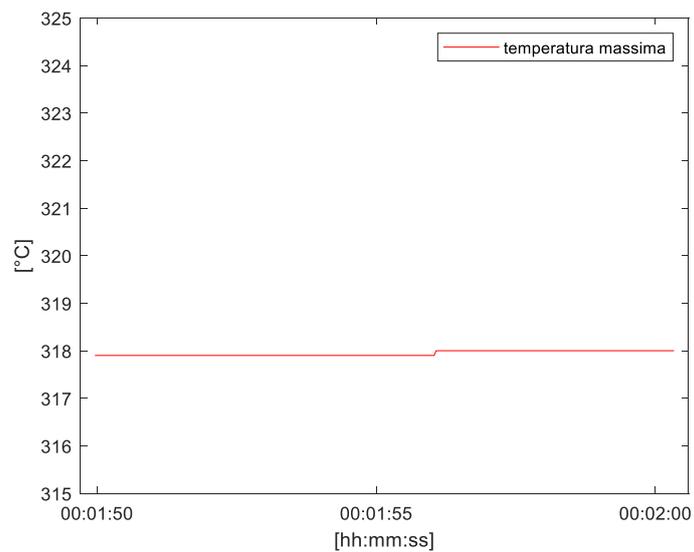


Figura 58 - temperatura conchiglia interna prima di iniziare a colare - ottenuto con termocamera

Dopo un ciclo di lavoro la temperatura interna che si ottiene è quella mostrata nella Figura 59 e nella Figura 60. La temperatura alla quale arriva è all'incirca quella che avrebbe dovuto essere la temperatura iniziale (350°C). Per questo motivo, per fare un confronto con la simulazione, viene preso come stadio iniziale la fine del primo ciclo reale.

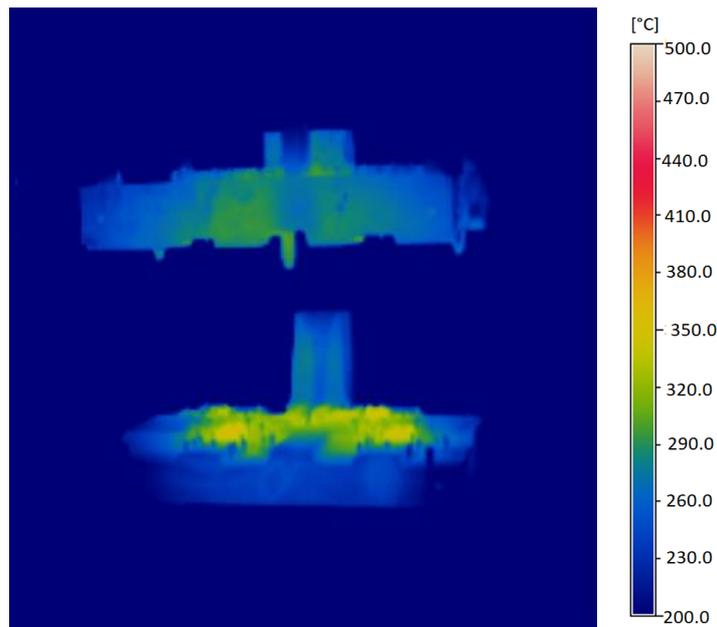


Figura 59 - apertura conchiglia dopo il primo ciclo

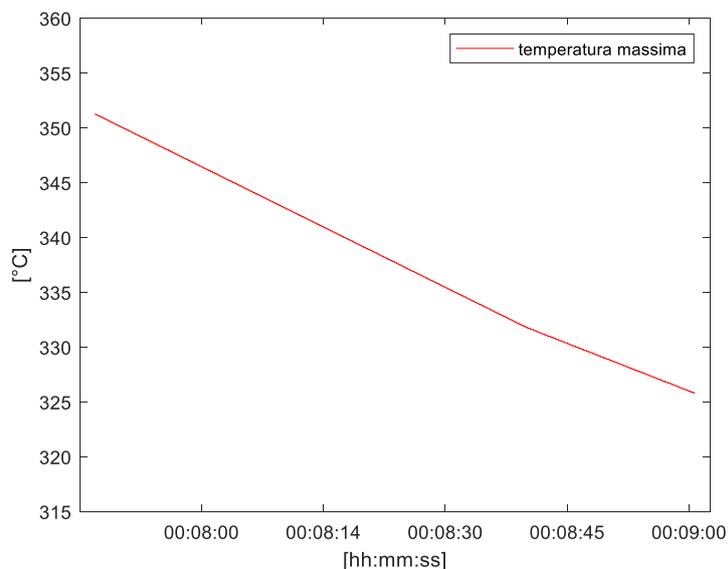


Figura 60 - temperatura interna della conchiglia dopo la prima colata - ottenuto con termocamera

6.1.6 Confronto tra temperatura reale e simulazione nel transitorio termico

Nelle immagini che seguono vengono confrontate le immagini ottenute con la termocamera e i grafici ottenuti su *MATLAB* con i risultati ottenuti dalla simulazione. Le temperature minima, media e massima che si vedono dai grafici hanno un grande sbalzo termico, per i motivi già elencati precedentemente; perciò, si vuole vedere se ci sia corrispondenza tra le temperature massime osservate con la termocamera e ciò che si è ricavato dalla simulazione. Si è osservato l'andamento dei primi cicli di lavoro, nelle immagini che seguono vengono messi in evidenza solo i primi e gli ultimi cicli.

In Figura 61 viene mostrato l'andamento della temperatura della parte interna della conchiglia inferiore durante la prima apertura, concluso il primo ciclo di lavoro: all'apertura la conchiglia ha una temperatura massima di quasi 380°C, che poi diminuisce mentre l'operatore svolge la pulizia dello stampo e lo prepara per il ciclo successivo. In Figura 62 si può vedere un fotogramma IR del momento successivo al quale è stato

estratto il getto. Le temperature sono confrontabili con quelle ottenute dalla simulazione al termine del primo ciclo di lavoro, mostrate in Figura 63, in cui si vede che la temperatura massima viene raggiunta in corrispondenza delle figure e arriva a 380°C. Perciò, alla fine del primo ciclo di lavoro c'è corrispondenza tra temperature reali e temperature ottenute in simulazione.

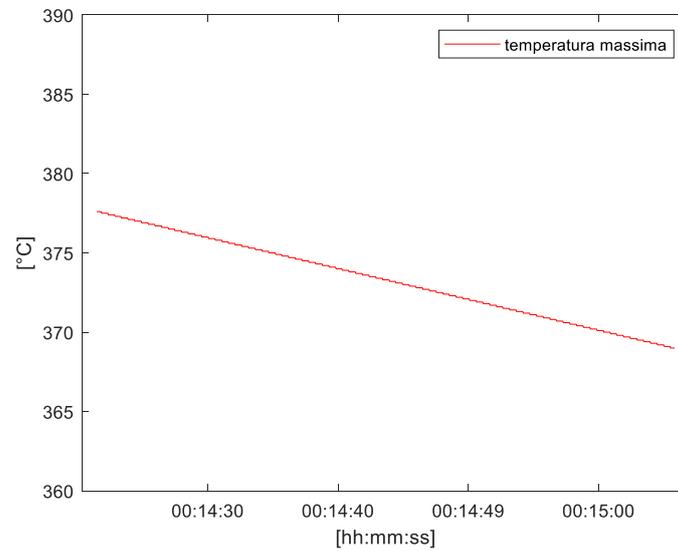


Figura 61 - andamento temperature alla prima apertura – ottenuto con termocamera

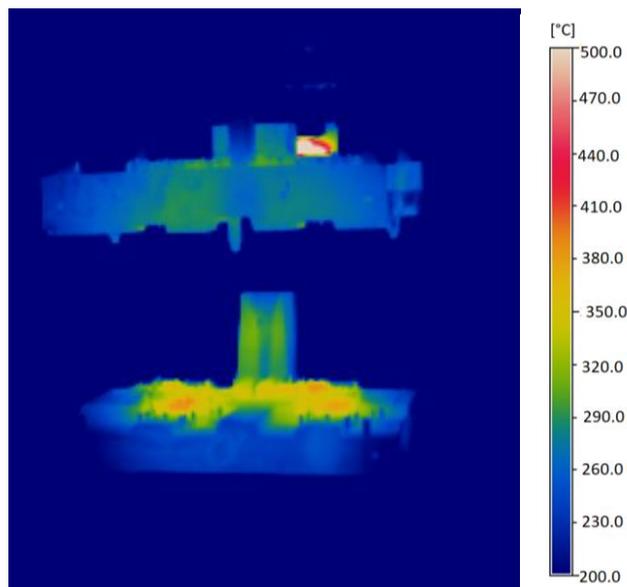


Figura 62 - fotogramma IR dopo la prima colata

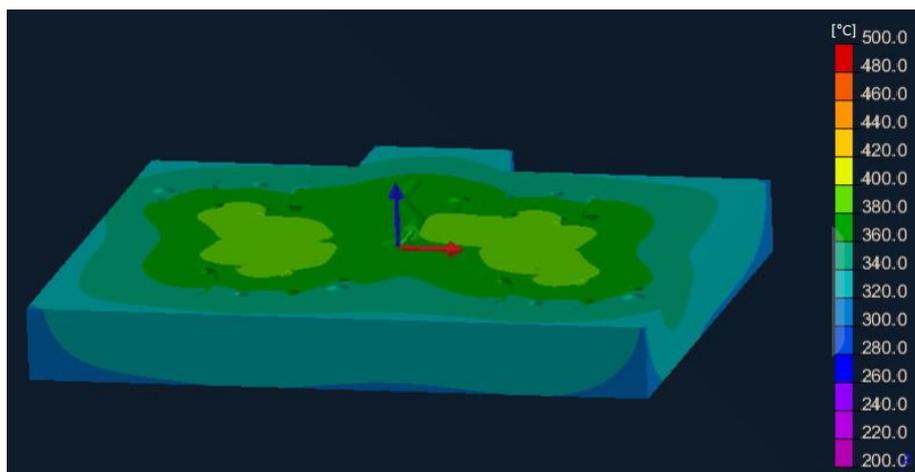


Figura 63 - conchiglia interna - simulazione dopo un ciclo di lavoro

Il termine del secondo ciclo viene mostrato nelle immagini seguenti nello stesso modo in cui sono state presentate per il primo ciclo. In Figura 64 viene mostrato l'andamento della temperatura relativa alla parte interna della conchiglia inferiore durante la seconda apertura, concluso il secondo ciclo di lavoro: all'apertura la conchiglia ha una temperatura massima superiore a 400°C e cresce nel tempo, questo andamento è inusuale. Osservando la temperatura media, però, si vede che è intorno ai 380°C, mentre alla fine del primo ciclo si trovava a 360°C circa, perciò, è verosimile che la temperatura massima sia aumentata di 20°C come la media e sia circa 400°C. In Figura 65 si può vedere un fotogramma IR del momento successivo al quale è stato estratto il getto. Le temperature sono confrontabili con quelle ottenute dalla simulazione al termine del secondo ciclo di lavoro, mostrate in Figura 66, in cui si vede che la temperatura massima viene raggiunta in corrispondenza delle figure e arriva a 410°C. Perciò, anche al termine del secondo ciclo c'è corrispondenza tra temperature reali e temperature ottenute in simulazione.

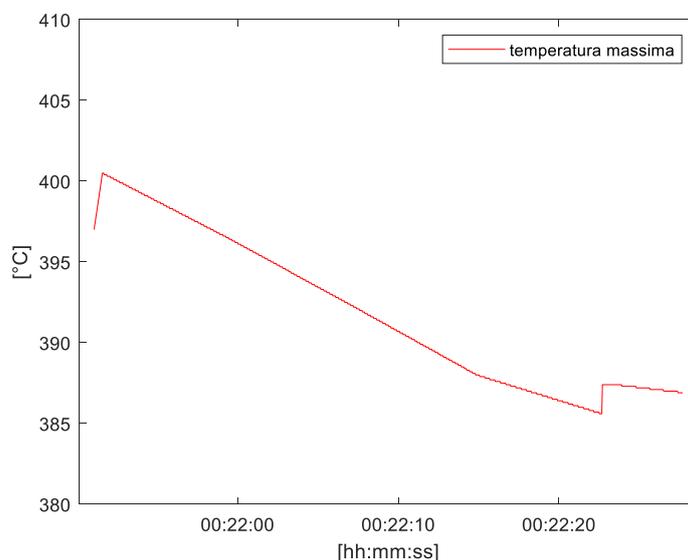


Figura 64 - andamento temperature alla seconda apertura - ottenuto con termocamera

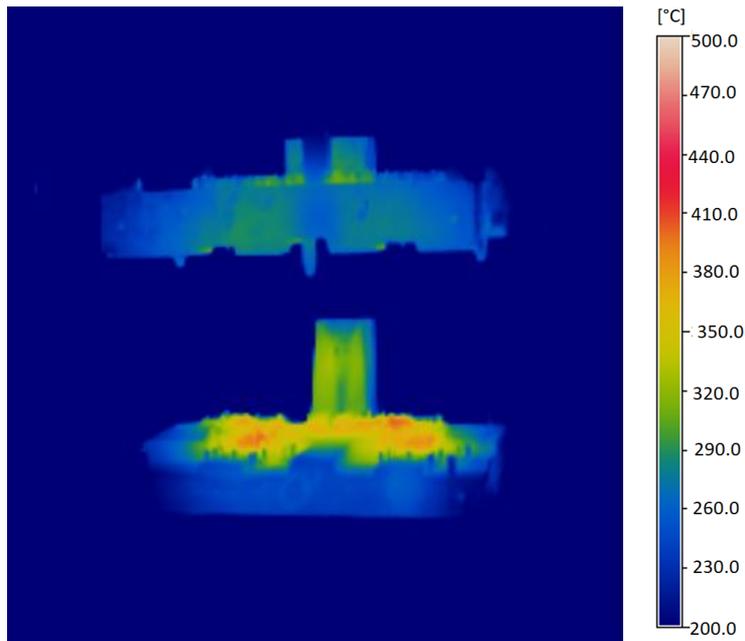


Figura 65 - fotogramma IR dopo la seconda colata

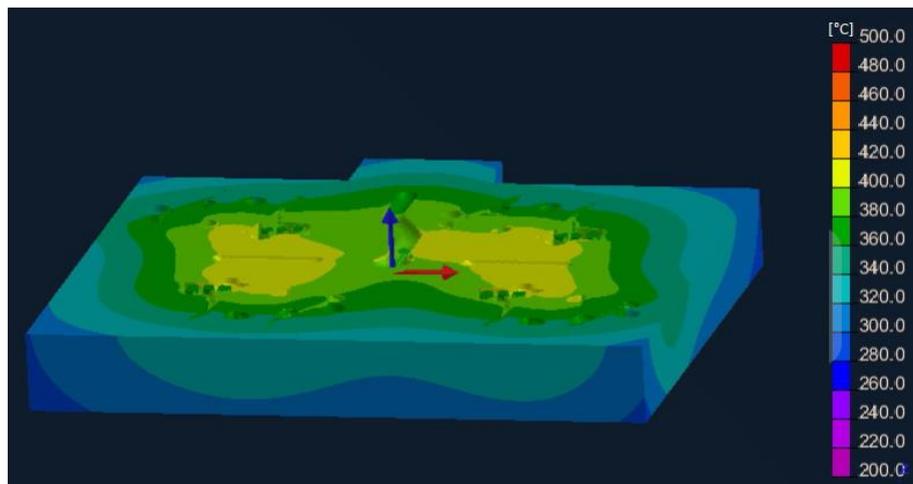


Figura 66 - conchiglia interna - simulazione dopo due cicli di lavoro

Mostrare tutti e dieci i cicli sarebbe ripetitivo, viene mostrato, quindi, l'andamento dell'ultimo ciclo. In Figura 67 viene mostrato l'andamento della temperatura della parte interna della conchiglia inferiore durante la decima apertura, concluso il decimo ciclo di lavoro: la temperatura massima si trova intorno ai 460°C. In Figura 68 si può vedere un fotogramma IR del momento successivo al quale è stato estratto il getto. Le temperature ottenute con la simulazione sono visibili in Figura 69 e restituiscono una temperatura massima di circa 470°C. Anche concluso l'ultimo ciclo, quindi, c'è un buon riscontro tra realtà e simulazione.

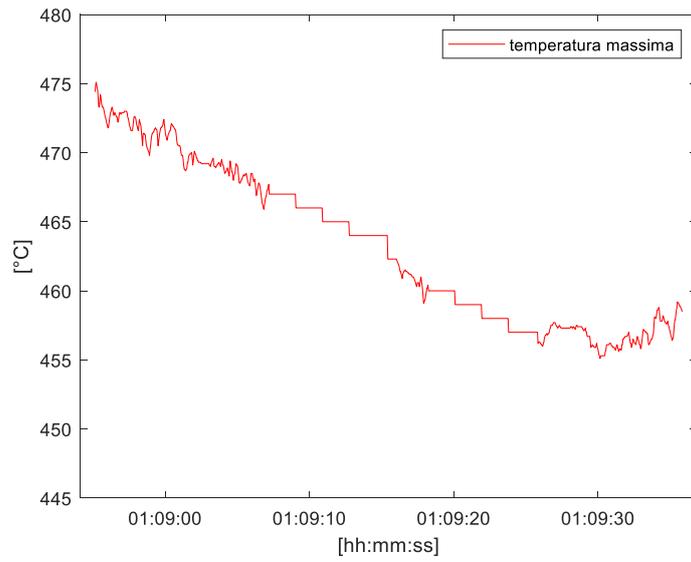


Figura 67 - andamento temperatura alla decima apertura - ottenuto con termocamera

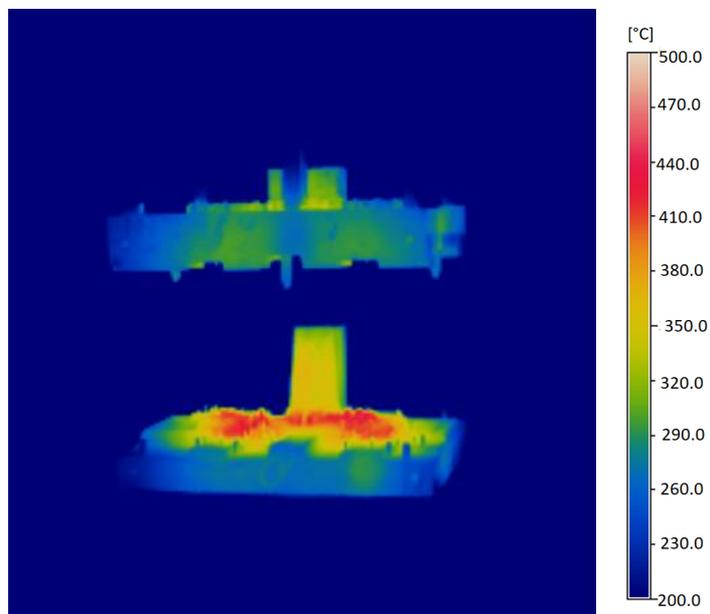


Figura 68 - fotogramma IR dopo la decima colata

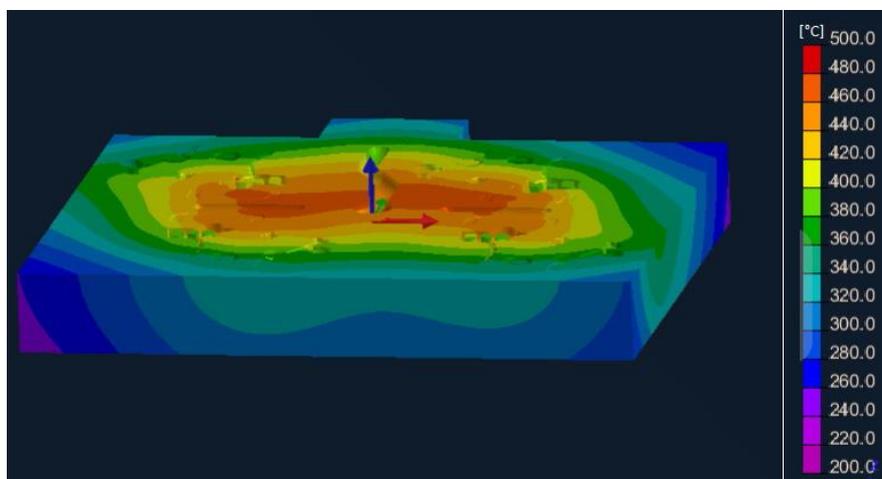


Figura 69 - conchiglia interna - simulazione dopo 10 cicli

Viene mostrato nel grafico in Figura 70 un confronto delle temperature massime dal primo all'ultimo ciclo. I valori non sono precisi per vari motivi, in particolare i tempi ciclo diversi che avvengono realmente e i tempi costanti della simulazione.

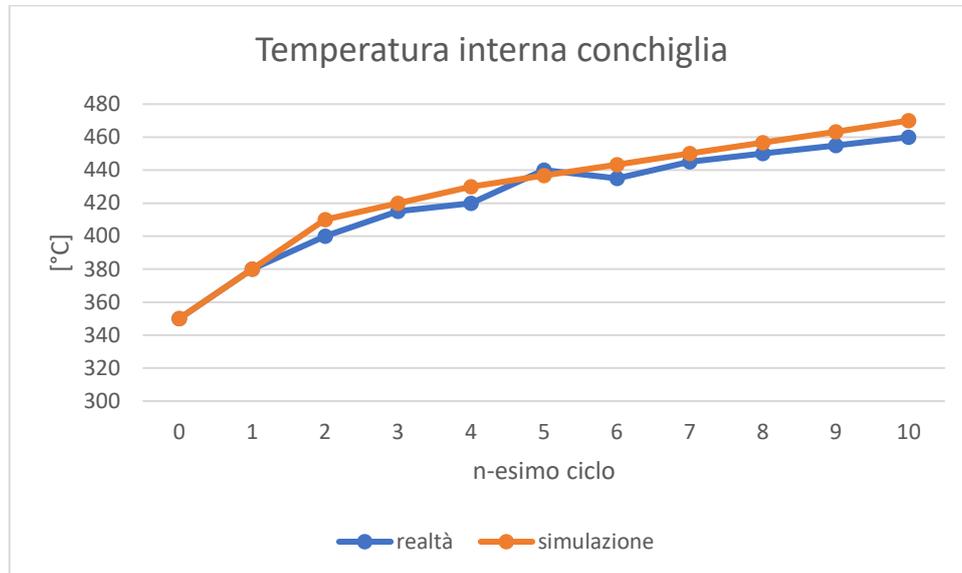


Figura 70 - confronto tra transitorio termico nella realtà e nella simulazione – interno della conchiglia

Dai risultati è chiaro che dieci cicli di lavoro non sono sufficienti per raggiungere l'equilibrio termico in quanto la conchiglia continua a scaldarsi, anche se, dopo un primo aumento rapido per i primi due cicli, poi l'andamento della temperatura cresce linearmente: circa 6,5°C/ciclo nel caso della simulazione e circa 5°C/ciclo nel caso reale. Questa differenza di gradiente e il fatto che la temperatura reale sia minore rispetto a quella simulata, sono indici del fatto che il tempo ciclo nel caso reale è variabile e, in genere, maggiore rispetto a quello usato per la simulazione. Ciò è dovuto all'imprevedibilità seguente alla dipendenza dall'operatore; nonostante ciò, i risultati ottenuti sono sufficienti per dire che la simulazione ricrei in modo abbastanza affidabile il transitorio termico.

Dopo aver mostrato i risultati dell'analisi termica, si vuole fare una breve considerazione sull'utilizzo dello stampo monoblocco piuttosto che delle due mezze conchiglie. Come già spiegato nel capitolo 5.3, i risultati ottenuti utilizzando una conchiglia monoblocco o due mezze forme si equivalgono; tuttavia, ciò è vero nel caso in cui si voglia osservare solamente il getto, mentre l'interfaccia tra le due mezze conchiglie non è ben definito. È, però, importante notare che il confronto tra simulazione e stampo reale viene effettuato andando ad osservare la temperatura interna massima, la quale si ottiene in corrispondenza della cavità e questa è simulata correttamente dal punto di vista delle varie aperture e dei coefficienti di scambio termico. Perciò, per questo motivo e per il fatto che la temperatura nei due casi osservati aumenti con gradiente termico simile, si ha validazione della simulazione per quanto riguarda l'analisi termica.

6.2 Analisi microscopica del supporto motore

La lega di cui è costituito il supporto motore è la lega Al Si7Mg0.3 (anche detta EN AB-42100) che viene modificata con stronzio (Sr) e affinata con titanio (Ti). La presenza di Mg è dovuta alla necessità di dover trattare termicamente i componenti, questi, infatti, vengono solubilizzati, temprati e invecchiati artificialmente per aumentare la durezza. I valori limite degli elementi al suo interno, secondo normativa ISO 3522, sono quelli mostrati in Tabella 4. I limiti sono i massimi valori ammissibili, tranne quando è presente un intervallo; i valori nelle parentesi tonde sono per diversi tipi di colata.

Tabella 4 - limiti per la lega Al Si7Mg0.3 secondo normativa ISO 3522

	Composizione chimica, % (massa)													
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Elementi di modifica (Sr, Na, Sb e P)		Al
												ognuno	tot	
Al Si7Mg0.3	6.5-7.5	0.19 (0.15)	0.05 (0.03)	0.10	0.25-0.45 (0.30-0.45)	-	-	0.07	-	-	0.08-0.25 (0.10-0.18)	0.03	0.10	rimanente

Per poter analizzare il particolare è stato necessario, come prima cosa, sezionarlo in modo da avere dei campioni abbastanza piccoli da poter ispezionare al microscopio ottico. In particolare, si è deciso di analizzare le parti più significative del pezzo: la parte massiccia (più vicina all'entrata del getto e alle materozze), la parte sottile e la borchia centrale, come mostrato in Figura 71, per vedere in che modo e in che direzione solidifica il pezzo.

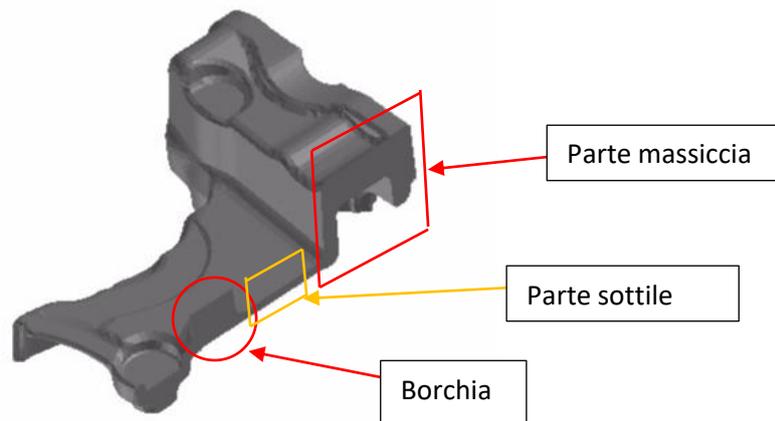


Figura 71 - supporto motore sezionato in cui vengono indicate le zone utilizzate per l'analisi microscopica e macroscopica

È stata usata una troncattrice per tagliare un pezzo, sezionandolo inizialmente a metà (come in Figura 71) e poi tagliandolo ulteriormente per ottenere i tre campioni nelle figure dalla Figura 72 alla Figura 74.



Figura 72 - provino 1: borchia – dimensioni 25x25mm



Figura 74 - provino 3: parte sottile – dimensioni 35x5mm



Figura 73 - provino 2: parte massiccia – dimensioni 35x65mm

È stato poi necessario effettuare levigatura e lucidatura dei provini (di cui viene mostrata una schematizzazione in Figura 75). La levigatura ha lo scopo di eliminare le alterazioni strutturali subite dal metallo durante il taglio e conferire alla superficie una certa planarità; viene realizzata con carte abrasive e acqua come lubrificante. La lucidatura serve a eliminare le irregolarità superficiali e ottenere superfici a specchio che consentano l'analisi al microscopio; viene eseguita meccanicamente tramite panni abrasivi e lubrificante (acqua).



Figura 75 - schematizzazione del processo di levigatura e lucidatura

Concluse queste operazioni, i campioni presentano una superficie a specchio e possono essere osservati al microscopio (dalla Figura 76 alla Figura 78)

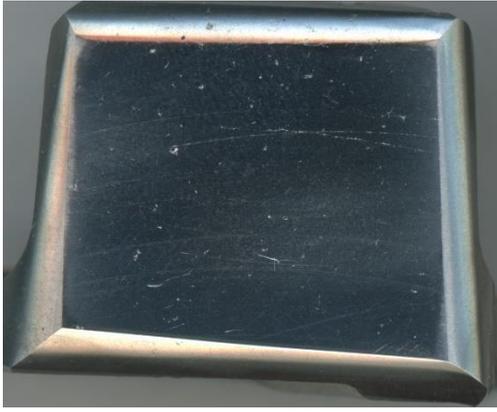


Figura 76 - campione lucidato - borchia



Figura 78 - campione 3 - zona sottile



Figura 77 - campione 2 - zona massiccia

Il microscopio utilizzato è di tipo ottico e permette di osservare le dendriti di alluminio, il silicio e gli altri elementi, come viene mostrato nelle figure seguenti. Nella Figura 79 viene mostrata ad un basso ingrandimento la microstruttura in corrispondenza della borchia; è possibile distinguere le dendriti (bianche) e gli altri elementi, principalmente silicio (più scuri).

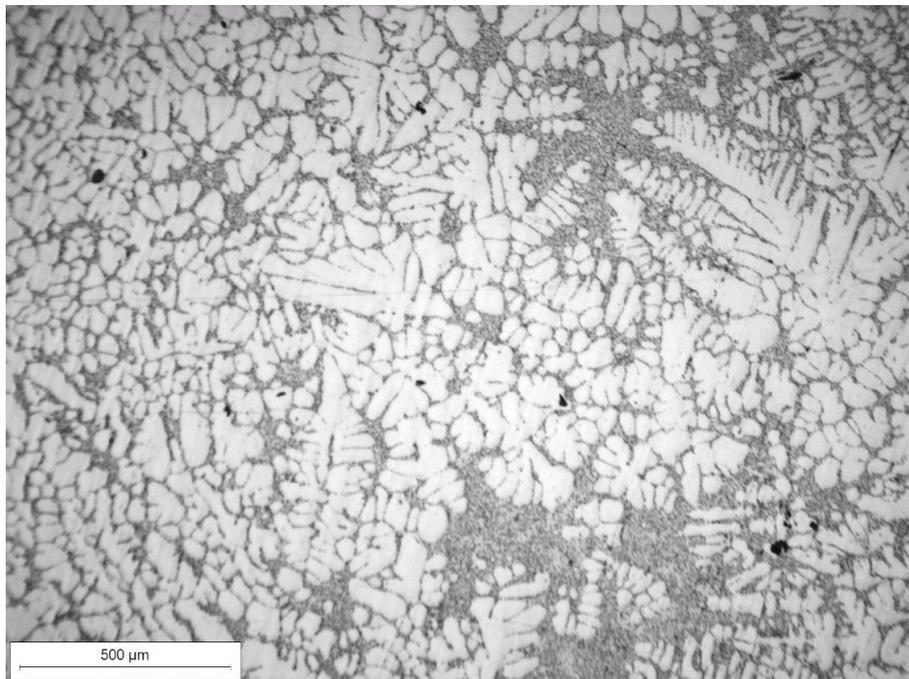


Figura 79 – borchia lucidata - ingrandimento 5x1

Nella Figura 80 viene mostrato un ritiro in corrispondenza della parte sottile ottenuto con ingrandimento 20x1, mentre nella Figura 81 viene mostrato un ingrandimento maggiore (50x1) della stessa sezione, in cui viene messo in evidenza il difetto e di come segua i rami delle dendriti.

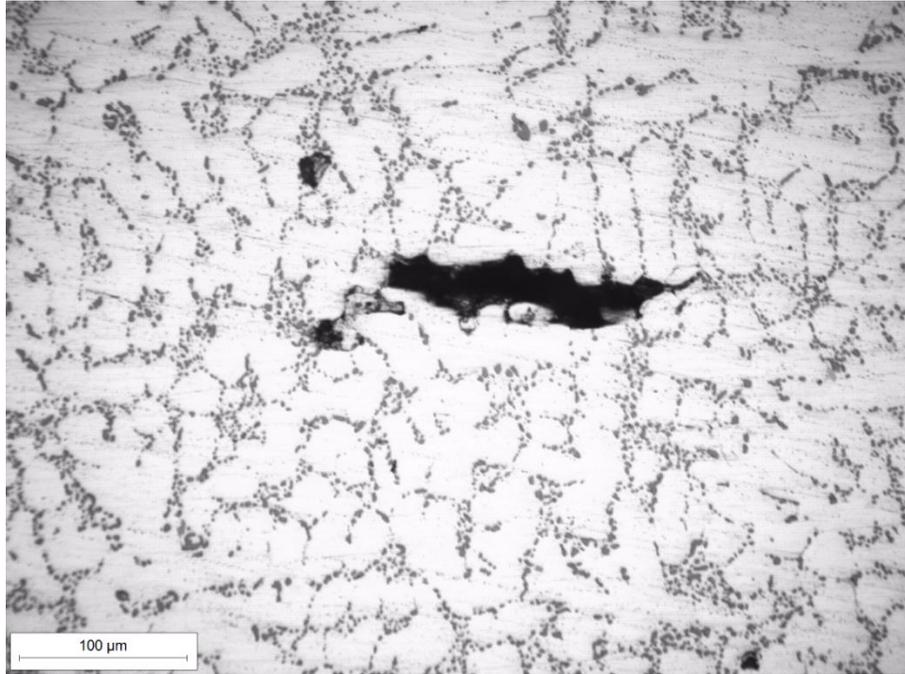


Figura 80 - parte sottile lucidata - ingrandimento 20x1

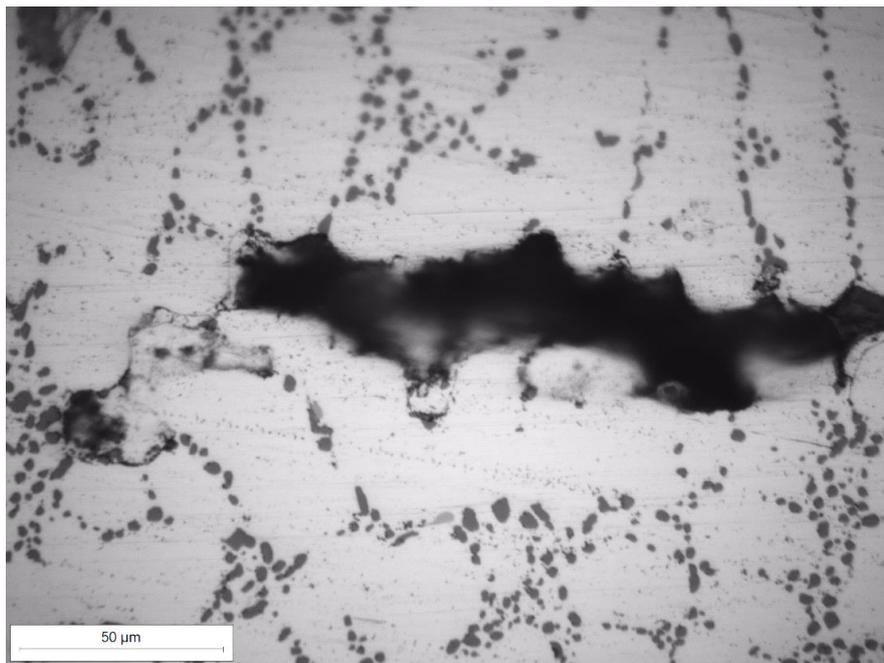


Figura 81 - parte sottile lucidata - ingrandimento 50x1

Osservando un ingrandimento effettuato in corrispondenza della parte massiccia del componente (Figura 82), si vuole mettere in evidenza, invece, la differenza tra i cristalli di alluminio, bianchi, presenti principalmente sotto forma di dendriti, le particelle di silicio (molto scuro, la cui forma tondeggiante è data dagli elementi aggiunti per effettuare la modifica) e altre particelle allungate (in grigio, che potrebbero essere Al_3Fe o Mg_2Si). Sono presenti, inoltre, zone interdendritiche formate dall'unione di cristalli di alluminio più piccoli delle dendriti insieme al silicio.

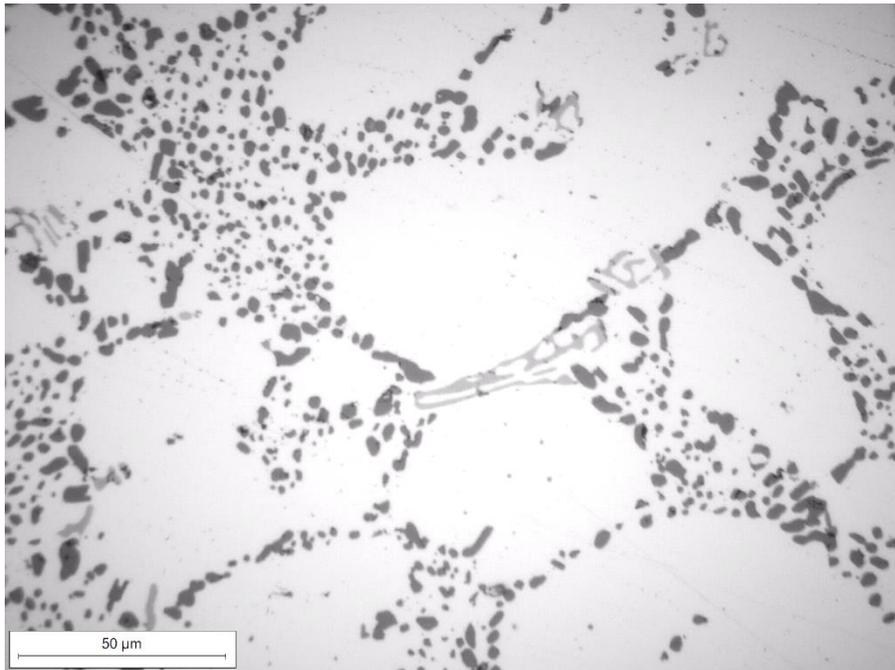


Figura 82 - parte massiccia lucidata - ingrandimento 50x1

A questo punto è stato possibile, quindi, osservare le dendriti e misurarne la lunghezza, in modo da calcolarne lo SDAS (secondary dendrite arm space – distanza interdendritica). La distanza interdendritica è definita come la distanza tra i bracci adiacenti della dendrite ed è utilizzata come parametro per descrivere la struttura metallurgica dei getti. Infatti, i getti con microstruttura più fine hanno migliori proprietà a trazione e fatica e questo miglioramento è legato ad un basso valore di SDAS. Più è minore il valore di SDAS e più è minore la dimensione dei difetti che compaiono con la solidificazione. La dimensione delle dendriti è condizionata dalla composizione della lega, dalla fase di colata e dalla velocità di trasferimento del calore dello stampo durante la solidificazione. (21)

Dai campioni reali lo SDAS viene calcolato andando a misurare diverse lunghezze delle dendriti e andandole a dividere per il numero di bracci presenti nella zona selezionata. Per quanto riguarda la simulazione, invece, il software *ProCAST* calcola la distanza interdendritica come: $(M * t_{sol})^{1/3}$, dove M è un coefficiente dipendente dalle caratteristiche del materiale (pari a 680 per la lega AlSi7Mg0.3) e t_{sol} è la temperatura di solidificazione locale.

In Figura 83 vengono messe in evidenza le due zone utilizzate per il calcolo della distanza interdendritica per quanto riguarda il campione più massiccio. Nella zona B (Figura 84), in corrispondenza della parte più sottile del campione, lo SDAS calcolato è pari a 29.6 μm , mentre nella zona A (Figura 85Figura 83), in corrispondenza della zona più spessa, si trova un valore medio pari a 36.25 μm .

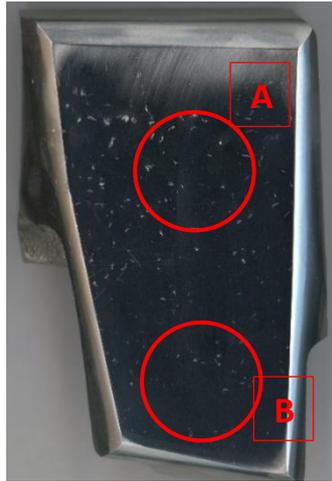


Figura 83 - zone del provino massiccio che vengono osservate al microscopio

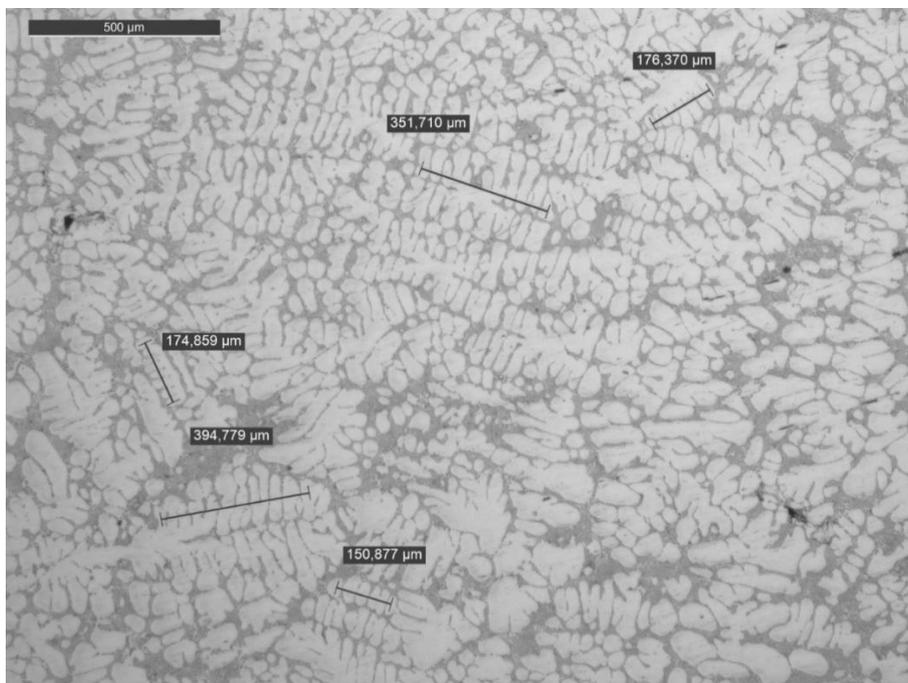


Figura 84 - microstruttura della zona massiccia in corrispondenza della parte più sottile (B) – ingrandimento 5x1

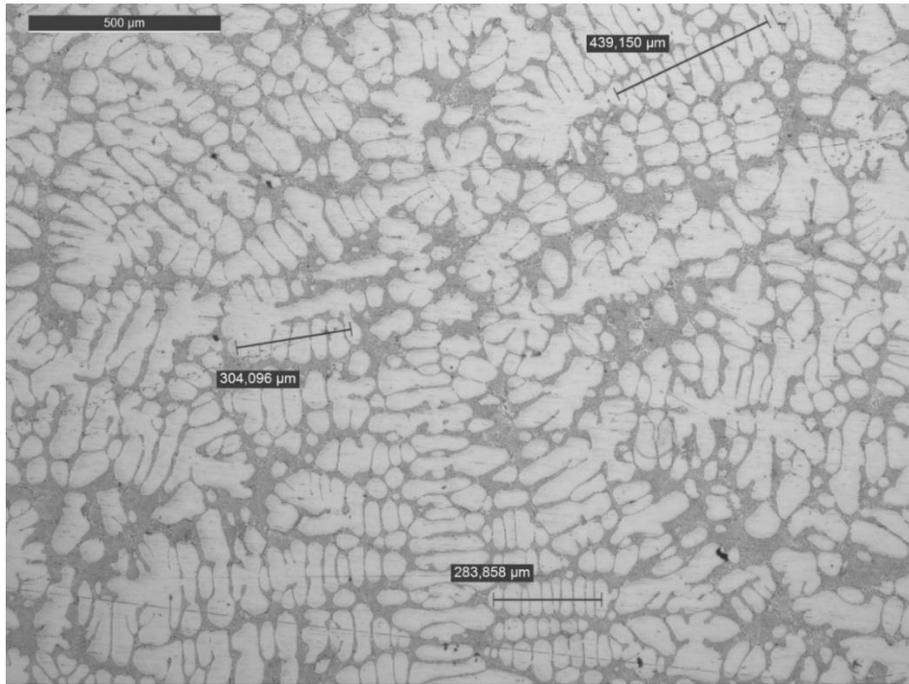


Figura 85 - microstruttura della zona massiccia in corrispondenza della parte più spessa (A) – ingrandimento 5x1

Spostando l'attenzione sul campione più sottile (Figura 86), invece, si calcola una distanza interdendritica media pari a 22.29 μm. Basta confrontare la Figura 85 (immagine presa in corrispondenza della zona massiccia) con la Figura 86 (presa in corrispondenza della parte sottile) per vedere come cambi la microstruttura e come le dendriti siano molto più piccole.

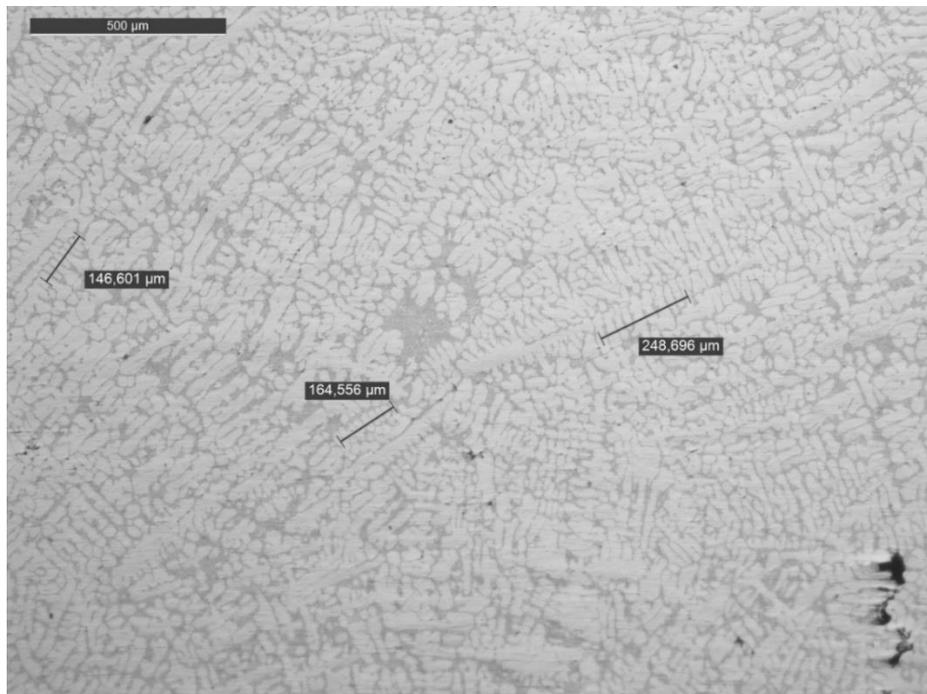


Figura 86 - microstruttura della zona sottile – ingrandimento 5x1

Andando ad osservare la zona in corrispondenza della borchia, si calcola uno SDAS pari a 27.46 μm (Figura 87), intermedio, quindi, a quelli calcolati nelle altre due zone.

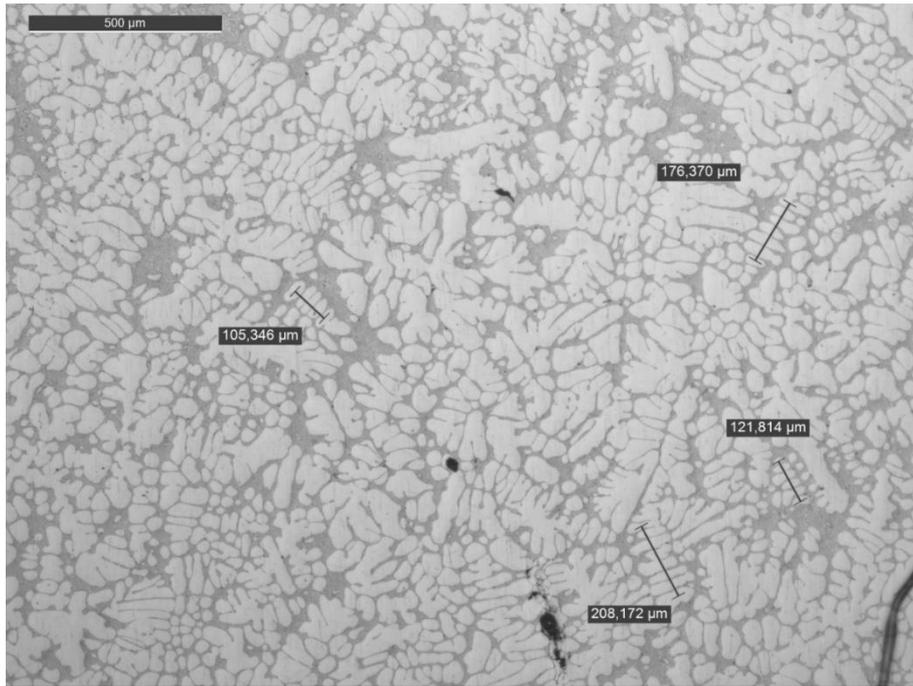


Figura 87 - microstruttura in corrispondenza della borchia – ingrandimento 5x1

Per confrontare questi risultati con ciò che si è ottenuto dalla simulazione, è importante dire che il supporto motore utilizzato per questa analisi microscopica è stato scelto in modo casuale; quindi, potrebbe essere stato prodotto a inizio turno (con conchiglia più fredda) o a fine turno (con conchiglia riscaldata). Questa premessa è fondamentale perché lo SDAS varia tra un ciclo e quello successivo. Perciò, prima di effettuare il confronto tra i campioni reali e la simulazione, è necessario mostrare i risultati ottenuti dalle due simulazioni effettuate in momenti diversi: la prima riguarda il primo ciclo simulato, in cui la conchiglia ha una temperatura costante pari a 350°C, mentre la seconda si riferisce alla simulazione effettuata alla fine dei dieci cicli in cui è stato calcolato il transitorio termico e corrisponde, quindi, all'undicesimo getto prodotto. I risultati delle simulazioni vengono mostrati nelle immagini seguenti (dalla Figura 88 alla Figura 91); la scala è uguale per tutti e parte da 0 μm fino a 58.15 μm, i colori danno subito una indicazione riguardante la dimensione dello SDAS, nella Tabella 5 viene mostrato un confronto finale tra le due simulazioni e i provini osservati al microscopio.

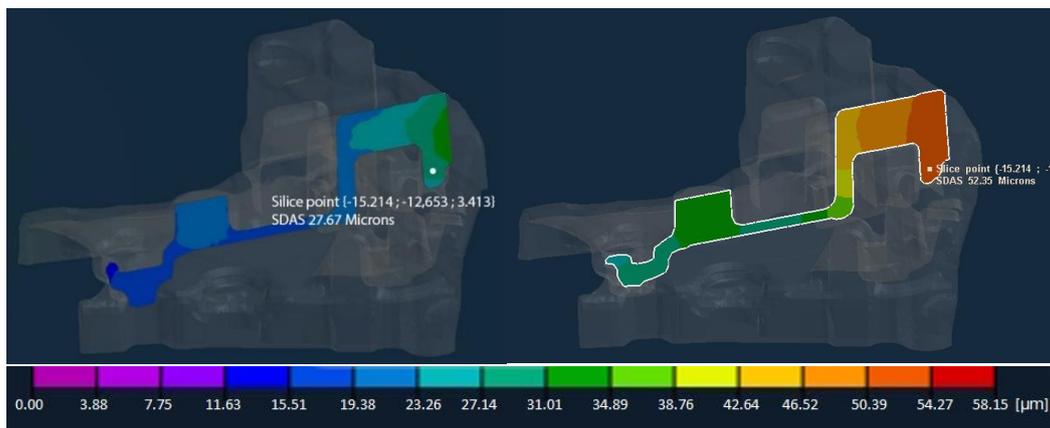


Figura 88 - SDAS calcolato con software ProCAST in corrispondenza della parte sottile della zona massiccia (B) – simulazione effettuata al primo ciclo di lavoro (sinistra) e dopo il decimo ciclo (a destra)

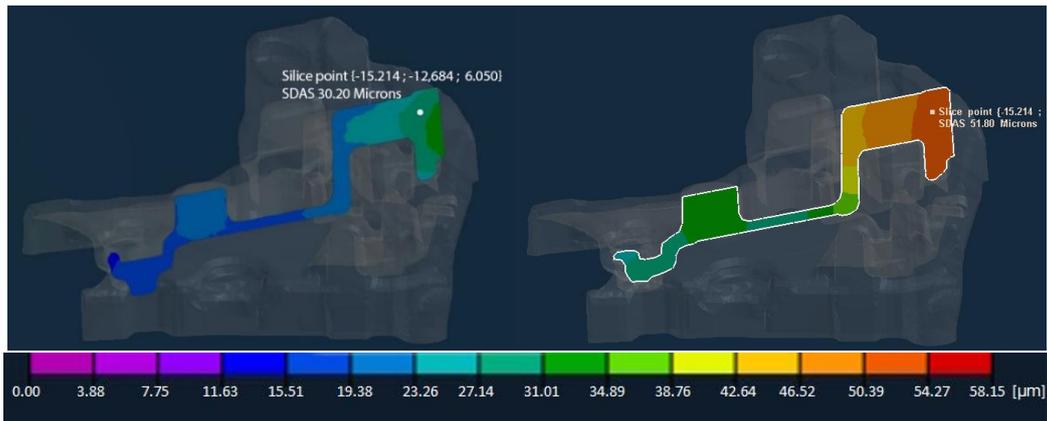


Figura 89 - SDAS calcolato dal software ProCAST in corrispondenza della parte spessa della zona massiccia (A) – simulazione effettuata al primo ciclo di lavoro (sinistra) e dopo il decimo ciclo (a destra)

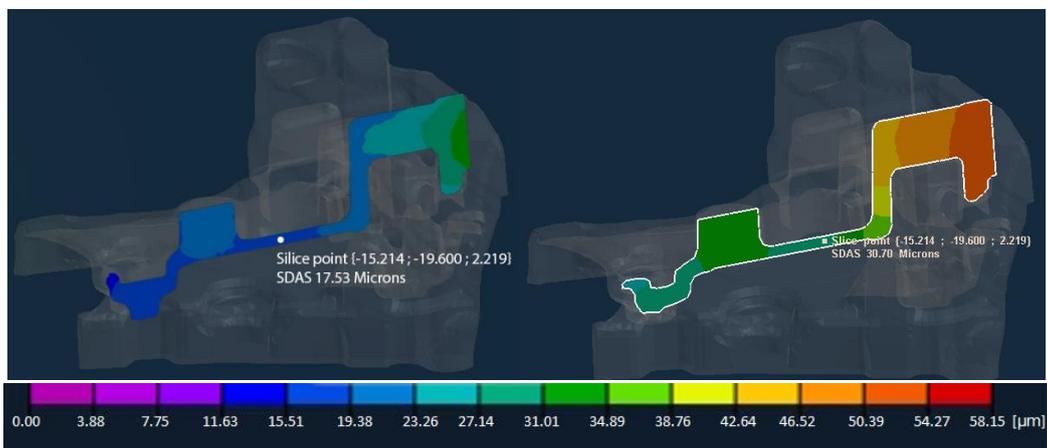


Figura 90 - SDAS calcolato dal software ProCAST in corrispondenza della parte sottile – simulazione effettuata al primo ciclo di lavoro (sinistra) e dopo il decimo ciclo (a destra)

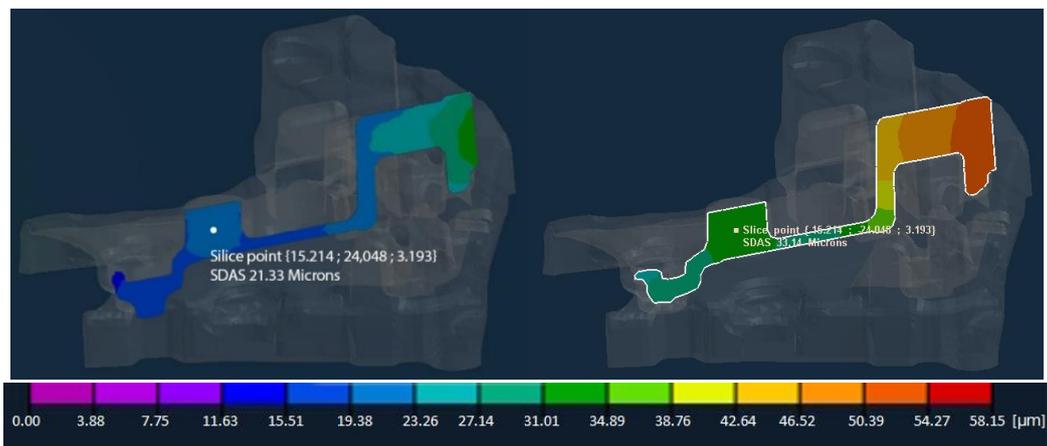


Figura 91 - SDAS calcolato dal software ProCAST in corrispondenza della borchia centrale – simulazione effettuata al primo ciclo di lavoro (sinistra) e dopo il decimo ciclo (a destra)

Nella Tabella 5 si possono osservare i valori di SDAS trovati nelle simulazioni e quelli calcolati osservando al microscopio i tre provini. Innanzitutto, bisogna notare come, secondo la simulazione, ci sia una grande variazione di SDAS nei pezzi prodotti al primo ciclo di lavoro e all'undicesimo; infatti, il componente prodotto dopo dieci cicli ha, mediamente, uno SDAS pari a 1,7 volte quello che si trova nei componenti prodotti con la conchiglia più fredda.

Tabella 5 - confronto SDAS tra le due simulazioni e il pezzo reale

	Simulazione primo ciclo [μm]	Simulazione undicesimo ciclo [μm]	Microscopio pezzo reale [μm]
Massiccio sottile (A)	27.67	52.35	29.64
Massiccio spesso (B)	30.20	51.80	36.25
Zona sottile	17.53	30.70	22.29
Borchia	21.33	33.14	27.46

Prendendo come valori limite i valori di SDAS calcolati nelle due simulazioni, si può vedere come quelli calcolati sul pezzo reale si trovino all'interno di questo intervallo (grafico in Figura 92); è probabile, quindi, che il componente analizzato fosse parte del getto prodotto nei primi dieci cicli.

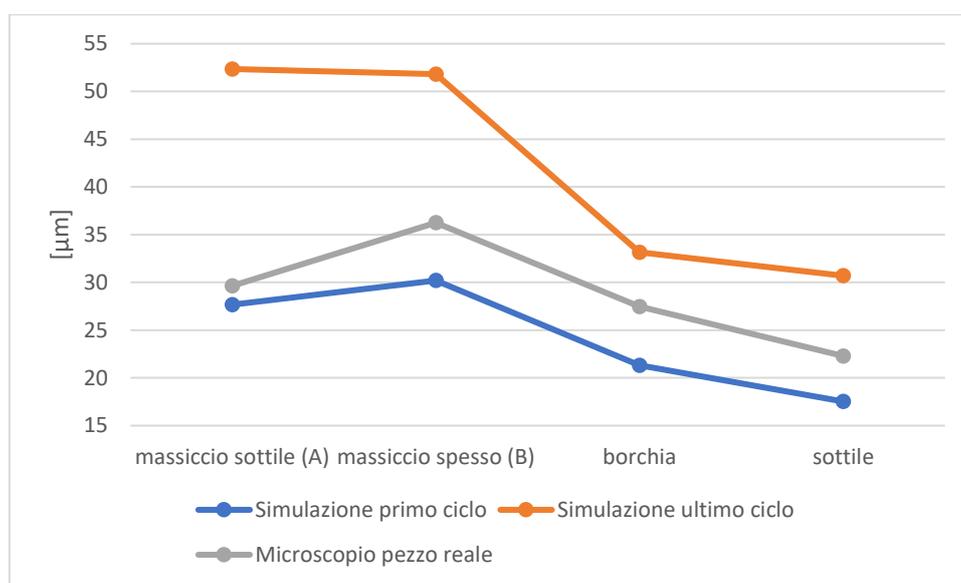


Figura 92 - confronto SDAS tra le simulazioni e il pezzo osservato al microscopio

È importante notare come i valori di SDAS varino notevolmente tra il primo getto e l'undicesimo, con un fattore di scala di 1,7 di media. Come si è visto nel capitolo 6.1 Analisi termica del supporto motore, il tempo ciclo è variabile, ma per effettuare dieci battute è necessaria circa un'ora. I valori appena osservati, perciò, fanno riferimento al primo ciclo e al getto che viene prodotto dopo un'ora di lavoro; ipotizzando 8 ore come turno di lavoro convenzionale, è possibile che tra il primo getto e l'ultimo le caratteristiche del getto siano molto diverse.

6.3 Analisi macroscopica

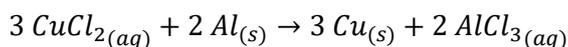
L'esame macroscopico prevede l'attacco chimico del campione da esaminare, questo viene effettuato per fare risaltare la macrostruttura e le eterogeneità.

Per il suo svolgimento è stata seguita la normativa UNI 3251 sull'esame macroscopico dei materiali metallici non ferrosi (22). Questa norma è stata ritirata nel 2008 e non è più in vigore, al suo posto, invece, viene seguita la normativa ASTM E340-15, secondo cui sono possibili diverse modalità per effettuare l'esame macroscopico, ma il metodo utilizzato in questo caso non rientra nella normativa (23). Ciononostante, l'azienda utilizza questo metodo in quanto è un controllo interno e non richiesto da parte dei clienti e, quindi, per analizzare i provini del supporto motore si è seguita questa normativa.

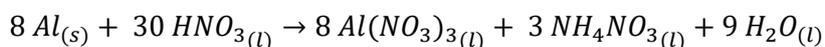
Secondo la normativa UNI 3251 l'attacco chimico può essere eseguito per immersione della superficie nel reagente metallografico oppure per applicazione del reagente sulla stessa mediante ovatta imbevuta. Per le leghe di alluminio-silicio la normativa consiglia l'utilizzo di un reattivo rameico, seguendo alcuni passaggi:

- Immersione/applicazione della soluzione CuCl_2 (20g) e H_2O (80cm^3) per pochi secondi
- Lavaggio in H_2O
- Sbiancatura in HNO_3 concentrato
- Lavaggio in H_2O

Il cloruro rameico CuCl_2 è molto aggressivo con l'alluminio e la reazione genera molto calore; il risultato della reazione è rame metallico (che precipita parzialmente ossidato dall'ossigeno presente in soluzione) e cloruro di alluminio:



L'acido nitrico, invece, serve per mettere in evidenza i composti costituiti di ferro e CuAl_2 . (12) Come risultato della reazione tra acido nitrico e alluminio si ottengono: nitrato di alluminio, nitrato di ammonio e acqua.



I provini dopo l'attacco chimico si presentano come nelle figure seguenti (dalla Figura 93 alla Figura 95). Ad un primo sguardo sembra che il provino con grano più fine sia quello ottenuto dalla borchia, a seguire poi il provino sottile e infine la parte massiccia. In realtà il metodo utilizzato non attacca al meglio i provini; infatti, solo il campione relativo alla parte massiccia mostra in modo chiaro la dimensione dei grani, sia ad occhio nudo che al microscopio, mentre nel caso della borchia e della parte sottile, l'attacco chimico non mette bene in evidenza i grani, ma si riescono a distinguere solo in alcuni punti.



Figura 93 - campione zona sottile - dopo attacco chimico



Figura 95 - campione borchia - dopo attacco chimico



Figura 94 - zona massiccia - dopo attacco chimico

In quanto al provino preso in corrispondenza della parte massiccia, le immagini in Figura 96 mostrano come è visibile ad occhio nudo: si riescono a distinguere i grani cristallini grazie alla differenza di colore da uno all'altro, data dall'inclinazione dei grani. Inoltre, le immagini a e b mettono in evidenza come cambia la dimensione del grano in base alla zona del provino osservata: in Figura 96.a, presa in corrispondenza della parte più sottile, la dimensione del grano è minore, mentre è maggiore in Figura 96.b, zona in cui il provino è più spesso, coerentemente con quanto ottenuto dal calcolo dello SDAS.

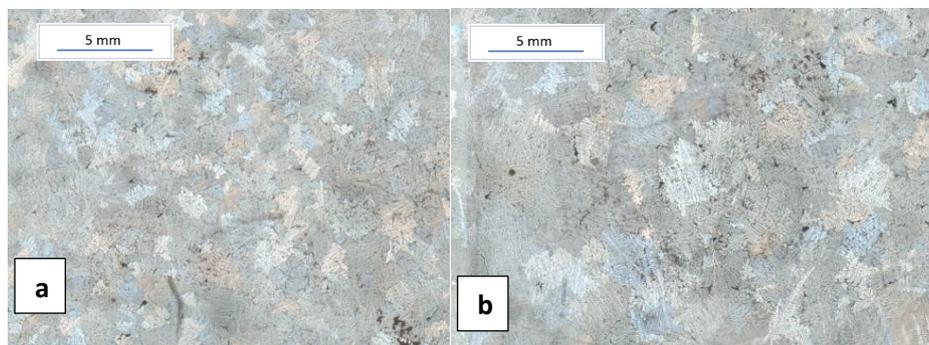


Figura 96 - visuale ad occhio nudo del provino massiccio– (a) zona più sottile, (b) zona più spessa – ottenuto con scanner- scala 2,5:1

Osservando al microscopio ottico una zona del provino preso in corrispondenza della parte massiccia (Figura 97), si possono osservare chiaramente i grani, dati da una colorazione diversa. Si riescono, quindi, a distinguere i grani, le dendriti che li costituiscono e i difetti come i ritiri (Figura 98). Ciò che non si vede più, una volta effettuato l'attacco chimico, sono i vari leganti (ad esempio il silicio), che vengono consumati dal reagente metallografico.



Figura 97 - grano cristallino - zona massiccia dopo attacco chimico – ingrandimento 2x1

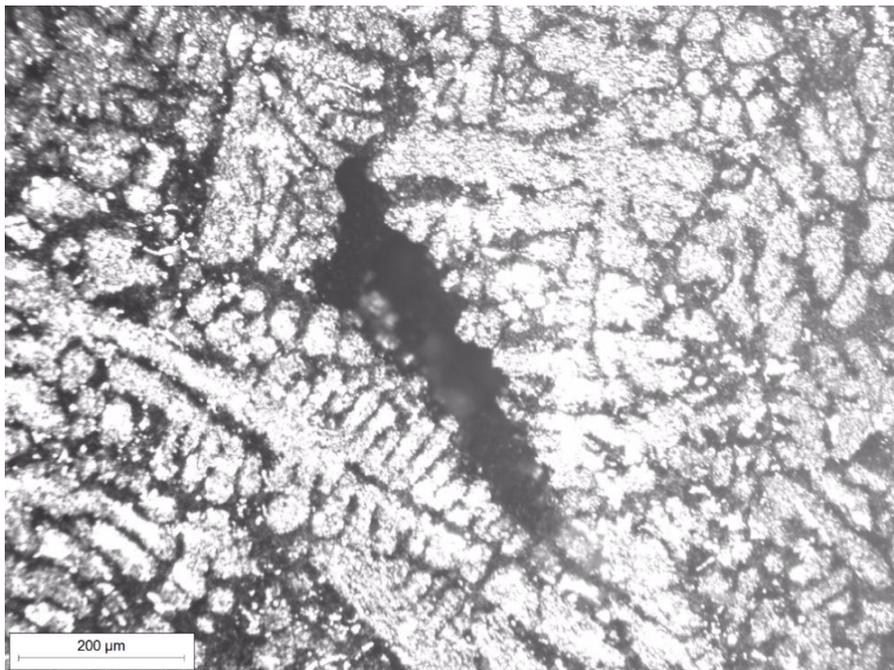


Figura 98 - ritiro su provino parte massiccia dopo attacco chimico – ingrandimento 10x1

Negli altri due provini (borchia e parte sottile) l'attacco chimico non ha agito nel modo corretto ovunque; infatti, sono presenti zone in cui si vede chiaramente l'effetto dell'attacco chimico (Figura 99), ma anche altre in cui i reagenti metallografici non hanno funzionato completamente (Figura 100 e Figura 101), dove si riescono ancora a distinguere le dendriti (bianche) e il silicio tondeggianti (in grigio). La causa può essere imputata ad una lucidatura troppo spinta (i provini sono stati lucidati in vista dell'analisi al microscopio ottico), in alcuni casi, infatti, è consigliabile effettuare una lucidatura grossolana mediante carte abrasive a granulometria decrescente, senza arrivare ad ottenere una superficie a specchio. (12)

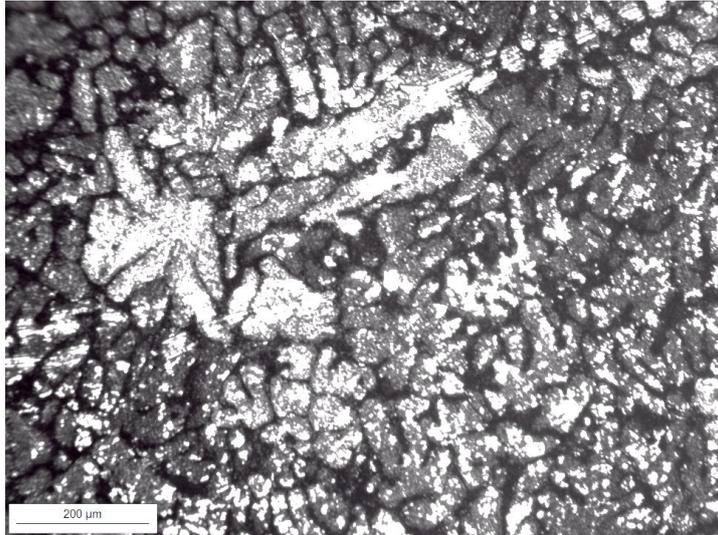


Figura 99 - borchia dopo attacco chimico - ingrandimento 10x1

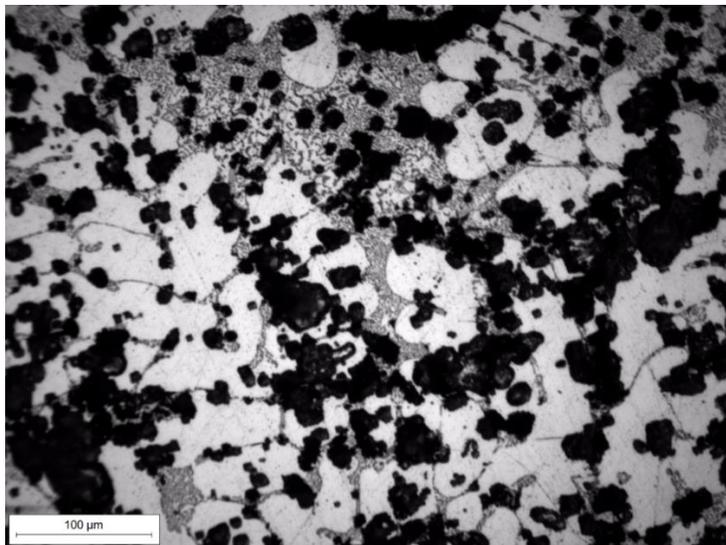


Figura 100 - borchia dopo attacco chimico – attacco chimico non riuscito correttamente – ingrandimento 20x1

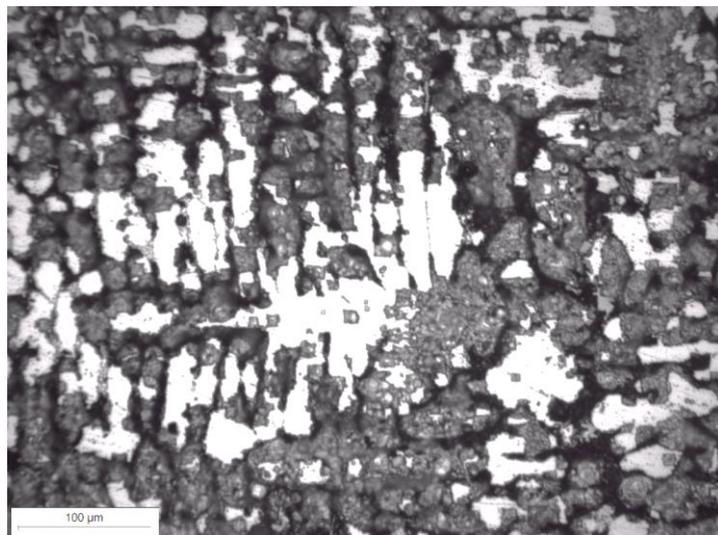


Figura 101 - parte sottile dopo attacco chimico - attacco chimico non riuscito correttamente – ingrandimento 20x1

7 confronto con metodo alternativo

La progettazione delle conchiglie è un fattore fondamentale per la buona riuscita dei componenti. Convenzionalmente, gli stampi hanno una forma esterna squadrata e uno spessore medio di ogni mezza conchiglia maggiore di 100mm. Quello che si vuole analizzare nei capitoli seguenti è come lo spessore della conchiglia influisca sulla qualità dei componenti.

Lo spessore subisce due modifiche: viene diminuito fino a 50mm e viene mantenuto costante intorno al getto. Ciò che si vuole osservare con queste due modifiche è se la solidificazione e il raffreddamento subiscano variazioni e se le caratteristiche del getto cambino. L'utilizzo di una conchiglia più sottile e con uno spessore uniforme attorno al getto potrebbe avere vantaggi e svantaggi. Tra i possibili vantaggi si trovano:

- Raffreddamento più veloce
- Microstruttura più fine
- Conchiglia più leggera
- Deformazioni della conchiglia inferiori

Il raffreddamento veloce permetterebbe di avere un tempo ciclo inferiore, con conseguente aumento di produttività. Inoltre, ne conseguirebbe anche un miglioramento della microstruttura e, quindi, delle caratteristiche meccaniche dei componenti. La maggior leggerezza della conchiglia faciliterebbe le azioni di apertura e chiusura della conchiglia, ma anche il suo montaggio e smontaggio dalla postazione. Infine, le deformazioni inferiori permetterebbero di ridurre il problema della fuoriuscita di metallo e delle bave, di questo problema si è discusso nel capitolo 4.8, per cui è necessario mantenere bene chiuso lo stampo in modo da evitare questi difetti.

Tra i possibili svantaggi, invece, si trovano:

- Rischio che la conchiglia si deformi per via dello spessore ridotto
- Costo maggiore per la realizzazione della conchiglia (che verrebbe però ammortizzato nel tempo)
- Necessità di automatizzare completamente la postazione in modo da eliminare la dipendenza dall'operatore.

Nei capitoli 0 e 7.2 verrà affrontato questo discorso andando ad effettuare delle simulazioni per verificare se ci possano essere questi vantaggi o svantaggi. Le simulazioni sono state effettuate tramite il software ProCAST, prima di iniziare con queste prove, però, viene verificata la validità della simulazione andando ad analizzare un componente attualmente prodotto e simulandolo con il software. In particolare, viene studiato il transitorio termico e la microstruttura del componente per vedere se ci sia corrispondenza tra realtà e simulazione.

7.1 Simulazioni su supporto motore

I risultati vengono ottenuti effettuando le simulazioni sul software ProCAST. Come anticipato nel capitolo 0, ciò che si vuole analizzare è il ruolo dello spessore della conchiglia e di come influisca sulla qualità del getto. Vengono, perciò, analizzati i seguenti parametri al momento dell'estrazione del getto dalla conchiglia:

- Temperature della conchiglia nel tempo (transitorio termico di dieci cicli)
- Tempo di solidificazione
- Frazione solida: percentuale di getto solidificato
- Temperatura del getto
- Porosità del getto: probabilità che in una certa zona siano presenti ritiri

Nella Figura 102 vengono mostrate le due conchiglie: a sinistra la conchiglia simulata precedentemente, che rispecchia la conchiglia reale e ha una forma squadrata e regolare, mentre a destra viene mostrata la conchiglia modificata, con uno spessore inferiore e meno lineare.

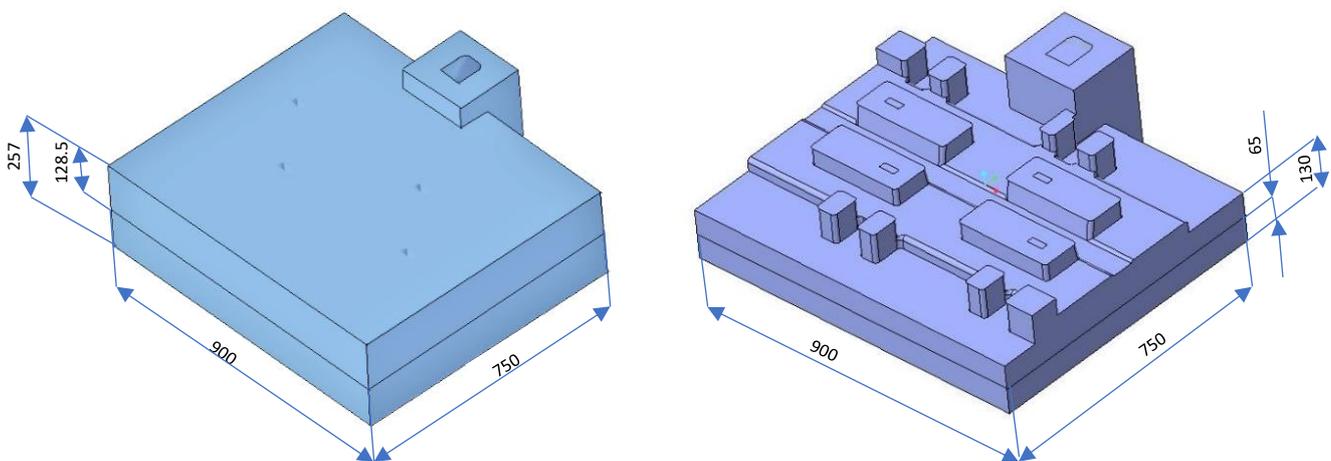


Figura 102 - conchiglia convenzionale (sinistra) e conchiglia alleggerita (destra) – misure in [mm]

Per ottenere la nuova conchiglia si è cercato di ridurre lo spessore e di mantenerlo il più uniforme possibile attorno al getto, mantenendo uno spessore minimo di 50mm. Si vuole vedere se in questo modo il getto solidifichi e si raffreddi uniformemente e più o meno velocemente. Vista la forma complessa del getto e la presenza di materozze in diversi punti, non è possibile ottenere questo spessore uniformemente (come se fosse un offset), perciò, si è semplificata la geometria e si è cercato, ove possibile, di mantenere lo spessore fissato di 50mm attorno al getto. In Figura 103 si può vedere come le materozze obblighino a mantenere un'altezza maggiore, infatti, se non venisse rispettato questo vincolo, questi elementi rischierebbero di solidificare per prime, rendendo inefficace il loro utilizzo.

Nella Figura 104, invece, viene mostrata la conchiglia chiusa da diverse angolazioni.

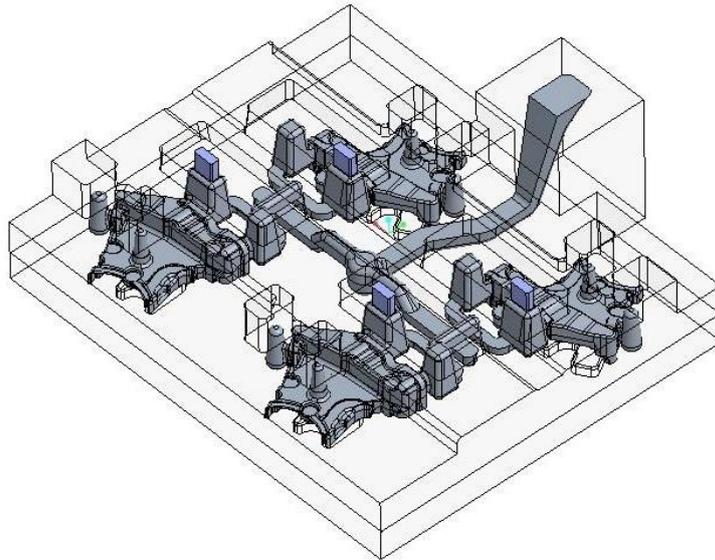


Figura 103 - conchiglia alleggerita vista in trasparenza per mettere in evidenza la posizione delle materozze

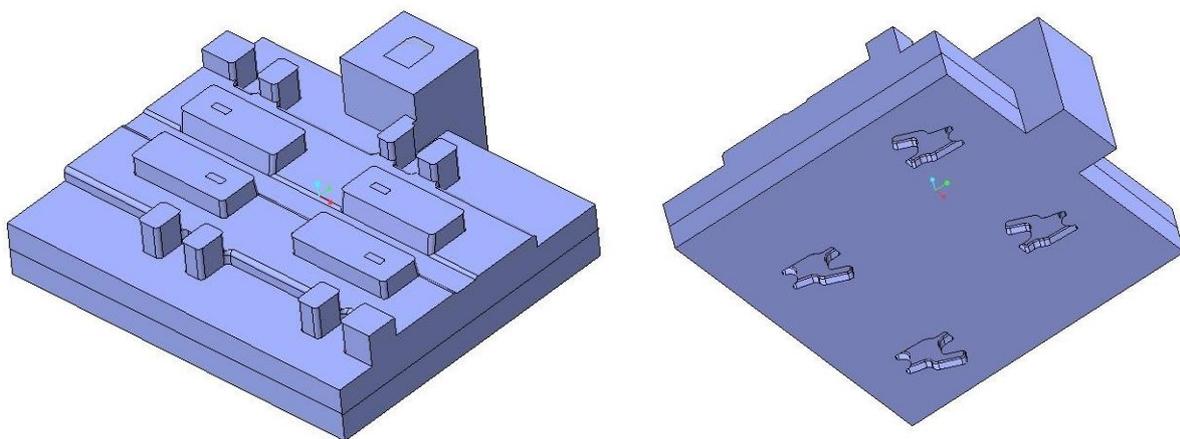


Figura 104 - conchiglia alleggerita vista dall'alto (sinistra) e dal basso (destra)

La simulazione per questa conchiglia modificata è stata impostata con gli stessi parametri utilizzati precedentemente: temperatura iniziale della conchiglia pari a 350°C, stessi tempi ciclo (tempo di apertura, pulizia, ecc...) e numero di cicli pari a dieci.

7.1.1 Confronto temperature

Innanzitutto, viene osservato l'andamento della temperatura nella conchiglia così modificata, internamente ed esternamente. Questi risultati vengono confrontati con quelli ottenuti dalla simulazione eseguita sulla conchiglia reale. Dal grafico in Figura 105 si vede come la temperatura interna aumenti maggiormente nel caso di conchiglia più sottile, ma in realtà, andando a vedere l'andamento dell'aumento di temperatura (grafico in Figura 106) si può vedere come in realtà ci sia un picco di crescita in entrambi i casi all'inizio, dopo i primi due cicli e poi ci sia una crescita lineare di circa 6,7°C per ogni ciclo nel caso di conchiglia più spessa e circa 8°C nel caso di conchiglia più sottile. Anche osservando le isoterme si ritrova corrispondenza e perciò il riscaldamento delle conchiglie avviene con le stesse modalità, in Figura 107 si possono vedere le temperature

alla fine del decimo ciclo per le due conchiglie: la conchiglia reale ha una temperatura massima pari a 470°C, mentre la conchiglia alleggerita arriva a 485°C.

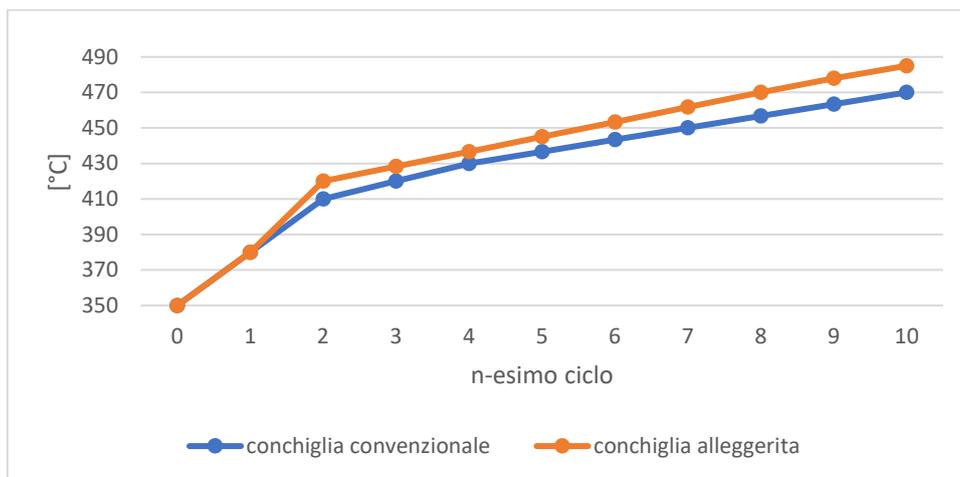


Figura 105 - confronto tra il transitorio termico nelle due simulazioni - temperatura massima interna della conchiglia

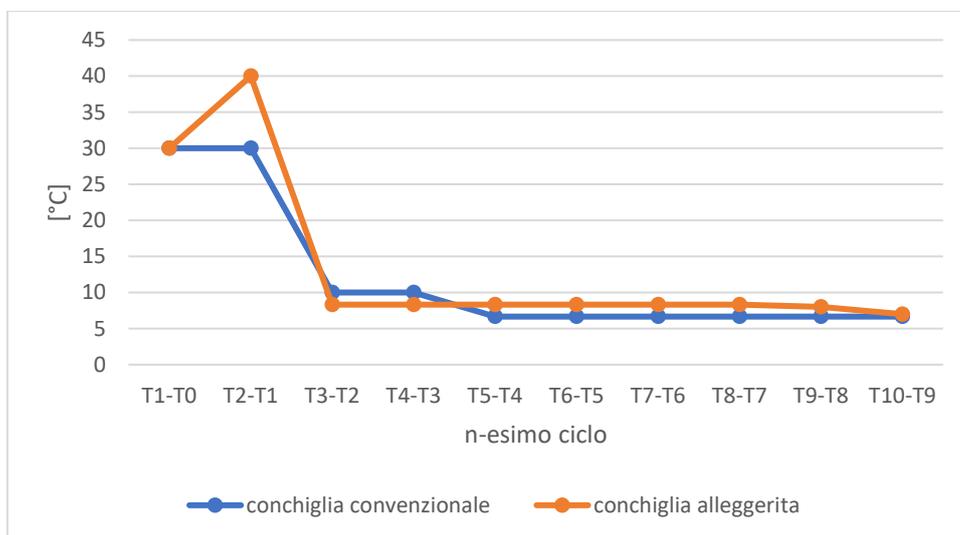


Figura 106 - confronto tra i gradienti di temperatura da un ciclo a quello successivo - temperatura interna della conchiglia delle due simulazioni

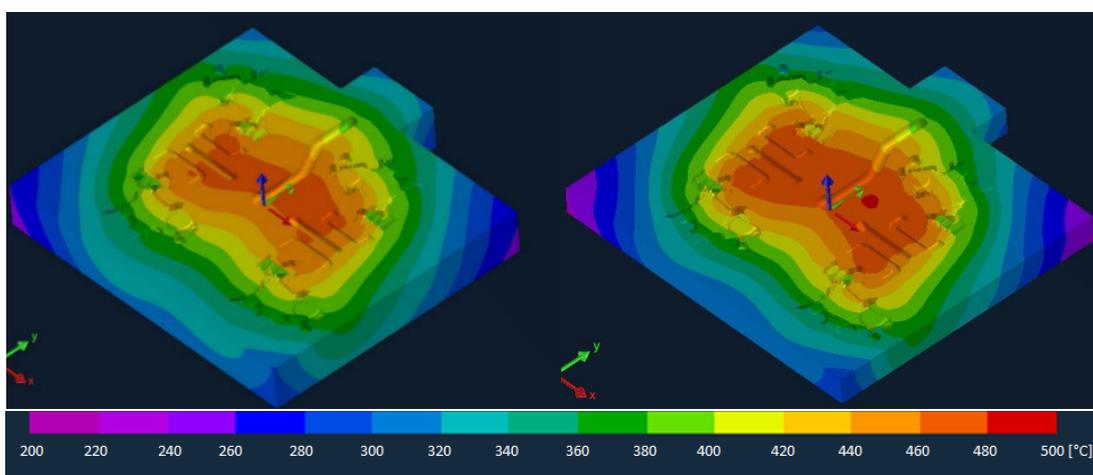


Figura 107 - conchiglia inferiore convenzionale (sinistra) e alleggerita (destra) - temperatura alla fine dei 10 cicli

È interessante vedere anche le temperature nella parte esterna della conchiglia. Nella parte superiore i punti che si potrebbero confrontare sono pochi, complessivamente ne risulta che la conchiglia più sottile rimane più calda nella parte centrale (Figura 108). Si può notare, inoltre, come le isoterme abbiano lo stesso andamento nelle due simulazioni. Si vede, invece, che frontalmente la temperatura risulta leggermente inferiore nel caso della conchiglia sottile, 300°C rispetto ai 320°C della conchiglia reale.

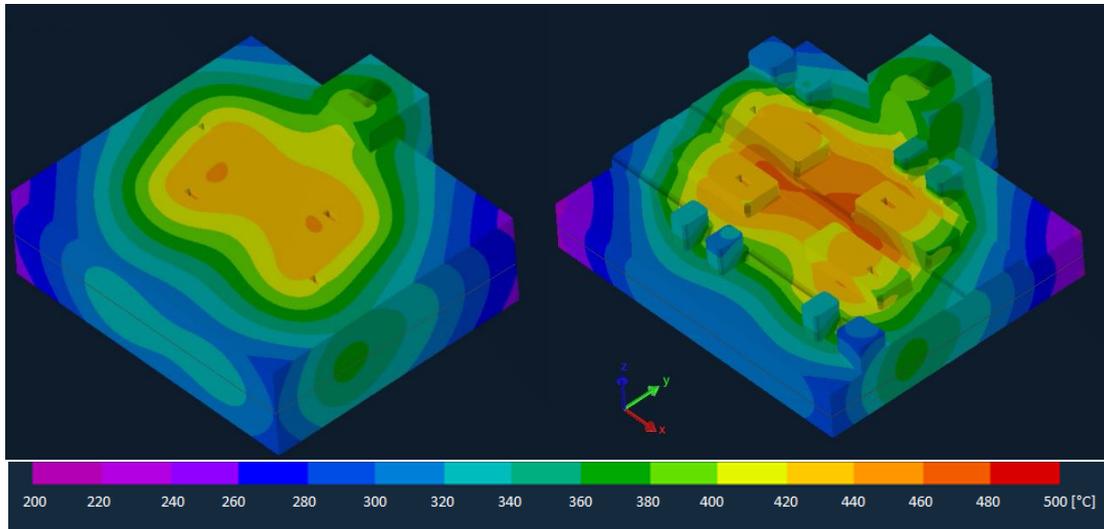


Figura 108 - conchiglia piena convenzionale (sinistra) e alleggerita (destra) – temperatura alla fine dei 10 cicli

7.1.2 Deformazioni della conchiglia

Sarebbe interessante confrontare le deformazioni della conchiglia alleggerita rispetto a quella basata sullo stampo reale. Il minor spessore e la differenza minore di temperatura tra la parte interna e quella esterna della conchiglia potrebbero portare ad avere meno deformazioni nella direzione di apertura della conchiglia. Questo fattore è importante perché una conchiglia ben chiusa permette di evitare il fenomeno delle bave intorno al getto. Questo andamento sarebbe da confrontare tramite software. ProCAST permette di effettuare questo calcolo ma, essendo un pacchetto a parte, non è posseduto dall'azienda e, quindi, non è possibile svolgere con esattezza i calcoli. Tuttavia, osservando le temperature delle conchiglie nelle due simulazioni, è possibile fare qualche considerazione.

Ponendo l'attenzione sulla conchiglia alleggerita (a destra della Figura 109 e della Figura 110) e confrontandola con la conchiglia reale (sulla sinistra nelle medesime immagini), si nota come la temperatura nella parte centrale sia maggiore sia esternamente che internamente, mentre nella zona frontale e ai quattro angoli è leggermente inferiore. Questo andamento delle temperature farebbe pensare, quindi, che con la modifica alla conchiglia, nella direzione di apertura dello stampo possa esserci una dilatazione maggiore nella parte centrale e minore ai bordi.

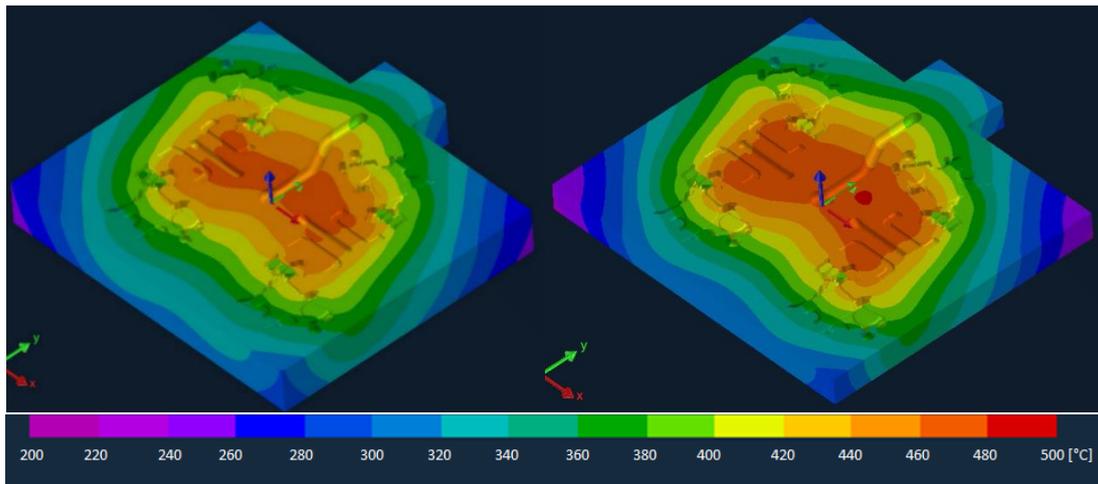


Figura 109 - conchiglia inferiore convenzionale (sinistra) e alleggerita (destra) – temperatura alla fine dei 10 cicli

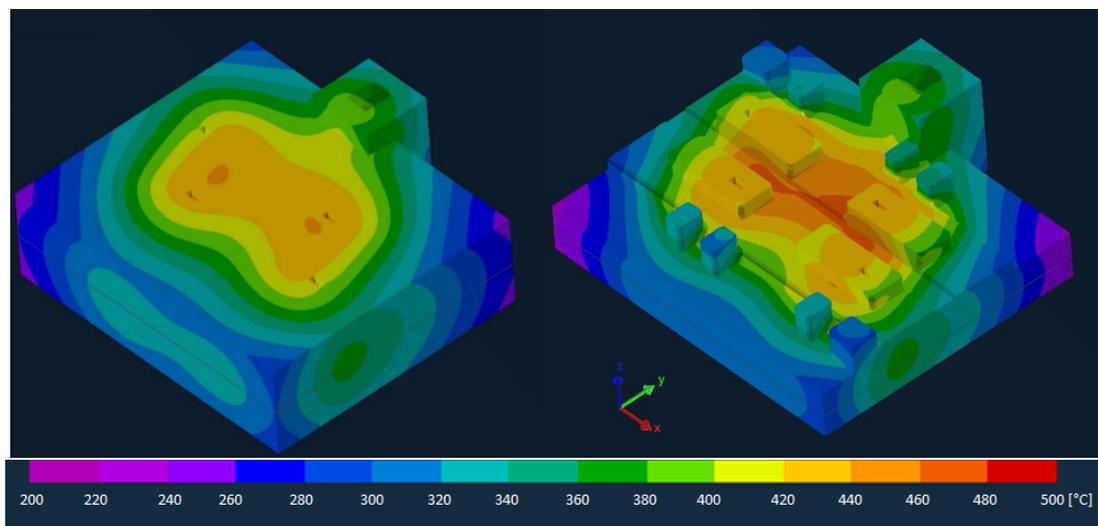


Figura 110 - conchiglia piena convenzionale (sinistra) e alleggerita (destra) – temperatura alla fine dei 10 cicli

7.1.3 Frazione solida

Come anticipato nel capitolo precedente (0), la simulazione della conchiglia più sottile è stata effettuata utilizzando gli stessi dati di partenza dell'altra, quindi, anche il tempo di permanenza nello stampo (per solidificazione e raffreddamento) è lo stesso. Per comprendere se il tempo di solidificazione sia uguale, si osserva la frazione solida in diversi momenti del ciclo di lavoro. La frazione solida può riferirsi ad una zona (nelle figure seguenti queste zone vengono differenziate per colori in base alle zone che hanno la stessa percentuale di solidificazione) oppure a tutto il getto, questo parametro viene fornito dal software man mano che si esegue il ciclo.

Nelle figure seguenti (dalla Figura 111 alla Figura 114), viene mostrato il confronto tra le due simulazioni effettuate con le due conchiglie diverse, mostrando la frazione solida negli istanti di tempo considerati più significativi. Nella figura Figura 111 si vede la percentuale di getto solidificata alla fine del riempimento (dopo 12s), si ottiene che già più dell'1% si è solidificato in entrambi i casi.

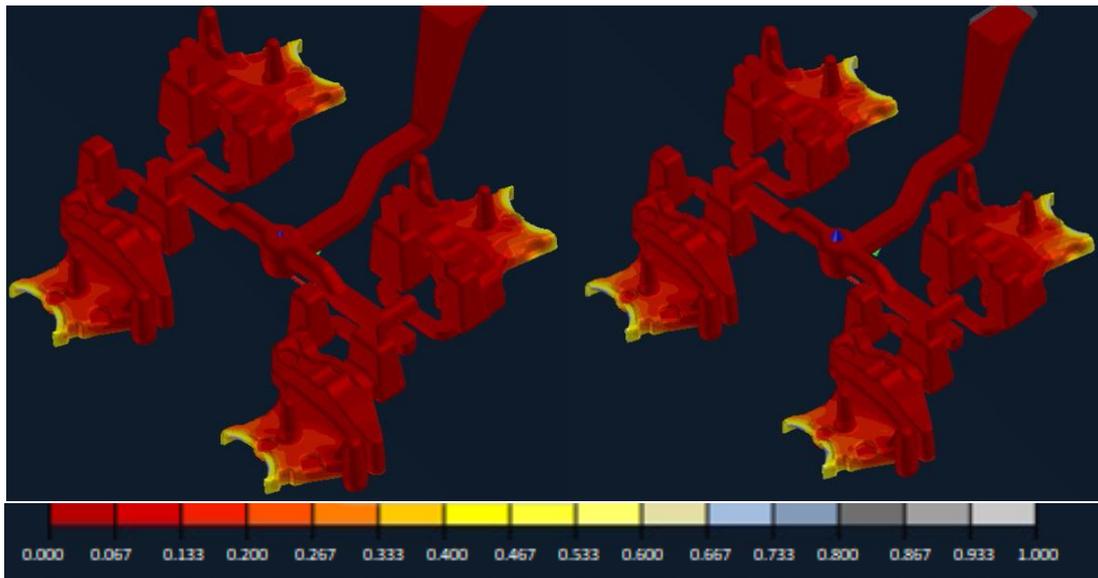


Figura 111 - frazione solida alla fine del riempimento (12s) - conchiglia convenzionale (sinistra) e conchiglia alleggerita (destra)

Nella Figura 112 viene mostrato l'andamento dopo un minuto dall'inizio del ciclo (48s dopo la fine del riempimento e dall'inizio del raffreddamento); in questo istante entrambi i getti raggiungono il 90% di frazione solida nella parte sottile dei componenti. A sinistra, in questo caso è possibile iniziare a notare una differenza, infatti, con la conchiglia basata su quella reale la percentuale di getto solidificato è pari al 30,9%, mentre con la conchiglia modificata il getto ha, nello stesso istante, una frazione solida pari a 30,2%.

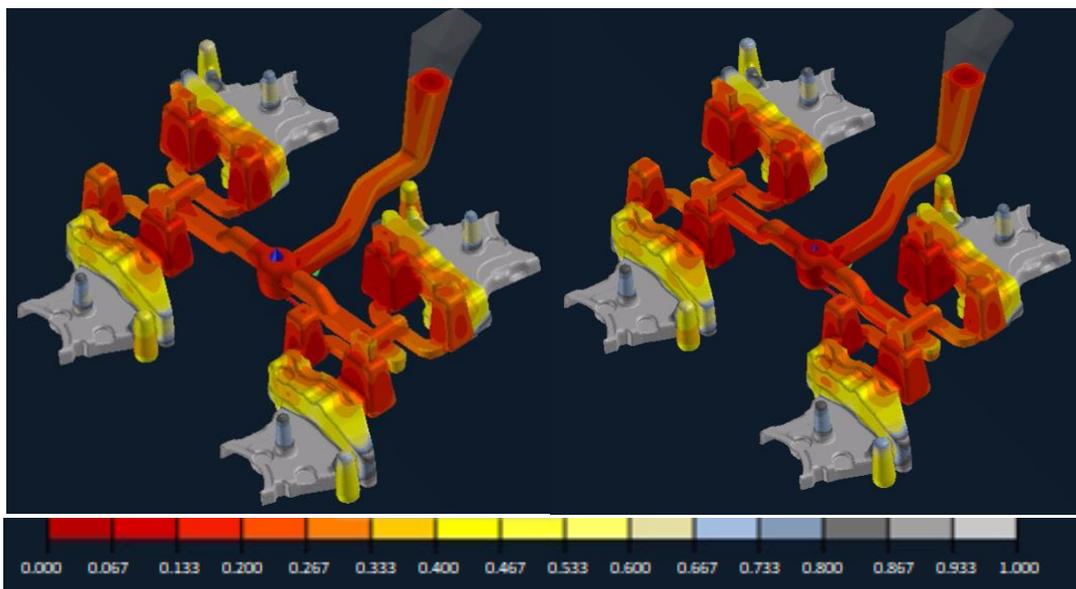


Figura 112 - frazione solida dopo 48s dall'inizio del raffreddamento - conchiglia convenzionale (sinistra) e alleggerita (destra)

Nell'istante in cui si apre lo stampo, dopo 195s dall'inizio del raffreddamento (quindi 212s dall'inizio del ciclo), si è raggiunto il 90% di frazione solida in tutti e quattro i componenti in entrambi i casi e quindi i pezzi hanno completato la loro solidificazione (Figura 113); le materozze posteriori, invece, si trovano ancora ad una percentuale inferiore, ma queste non influiscono la qualità dei pezzi perché dovranno essere eliminate. La frazione solida, in questo istante, è pari all'87,1% nel caso di conchiglia reale e 85,7% nella conchiglia modificata.

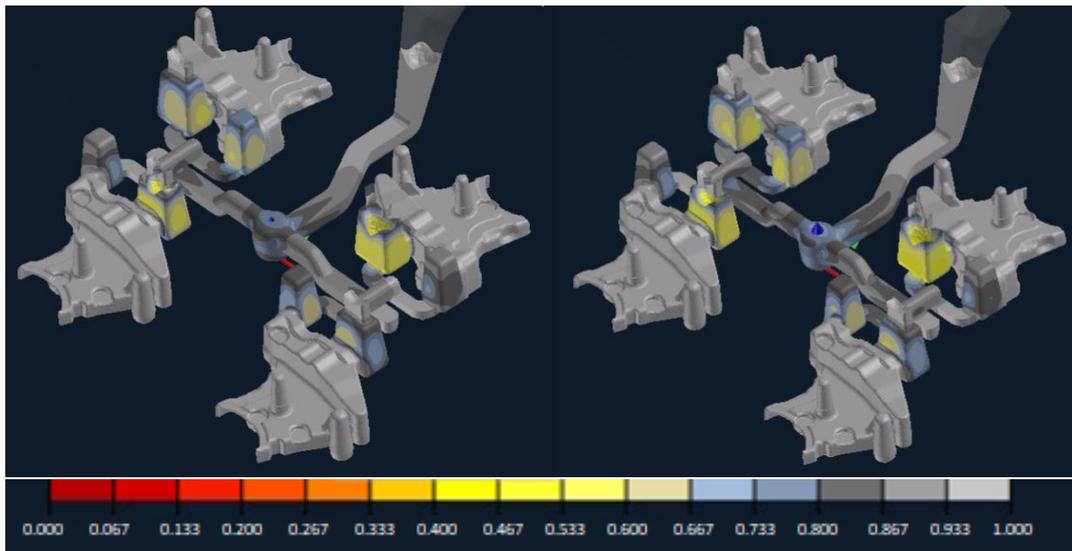


Figura 113 - frazione solida nell'istante in cui si apre lo stampo - conchiglia convenzionale (sinistra) e alleggerita (destra)

Infine, nella figura Figura 114 viene mostrata la frazione solida alla fine del ciclo. La percentuale di getto solidificato nel caso di conchiglia reale è pari a 96,8%, mentre la conchiglia alleggerita raggiunge il 95,7%.

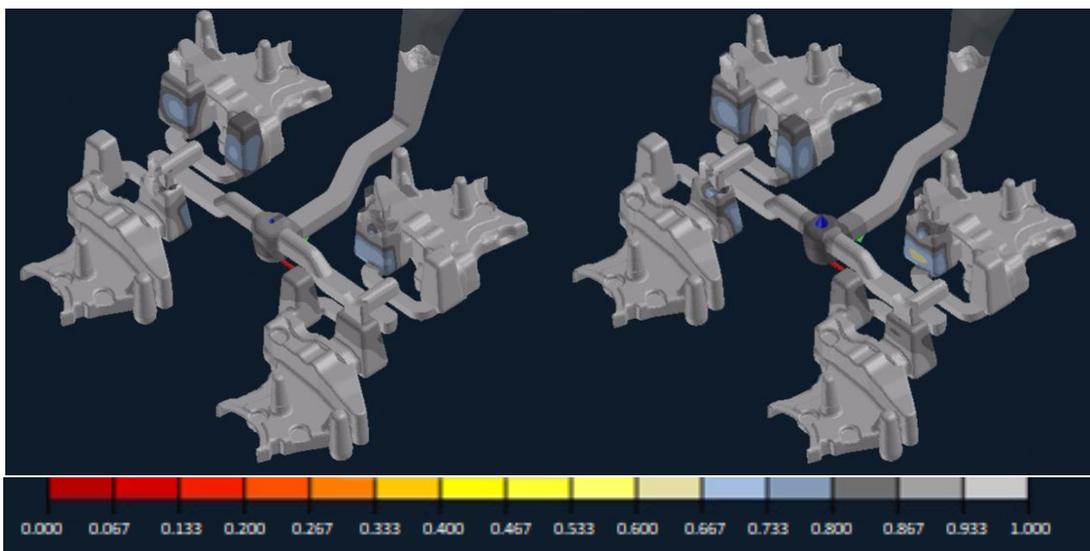


Figura 114 - frazione solida alla fine del ciclo di lavoro - conchiglia convenzionale (sinistra) e alleggerita (destra)

Le percentuali finali di frazione solida sono adeguate per poter estrarre il getto. Dal confronto tra le due simulazioni si nota che il getto colato nella conchiglia modificata solidifica in un tempo leggermente maggiore rispetto a quello colato nella conchiglia attuale. Sotto questo punto di vista, quindi, modificando la conchiglia non si ottiene un risultato tale da portare beneficio.

7.1.4 Temperatura

Nel capitolo 7.1.1, osservando le temperature delle conchiglie nei transitori termici, si è visto come la conchiglia alleggerita si scaldi di circa 20°C in più. Si vuole osservare ora la temperatura finale del getto nelle due simulazioni. Questa informazione è importante perché in base alla temperatura finale alla quale viene estratto il getto, potrebbe esserci un rischio più o meno grande di incorrere in deformazioni o cricche a caldo.

Nell'immagine Figura 115 vengono mostrate le temperature del getto dopo un minuto dall'inizio del ciclo (dopo 48s dall'inizio della solidificazione e raffreddamento), mentre nella Figura 116 sono visibili le

temperature alla fine del ciclo. Ciò che si può vedere fin da subito è che le isoterme sono uguali e che anche le temperature si somigliano molto.

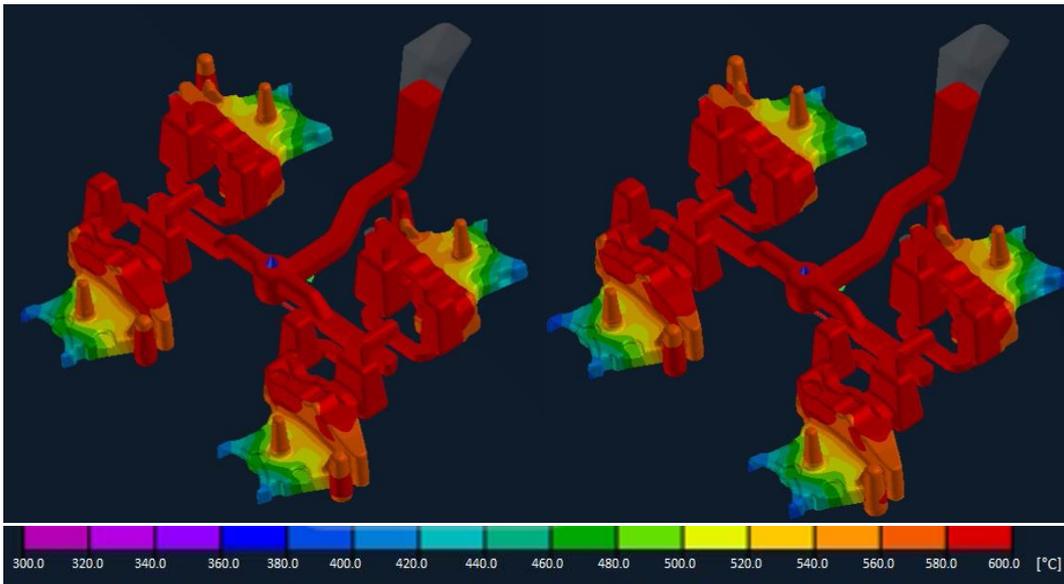


Figura 115 - temperature del getto dopo 60 s dall'inizio del riempimento (48s dall'inizio del raffreddamento) - conchiglia convenzionale (sinistra) e alleggerita (destra)

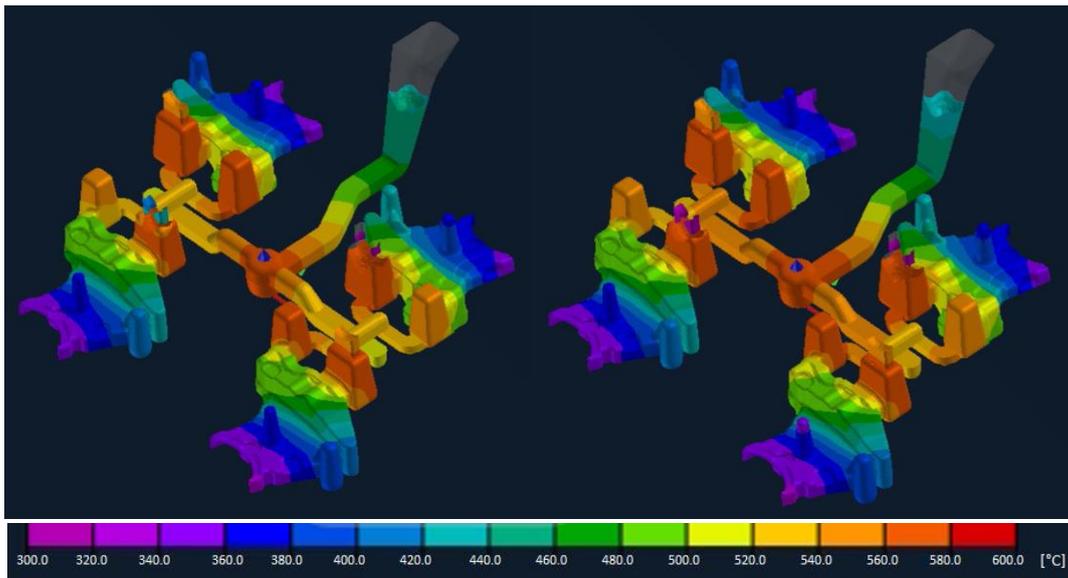


Figura 116 - temperature del getto alla fine del ciclo - conchiglia convenzionale (sinistra) e conchiglia alleggerita (destra)

Nella Figura 117 viene mostrato uno dei quattro supporti motore. Le variazioni di temperatura nei due particolari sono minime; è interessante, però, vedere il grande salto termico tra la parte sottile e quella massiccia, tra cui è presente una differenza di circa 200°C.

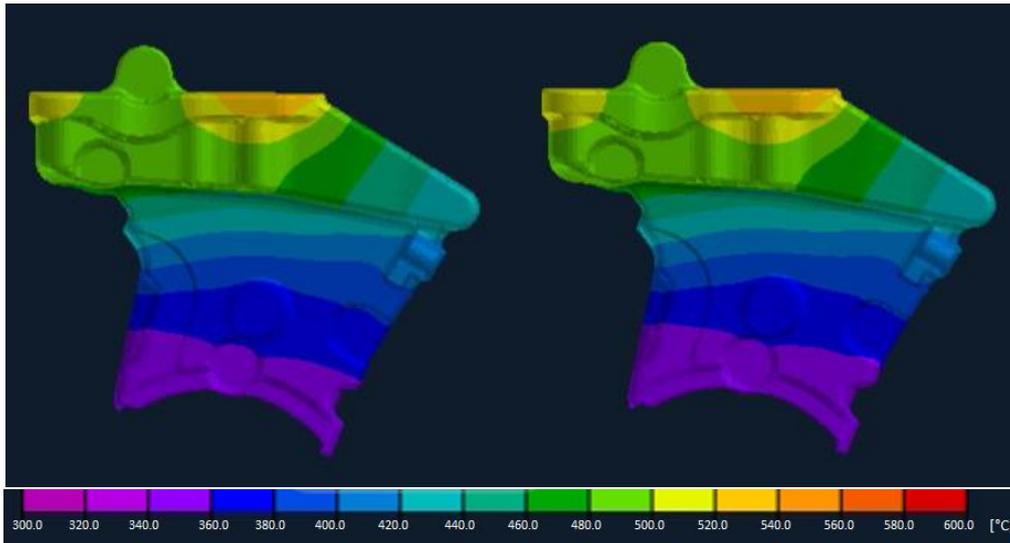


Figura 117 – temperatura di un supporto motore - conchiglia convenzionale (sinistra) e conchiglia alleggerita (destra)

7.1.5 Porosità

Le porosità sono difetti pericolosi all'interno di un getto ed è bene controllarle a partire dalla simulazione. Il software è in grado di calcolarle e sono da interpretare come la probabilità di ottenere porosità in una determinata zona. Solitamente si cerca di non avere percentuali superiori al 3%, per questo motivo la scala utilizzata per le immagini seguenti utilizza questo valore come limite massimo.

Nella Figura 118 viene impostato un cut-off pari al 2%, vengono, quindi, visualizzate solo le zone che presentano una percentuale di porosità superiore a questo valore.

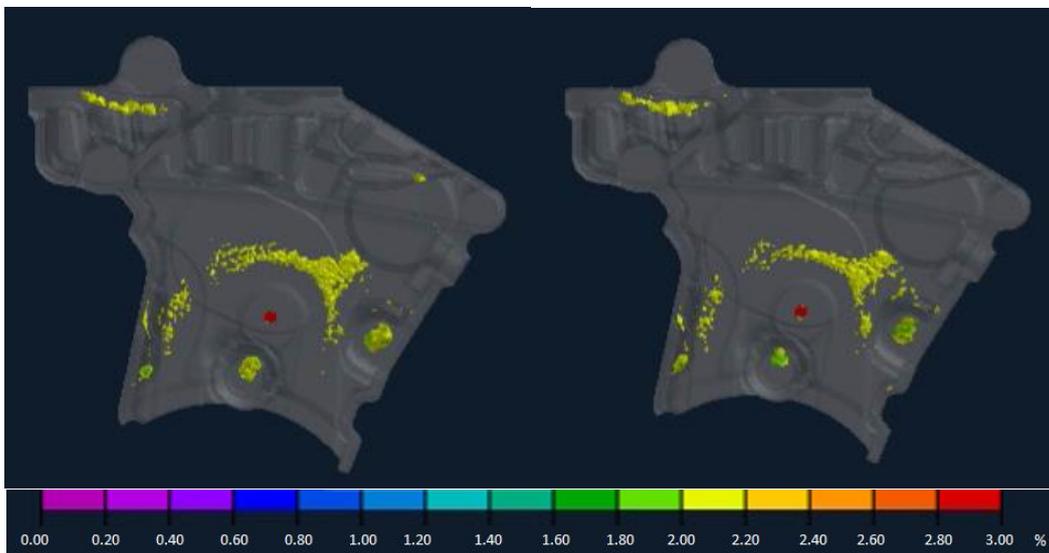


Figura 118 - porosità superiori al 2% - conchiglia convenzionale (sinistra) e conchiglia alleggerita (destra)

Nella Figura 119, invece, viene impostato un cut-off pari al 1.8%, una probabilità leggermente inferiore a quella impostata precedentemente, e si vede come ci siano zone più ampie con questa probabilità. In entrambe le simulazioni, però, si vede come le zone a rischio siano le stesse e le variazioni siano minime.

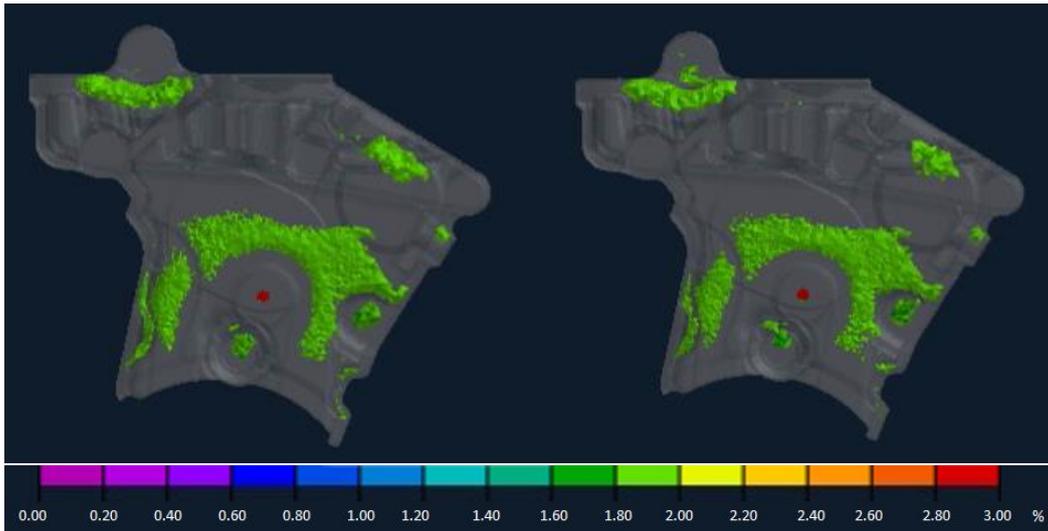


Figura 119 - porosità superiori a 1,8% - conchiglia convenzionale (sinistra) e conchiglia alleggerita (destra)

La zona cerchiata nella Figura 120, infatti, è una di quelle che sono state osservate al microscopio di cui si è discusso nel capitolo 6.2.

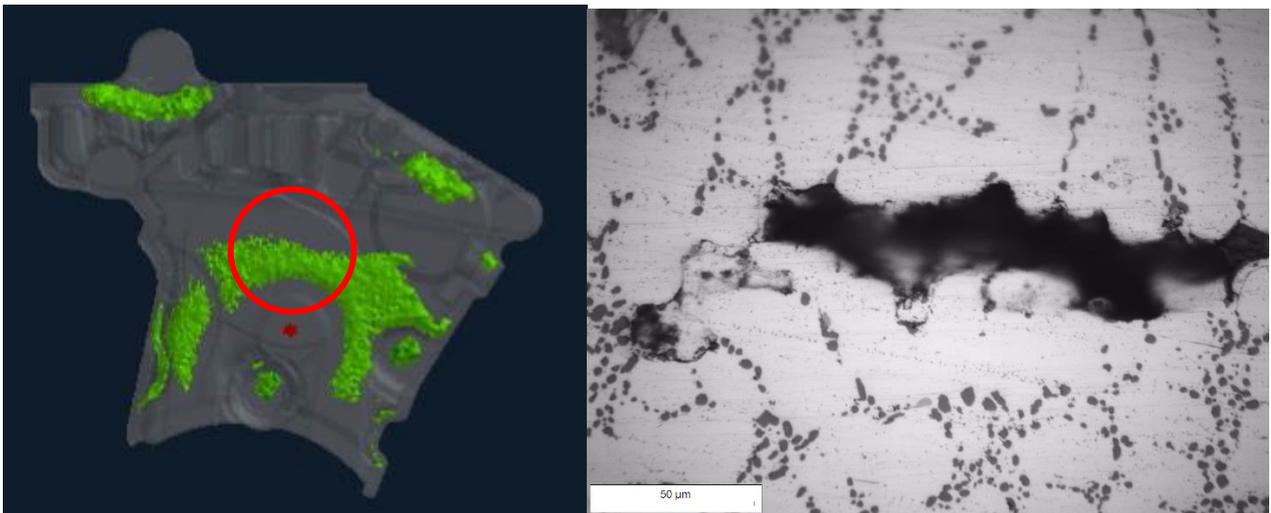


Figura 120 - a sinistra viene evidenziata la zona che è stata osservata al microscopio - a destra si può vedere un ingrandimento di questa zona che presenta un ritiro

7.1.6 SDAS (secondary dendrite arm space)

Lo SDAS è uno dei fattori fondamentali per la buona riuscita dei getti, tant'è che per alcuni componenti le aziende possono anche richiedere un valore di SDAS massimo da non superare. Questo parametro, infatti, permette di valutare la velocità di solidificazione del getto.

Si confronta ora la distanza interdendritica in corrispondenza dei punti già osservati precedentemente, nel capitolo 6.2 dove si è confrontato il pezzo reale con quello ottenuto dalla simulazione. Nella Figura 121 vengono mostrati i risultati relativamente ad una sezione del componente (la stessa utilizzata per la validazione della simulazione) e già dai colori è chiaro che non ci siano grandi variazioni.

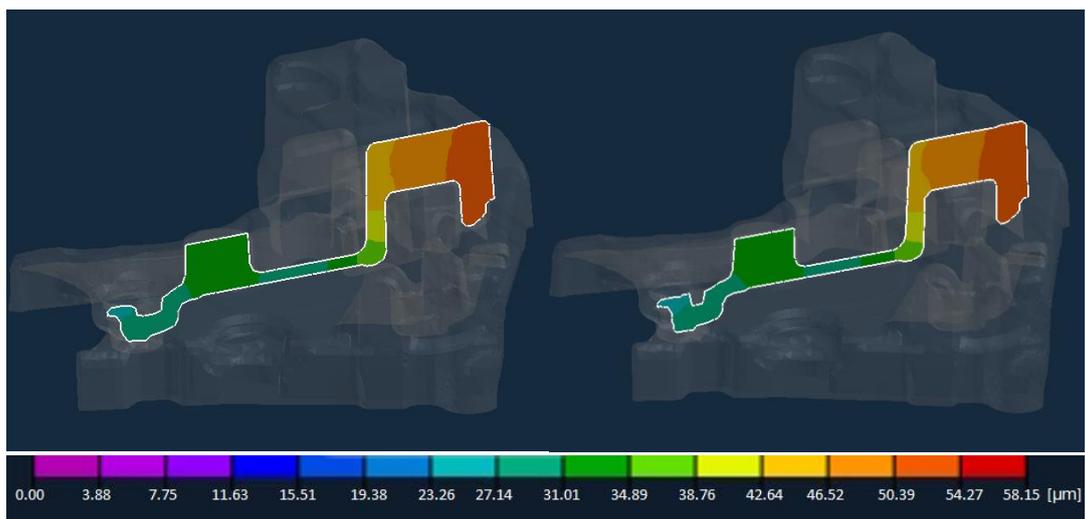


Figura 121 - SDAS nella conchiglia convenzionale (sinistra) e alleggerita (destra)

Per confrontare i risultati dello SDAS nei due casi, si utilizzano i punti segnati in Figura 122 (corrispondenti a quelli utilizzati per il confronto con il componente reale). Vengono riportati i valori ottenuti nella Tabella 6 e si rende chiaro che non ci siano notevoli variazioni.

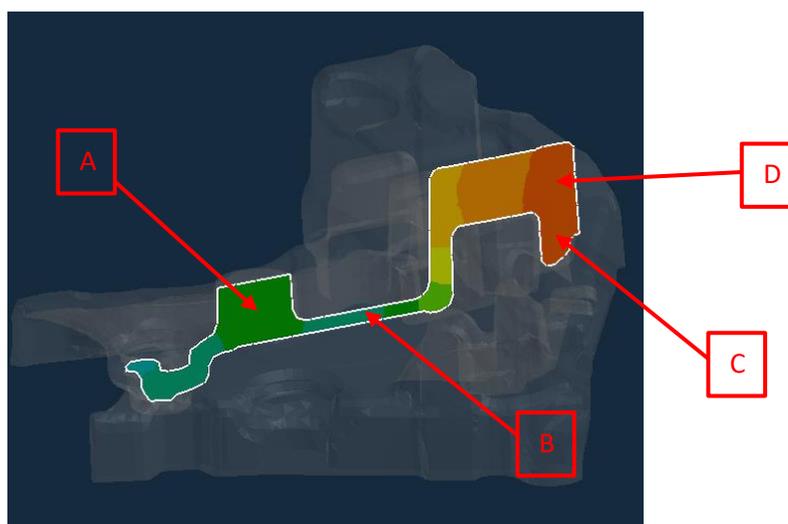


Figura 122 - punti in cui viene misurato lo SDAS

Tabella 6 - confronto SDAS tra conchiglia alleggerita e conchiglia convenzionale

	Conchiglia alleggerita [µm]	Conchiglia convenzionale [µm]
A	32.90	33.14
B	31.13	30.70
C	53.04	52.35
D	52.63	51.80

7.2 Simulazione di una piastra

Per verificare che questi risultati siano affidabili e che non siano dovuti alla poca precisione con cui si è riuscito a modellare la conchiglia nel caso del supporto motore per via della forma complessa del getto, è stata effettuata un'ulteriore simulazione utilizzando una piastra modellata appositamente per questo scopo. Le modalità con cui sono state impostate le simulazioni sono le stesse utilizzate nel caso del supporto motore, perciò: la temperatura iniziale della conchiglia è costante e pari a 350°C, vengono effettuati dieci cicli di lavoro e i tempi sono definiti in base ad una prova iniziale per vedere quanto tempo impiega la piastra a solidificarsi. Il tempo ciclo è pari a 343s.

La piastra (Figura 123) ha una forma regolare, ingombro pari a 200x300x60mm e spessore interno pari a 20mm; l'apertura della conchiglia avviene orizzontalmente in modo da posizionare le materozze ai lati del componente e non aumentare il suo spessore, come invece avveniva per il supporto motore.

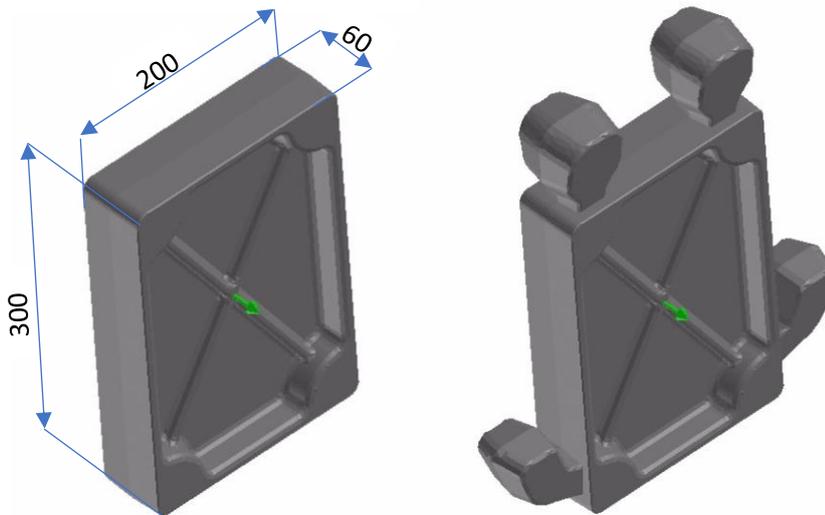


Figura 123 - piastra (sinistra) e piastra con materozze (destra) – dimensioni in [mm]

Con questi accorgimenti è stato possibile effettuare due simulazioni (Figura 124): la prima è stata eseguita con una conchiglia regolare e una forma squadrata, mentre la seconda è stata svolta con una conchiglia più sottile, in cui si è mantenuto uno spessore della forma pari a 50mm, ove possibile.

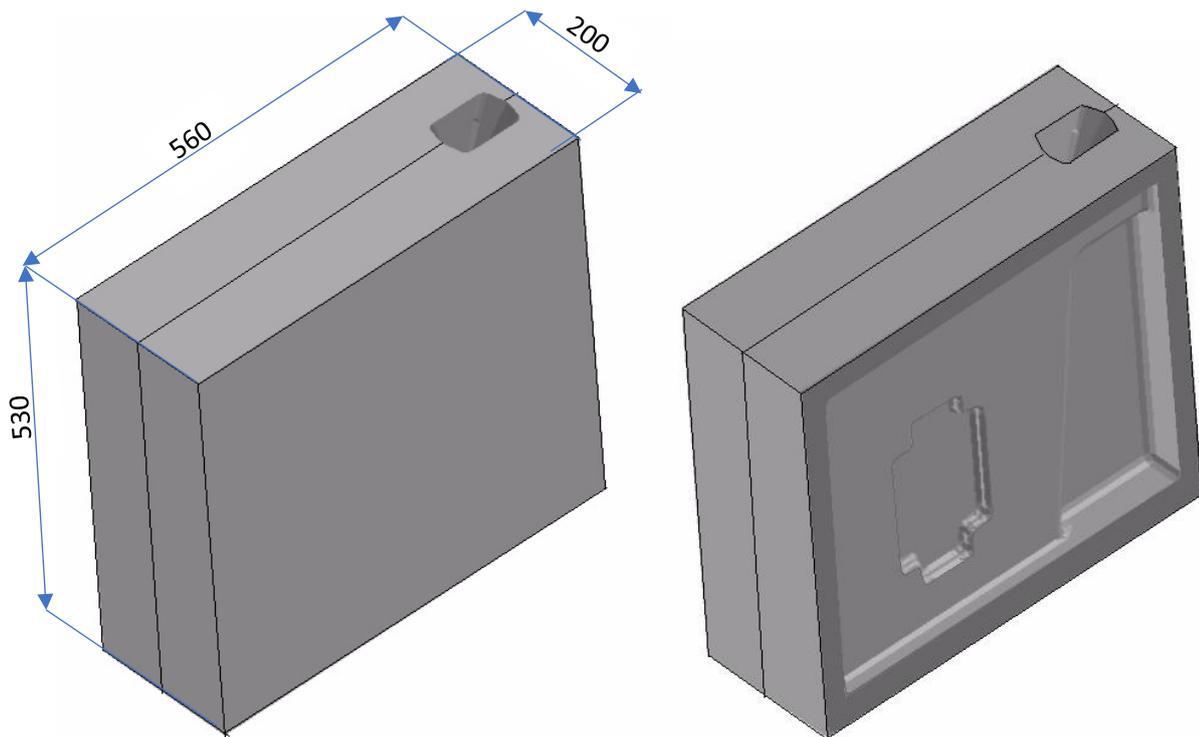


Figura 124 - conchiglia convenzionale (sinistra) e conchiglia alleggerita (destra) – dimensioni in [mm]

Nell'immagine Figura 125 viene mostrata la conchiglia modificata con il getto all'interno e vengono date alcune indicazioni sugli spessori finali che sono stati modificati.

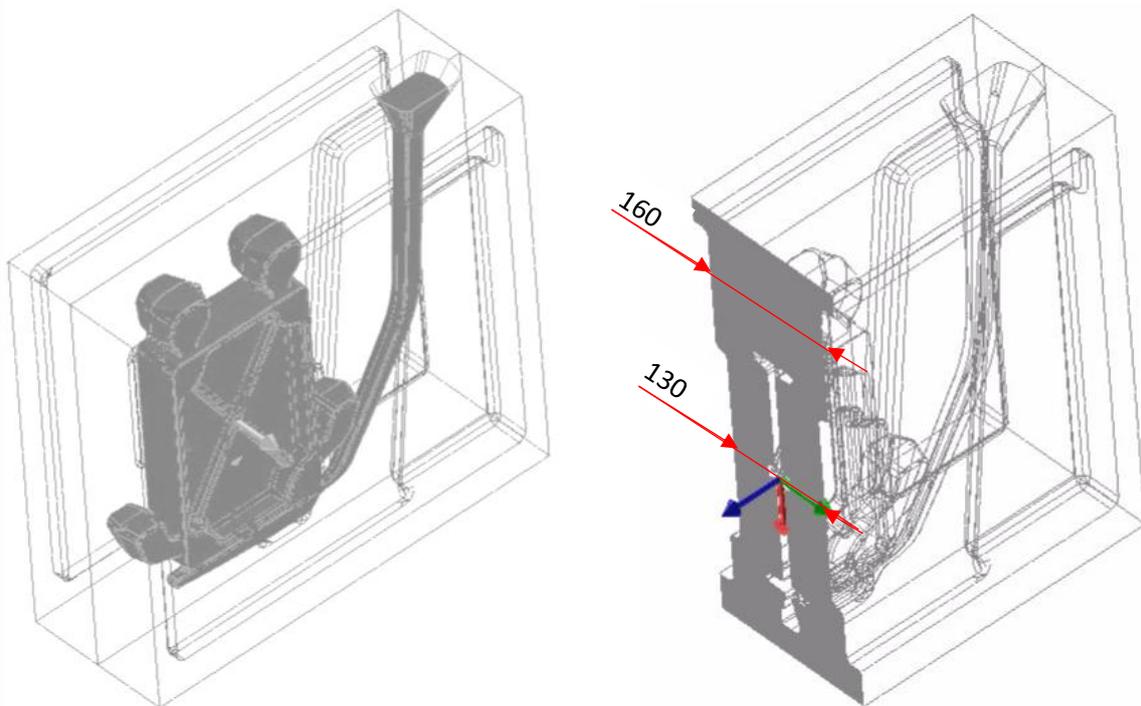


Figura 125 - conchiglia modificata - vista in trasparenza con getto – misure in [mm]

7.2.1 Temperature e deformazioni della conchiglia

In questo capitolo vengono confrontate le temperature della conchiglia alla fine dei dieci cicli di lavoro. Anche in questo caso, come per il caso del supporto motore, si può osservare nella conchiglia modificata una temperatura maggiore in prossimità della parte centrale, mentre sui bordi laterali la temperatura è inferiore (Figura 126). Anche per quanto riguarda la temperatura interna (Figura 127) è maggiore nel caso di conchiglia modificata.

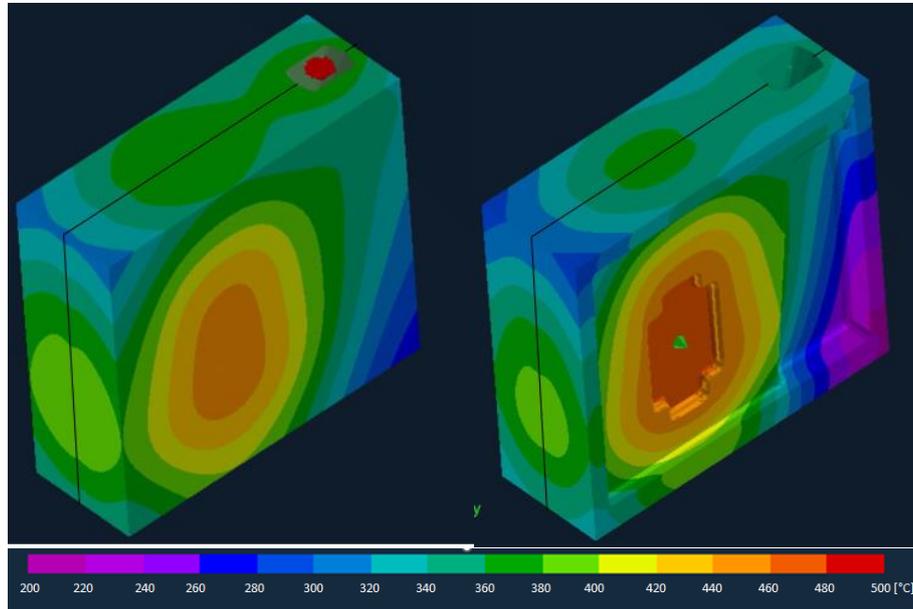


Figura 126 - piastra - conchiglia convenzionale (a sinistra) e conchiglia alleggerita (a destra)

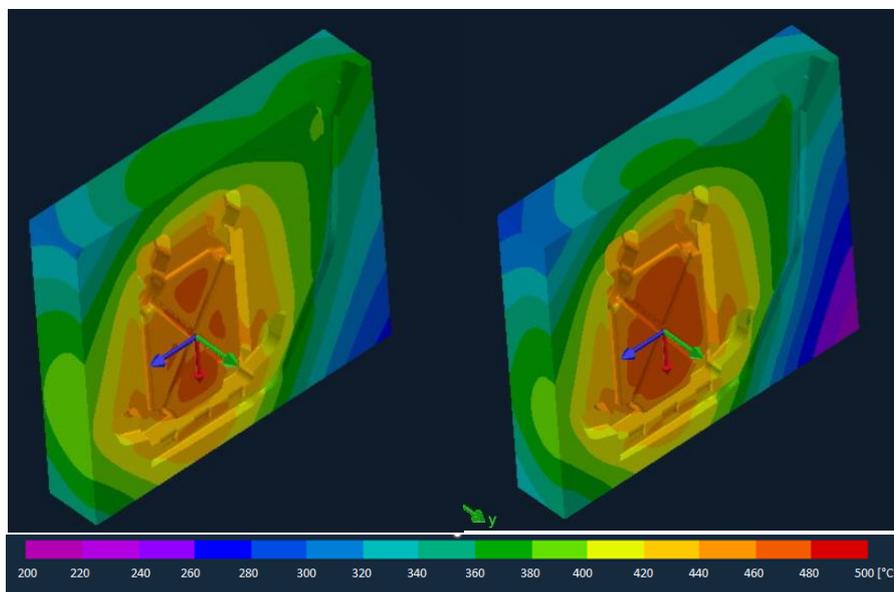


Figura 127 - interno della conchiglia - conchiglia convenzionale (a sinistra) e conchiglia alleggerita (a destra)

Come osservato precedentemente per il supporto motore, anche con la piastra si ottiene la stessa tendenza: una temperatura maggiore centralmente in prossimità della cavità (sia internamente che esternamente) e una temperatura inferiore ai bordi della conchiglia nel caso della conchiglia modificata. Per questo motivo si ipotizza che le deformazioni lungo la direzione di apertura dello stampo possano essere maggiori anche in questo caso.

7.2.2 Temperatura del getto

Vengono mostrate per le due simulazioni le temperature del getto alla fine dei dieci cicli di lavoro (Figura 128). Le differenze non sono eclatanti, ma si può notare come la piastra prodotta con la conchiglia modificata abbia una temperatura superiore nella parte centrale.

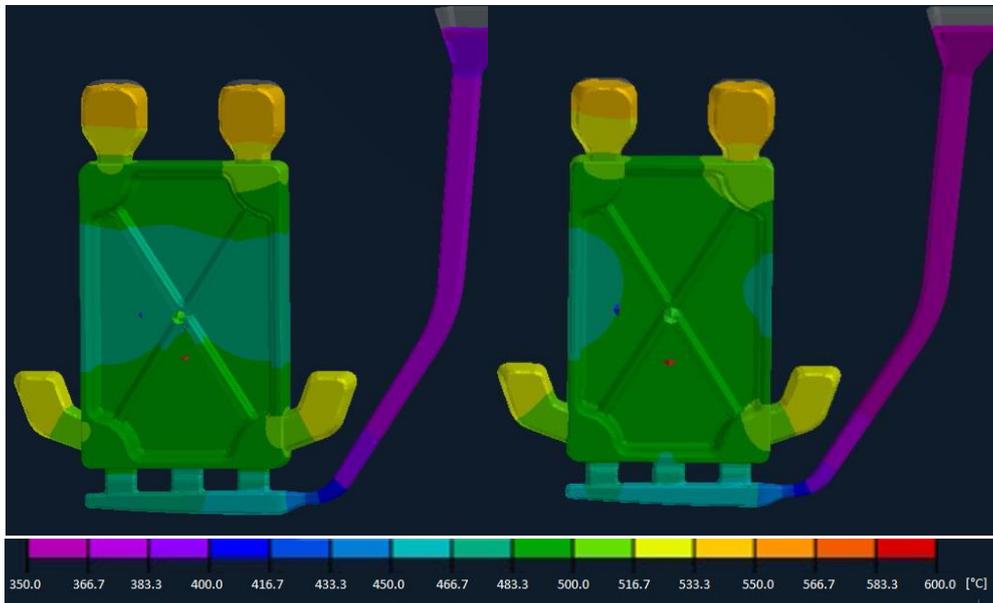


Figura 128 - temperatura piastra - conchiglia convenzionale (a sinistra) e conchiglia alleggerita (a destra)

7.2.3 Frazione solida

La frazione solida serve per poter confrontare la solidificazione nelle due simulazioni. Nella Figura 129 viene mostrato il risultato per i due getti; le differenze sono minime, dove si riesce a vedere una variazione è in corrispondenza dello spigolo in alto a destra, cerchiato nella figura a destra, in questa zona si vede come con la conchiglia alleggerita si abbia una parte di piastra con una percentuale di solidificazione inferiore, mentre la materozza sovrastante ha una percentuale maggiore.

La frazione solida finale totale del getto è uguale nei due getti ed è pari a 97,9%.

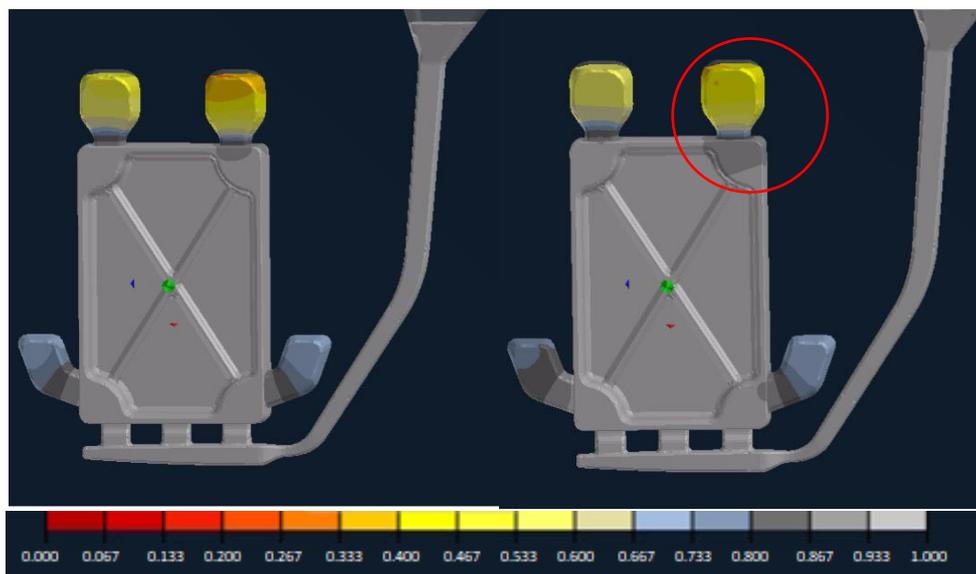


Figura 129 - frazione solida - conchiglia convenzionale (a sinistra) e conchiglia alleggerita (a destra)

7.2.4 Porosità del getto

Per mettere in evidenza le porosità presenti nei getti viene utilizzata una scala che va da 0% a 3%, infatti, come spiegato già nel capitolo 7.1.5, difetti superiori a questo valore sono inaccettabili. Nella Figura 130 vengono mostrate le porosità che hanno una probabilità di presentarsi superiore all'1,6%, nella Figura 131 quelle aventi una probabilità maggiore dell'1,55% e in Figura 132 maggiore di 1,5%.

Si può osservare un miglioramento delle porosità aventi probabilità superiore a 1,5% e 1,55% nel caso di conchiglia alleggerita.



Figura 130 - porosità superiori a 1,6% - conchiglia convenzionale (a sinistra) e conchiglia alleggerita (a destra)

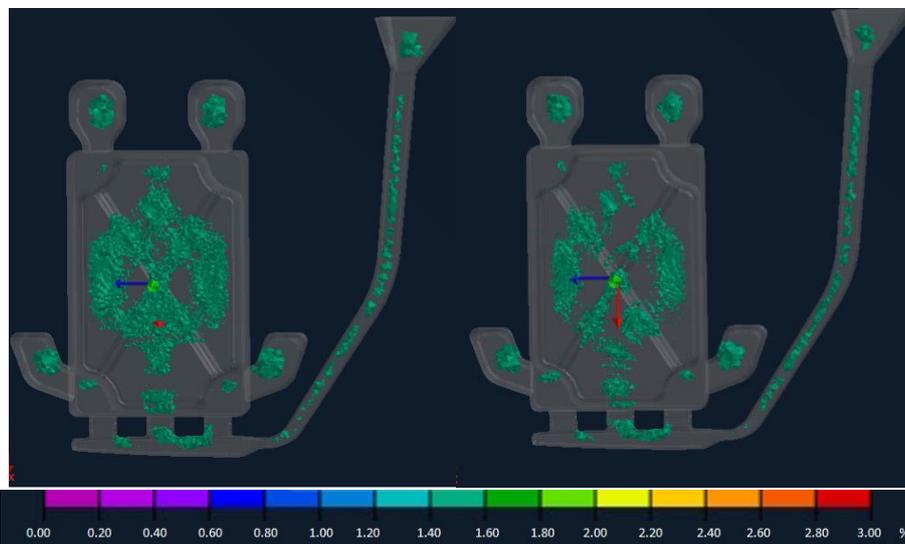


Figura 131 - porosità superiori a 1,55% - conchiglia convenzionale (a sinistra) e conchiglia alleggerita (a destra)

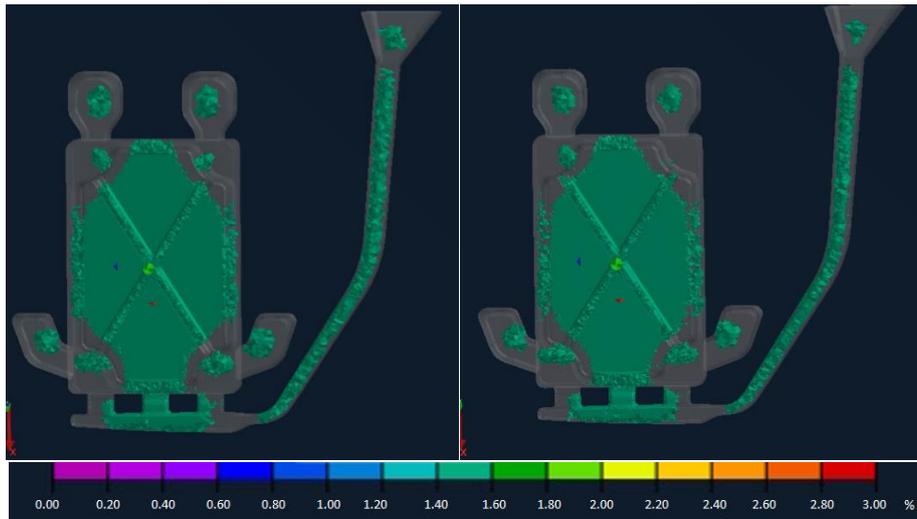


Figura 132 - porosità superiori a 1,5% - conchiglia convenzionale (a sinistra) e conchiglia alleggerita (a destra)

7.2.5 SDAS

Vengono selezionate alcune zone per vedere se possano esserci variazioni, anche se già dalla scala di colori si vede come le differenze siano minime (Figura 133) e in Tabella 7 vengono riportati i valori ottenuti. Anche in questo caso, le variazioni trovate sono minime.

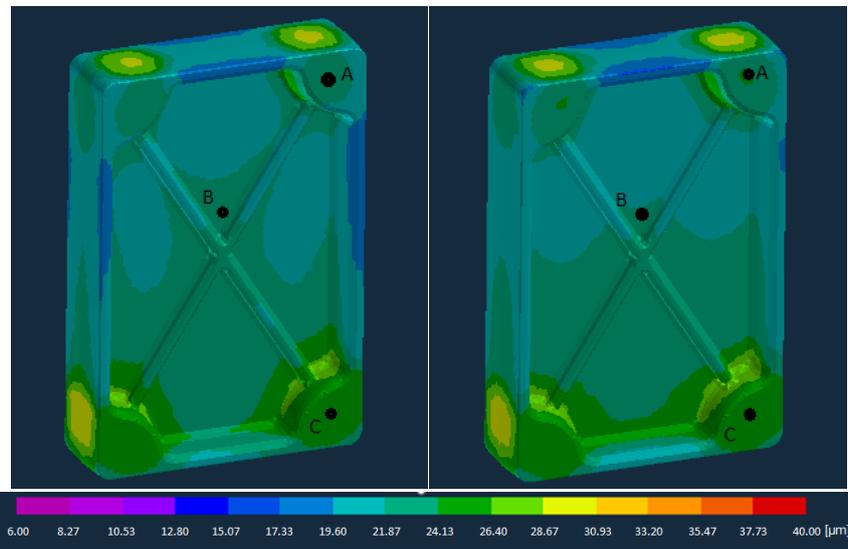


Figura 133 - SDAS delle due piastrine - conchiglia convenzionale (sinistra) e alleggerita (destra)

Tabella 7 - confronto tra lo SDAS delle due simulazioni in diversi punti della piastra

	Conchiglia convenzionale [μm]	Conchiglia alleggerita [μm]
A	23.30	24.36
B	22.24	23.26
C	26.14	25.87

7.3 Simulazione piastra con raffreddamento artificiale

Nei capitoli xxx e xxx in cui sono state effettuate le simulazioni su supporto motore e piastra, non ci sono stati notevoli miglioramenti o peggioramenti, ma le differenze sono molto piccole. Per comprendere in quali quantità dovrebbe variare un getto per avere dei risultati più concreti, si è deciso di effettuare una simulazione imponendo alla conchiglia un raffreddamento artificiale. La simulazione è stata svolta sulla piastra e la modifica consiste nell'inserimento di due tubazioni poste da entrambi i lati della piastra, che vedono al loro interno scorrere in modo continuo dell'acqua a 15°C. Le tubazioni sono poste in prossimità della parte centrale della piastra, in modo centrato (Figura 134).

Dopo una simulazione preliminare in cui viene impostato come tempo ciclo quello utilizzato precedentemente (343s), si osserva come il getto raggiunga una frazione solida prossima al 100% con tempi molto più brevi, pari a 221s. La simulazione viene, quindi, effettuata con le stesse modalità, ma con tempo ciclo cambiato: dieci cicli di lavoro e poi simulazione completa (raffreddamento+solidificazione) che viene utilizzata per vedere le caratteristiche del getto.

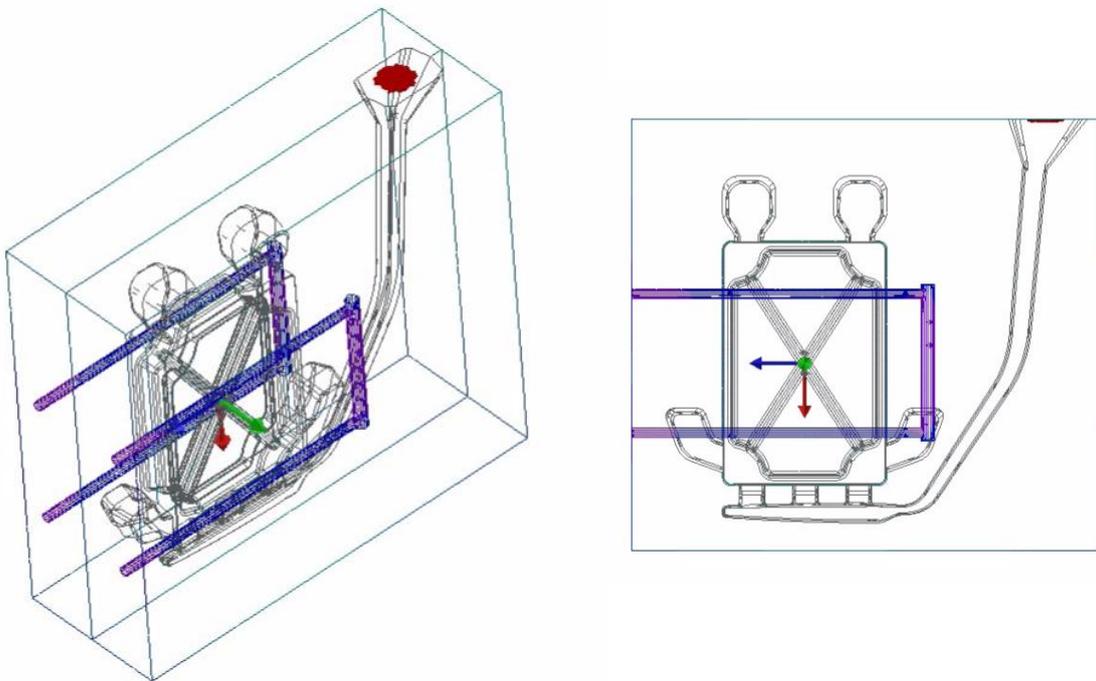


Figura 134 - conchiglia con tubazioni - raffreddamento artificiale - (a destra vista frontale)

Il vantaggio di una soluzione simile è dato dalla possibilità di variare le temperature e, quindi, anche i parametri del getto, andando a variare il flusso dell'acqua all'interno delle tubazioni. I vantaggi e svantaggi di questo processo non verranno analizzati nel dettaglio, la simulazione ha il solo scopo di mettere in evidenza in quali quantità dovrebbero variare i parametri per poter decidere di effettuare una modifica alla conchiglia o meno.

Nei sottocapitoli seguenti vengono mostrati gli altri risultati riguardanti conchiglia e getto e vengono confrontati con quelli ottenuti precedentemente in cui si è utilizzato la conchiglia squadrata.

7.3.1 Temperatura e deformazioni della conchiglia

Si nota subito dal cambio di colori come la conchiglia rimanga molto più fredda rispetto a quanto accade nella conchiglia con raffreddamento naturale. Nella Figura 135 viene mostrato il confronto tra le temperature delle conchiglie chiuse, mentre in Figura 136 vengono mostrate le temperature di un solo lato della conchiglia, in modo da osservare le isoterme in corrispondenza della cavità.

La temperatura si abbassa notevolmente grazie all'ausilio del raffreddamento artificiale, infatti, in alcuni punti (ad esempio la parte centrale) si ottiene una temperatura pari a 260°C esternamente (contro i 440°C della conchiglia senza modifiche) e una temperatura pari a 300°C internamente (contro i 450°C della conchiglia a destra), con un abbassamento della temperatura di 180-150°C.

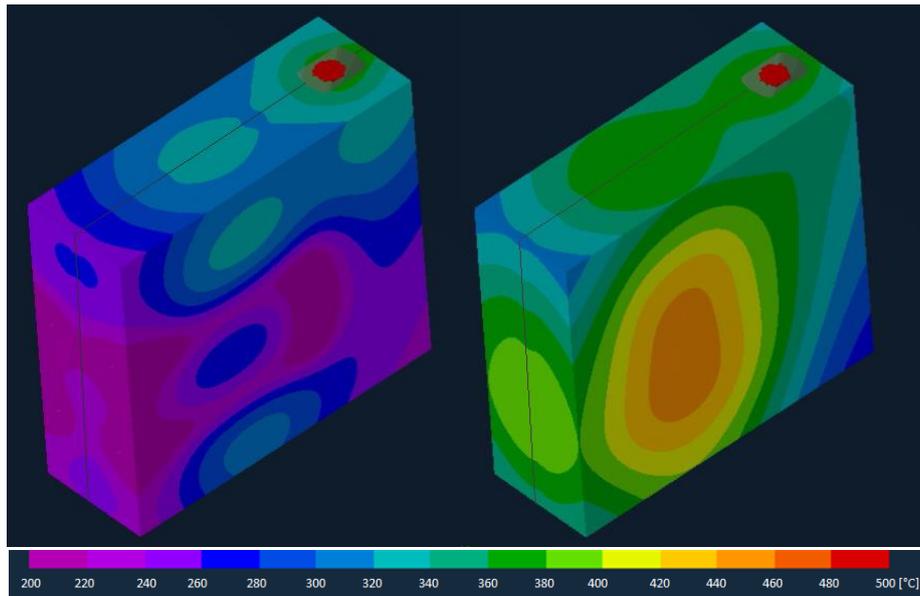


Figura 135 - conchiglia con raffreddamento artificiale (sinistra) e senza raffreddamento (destra) – alla fine dei dieci cicli

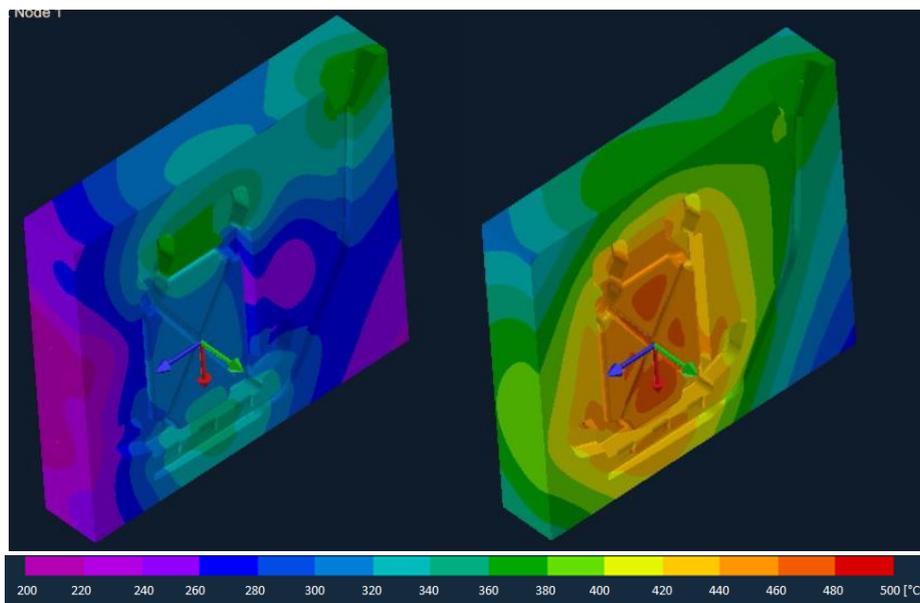


Figura 136 - conchiglia aperta con raffreddamento artificiale (sinistra) e senza raffreddamento (destra) – alla fine dei dieci cicli

Per quanto riguarda le deformazioni della conchiglia, si può ipotizzare che siano inferiori nella conchiglia con raffreddamento artificiale, grazie alle temperature più basse; ma, anche in questo caso, sarebbe necessario effettuare simulazioni più accurate per poter avere dei risultati attendibili.

7.3.2 Temperatura del getto

Ad un raffreddamento maggiore della conchiglia ne consegue una variazione di tutte le caratteristiche del getto. Viene mostrato nella Figura 137 l'andamento delle temperature nei due getti.

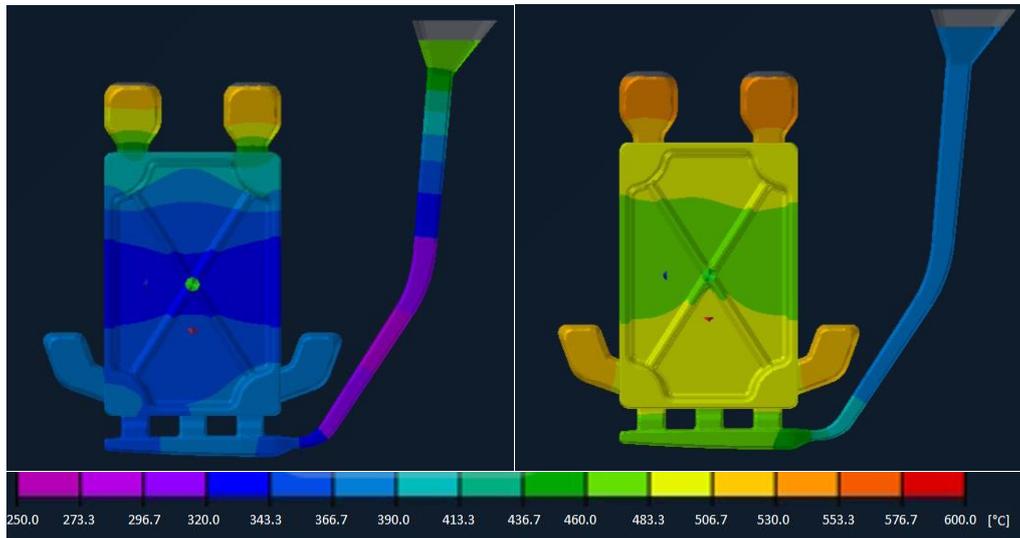


Figura 137 - temperatura getto con raffreddamento artificiale (sinistra) e senza (destra) – alla fine dell'ultimo ciclo

7.3.3 Frazione solida del getto

Come accennato nel capitolo 7.3, il raffreddamento artificiale porta ad una solidificazione più rapida del getto. Alla fine del ciclo di lavoro si ottiene una frazione solida pari al 99,6% rispetto ad un 98% ottenuto con la conchiglia non modificata; infatti, si vede come anche le materozze, che hanno una frazione solida inferiore nella conchiglia squadrata, in quella modificata hanno una percentuale di solidificazione maggiore.

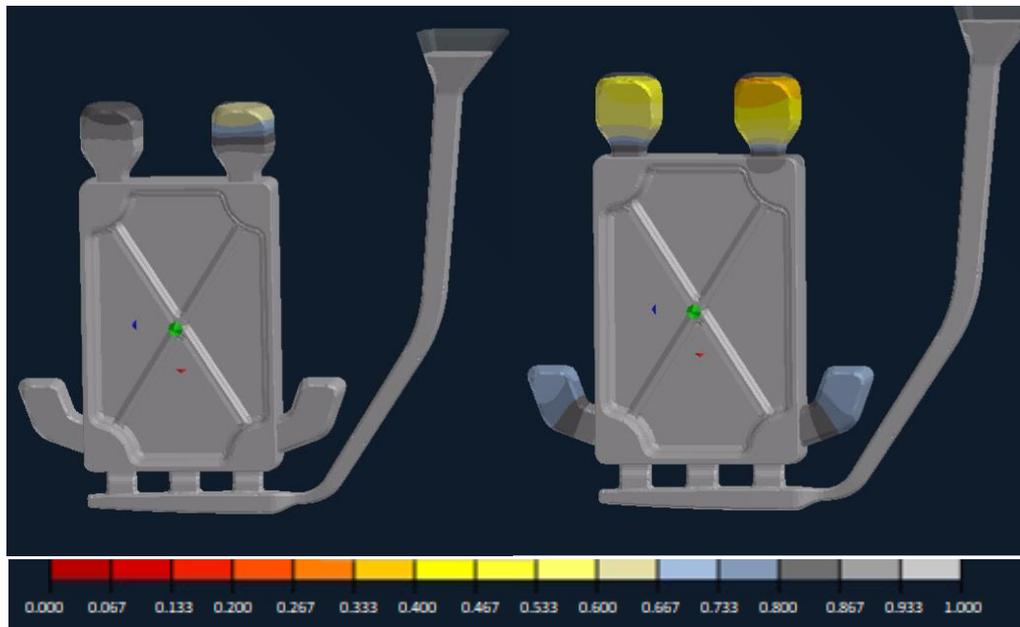


Figura 138 - frazione solida con raffreddamento artificiale (sinistra) e senza (destra) – alla fine dell'ultimo ciclo

7.3.4 Porosità del getto

Come fatto precedentemente, viene utilizzata una scala che arriva al 3% massimo di porosità. Vengono mostrate nelle immagini seguenti le porosità maggiori di 1,6% (Figura 139), 1,55% (Figura 140) e 1,5% (Figura 141). Si vede che le porosità più gravi, con percentuali maggiori di 1,6% sono più presenti nel getto con raffreddamento artificiale, mentre andando a vedere porosità con percentuali più basse, si ha un netto miglioramento con questa modifica.



Figura 139 - porosità superiori a 1,6% - conchiglia raffreddata artificialmente (sinistra) e convenzionale (destra) – alla fine dell'ultimo ciclo

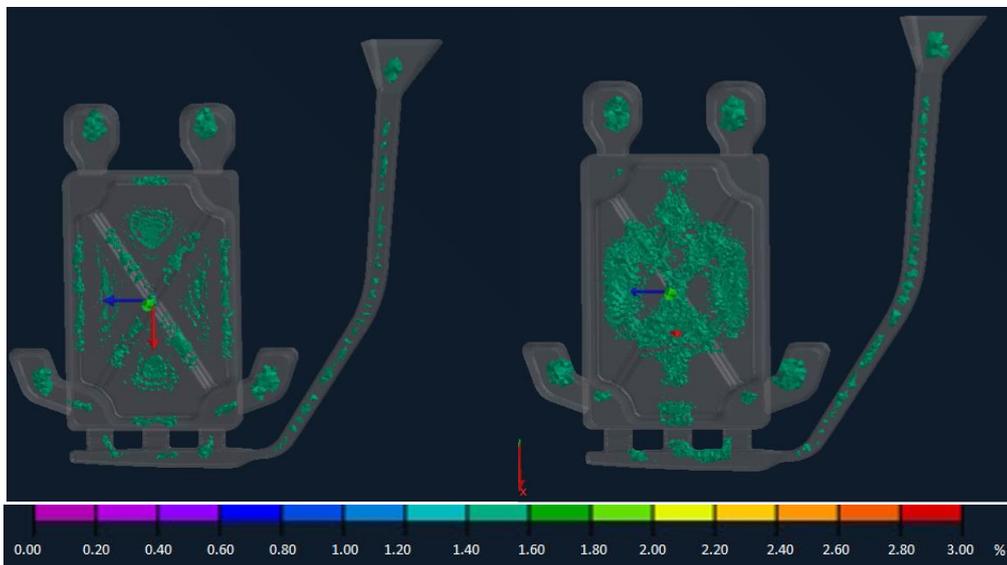


Figura 140 - porosità superiori a 1,55% - conchiglia raffreddata artificialmente (sinistra) e convenzionale (destra) – alla fine dell'ultimo ciclo

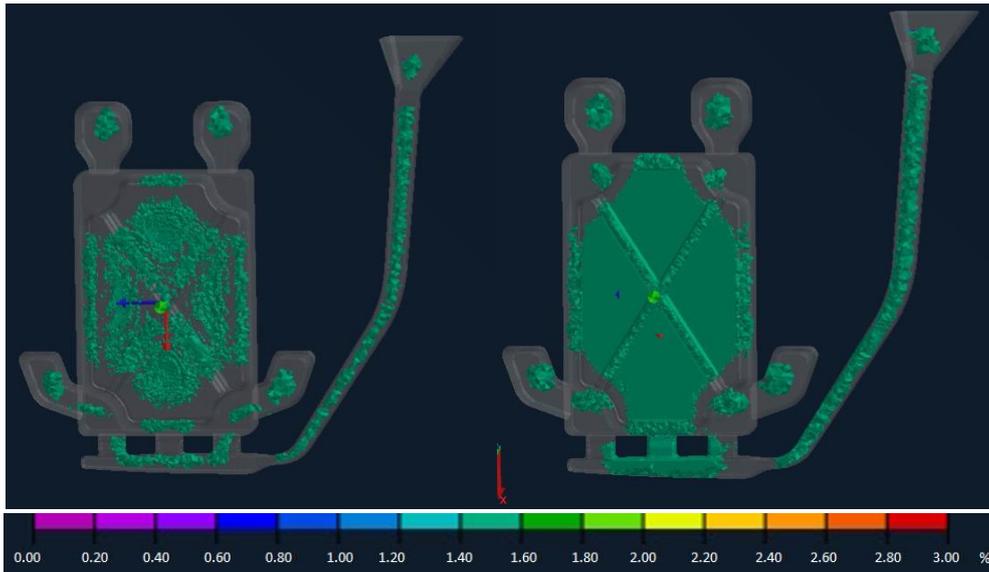


Figura 141 - porosità superiori a 1,5% - conchiglia raffreddata artificialmente (sinistra) e convenzionale (destra) – alla fine dell'ultimo ciclo

7.3.5 SDAS

Anche per quanto riguarda i valori dello SDAS sono visibili dei miglioramenti, si possono vedere subito in base ai colori delle due piastre (Figura 142). In Tabella 8 vengono mostrati alcuni valori della distanza interdendritica per i tre punti segnati sulle piastre in Figura 142. I valori sono più bassi nel caso di getto con raffreddamento artificiale.

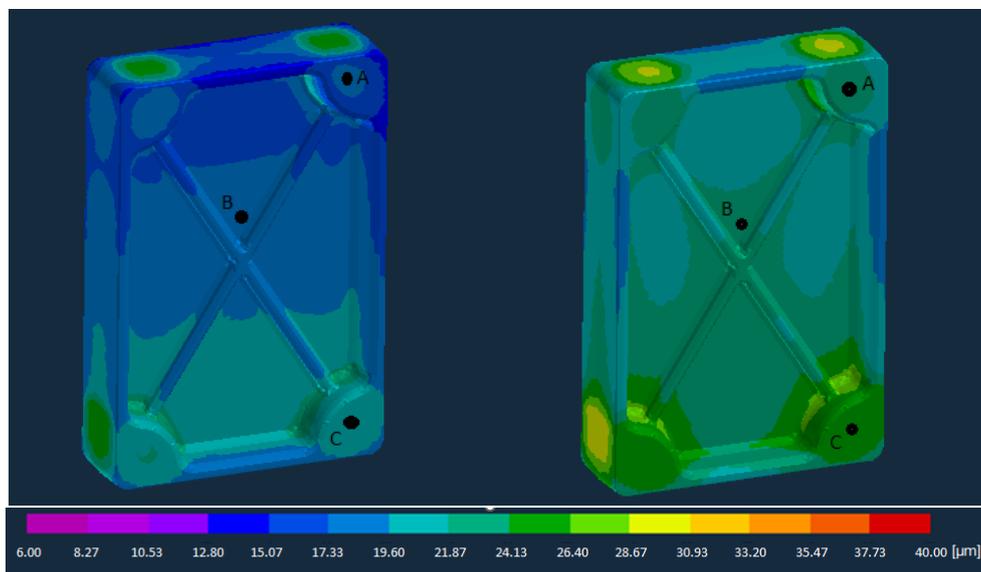


Figura 142 - SDAS conchiglia raffreddata artificialmente (sinistra) e convenzionale (destra) – alla fine dell'ultimo ciclo

Tabella 8 - confronto SDAS tra conchiglia convenzionale e conchiglia raffreddata

	Conchiglia convenzionale [μm]	Conchiglia raffreddata [μm]
A	23.30	18.29
B	22.24	19.14
C	26.14	21.61

8 Conclusioni

Gli scopi dell'elaborato erano molteplici: validare la simulazione effettuata con il software ProCAST e analizzare il ruolo dello spessore della conchiglia. Oggetto dello studio sono stati un supporto motore realmente in produzione e una piastra modellata appositamente per effettuare le simulazioni.

Innanzitutto, è stata impostata la simulazione relativa al supporto motore in base ai dati ottenuti in fonderia (temperatura del metallo fuso, temperatura iniziale della conchiglia, tempi ciclo...). Per ottenere dei dati più affidabili rispetto alle caratteristiche del getto, sono stati effettuati dieci cicli in cui il software ha calcolato solamente la parte fluidodinamica del metallo fuso e gli scambi termici tra colata e conchiglia. L'analisi completa si sviluppa successivamente al raggiungimento del regime termico dello stampo, infatti, i risultati di riempimento, solidificazione e termica dello stampo, sono più attendibili rispetto a quelli che si sarebbero ottenuti nelle fasi precedenti, a scapito di un tempo di elaborazione più lungo.

Per l'analisi termica del supporto motore è stata utilizzata una termocamera in grado di registrare le temperature nel tempo; questo ha permesso di osservare le variazioni di temperatura della conchiglia durante il transitorio termico (preso pari a dieci cicli di lavoro, di durata poco superiore ad un'ora). Per poter utilizzare e visualizzare i risultati, i dati sono stati importati in MATLAB e sono stati confrontati con i risultati ottenuti dalla simulazione. Le condizioni iniziali dei due casi sono molto diverse, infatti, nella simulazione viene impostata una temperatura base di 350°C omogenea in tutta la conchiglia, mentre nella realtà lo stampo viene scaldato tramite dei bruciatori a gas posti al suo interno, creando zone più calde di altre. Questo ha comportato un difficile confronto della parte esterna della conchiglia nei due casi e si vede come il regime termico venga raggiunto nella simulazione dopo un paio di cicli a partire dall'alto (da 350°C iniziali raggiunge un massimo di 320°C), mentre nella realtà la conchiglia aumenta di temperatura e in dieci cicli non raggiunge i 320°C. Il confronto della parte interna della conchiglia, invece, non risente delle diverse condizioni iniziali, ma è influenzata dai diversi tempi ciclo, più lunghi e variabili nella realtà. Nonostante questa differenza, si riescono ad ottenere temperature molto simili alla fine di ogni ciclo e, quindi, una buona affidabilità della parte termica del software. Come studio futuro sarebbe utile ripetere l'analisi termica effettuata seguendo tutto il turno di lavoro della conchiglia, in modo da verificare se il transitorio termico viene raggiunto dopo un certo numero di cicli (come avviene per la parte esterna della conchiglia nella simulazione) o se la frequenza con la quale viene colato il getto non permette il suo raggiungimento.

Le analisi microscopica e macroscopica sono state effettuate su un supporto motore scelto in maniera casuale tra i componenti prodotti. Dal componente sono stati ottenuti tre provini sezionando il campione in tre parti diverse: una parte massiccia, una sottile e l'ultima presa in corrispondenza di una borchia. Inizialmente, i tre provini sono stati lucidati ed è stato possibile osservarne la microstruttura al microscopio; già da un primo sguardo è chiaro che le dimensioni delle dendriti cambi molto da una zona all'altra e viene confermato andando a calcolare la distanza interdendritica (SDAS). Si ottiene che la parte sottile è quella avente SDAS minore, seguita dalla borchia e, infine, dalla parte massiccia. Per poter confrontare i risultati ottenuti con la simulazione, è necessario tenere a mente che i risultati ricavati dalla simulazione fanno riferimento all'undicesimo getto (poiché vengono effettuati dieci cicli termo-fluidodinamici e, successivamente, un ultimo ciclo in cui vengono calcolate tutte le caratteristiche del getto). Dall'analisi termica si è visto come la temperatura della conchiglia vari molto da un ciclo al successivo e, di conseguenza, anche le caratteristiche subiranno delle modifiche; per questo motivo è stata effettuata un'ulteriore simulazione con la conchiglia più fredda (omogenea a 350°C), simulando, quindi, la prima colata dopo il preriscaldamento dello stampo. Confrontando lo SDAS ottenuto dalle due simulazioni (primo e undicesimo ciclo) e quello calcolato nel caso reale, si nota che la distanza interdendritica varia molto dal primo ciclo all'undicesimo (tra i valori è presente un fattore di scala di media 1,7) e, di conseguenza, anche la qualità del getto ne è influenzata. Inoltre, lo SDAS calcolato nel pezzo reale rientra nell'intervallo ottenuto e, quindi, la simulazione porta a risultati realistici. Per quanto riguarda, invece, l'analisi macroscopica, i tre provini precedentemente analizzati sono stati

attaccati chimicamente seguendo la normativa UNI 3251. Successivamente, i campioni sono stati analizzati al microscopio per osservarne la dimensione dei grani e ne è emerso che i reagenti metallografici non hanno reagito completamente su tutta la superficie dei provini, ma alcune parti sono rimaste inalterate. La normativa seguita è stata ritirata nel 2008 ed è stata sostituita dalla norma ASTM E340-15, come studio futuro sarebbe interessante effettuare l'attacco chimico consigliato dalla normativa in vigore per verificare la sua utilità in confronto alla UNI 3251. In quanto all'analisi microscopica, invece, sarebbe utile continuare lo studio verificando i valori di SDAS ottenuti per ogni ciclo reale in confronto con quelli che si otterrebbero dalla simulazione.

Per quanto riguarda lo studio dello spessore della conchiglia, per effettuare la modifica si è deciso di modificare lo spessore, diminuendolo fino a 50mm e mantenendolo il più possibile uniforme intorno al pezzo, in modo da permettere un raffreddamento più omogeneo. Questa simulazione è stata confrontata con quella svolta precedentemente con la conchiglia convenzionale, la quale ha una forma regolare e uno spessore minimo di 100mm. I risultati ottenuti relativi alla temperatura della conchiglia e alle caratteristiche del getto non mostrano particolari variazioni rispetto a quanto avviene normalmente con la conchiglia convenzionale. La differenza principale riguarda l'aumento della temperatura in prossimità della parte centrale della conchiglia, mentre nella parte più esterna la temperatura risulta essere inferiore. Queste variazioni di temperatura fanno ipotizzare che la deformazione della conchiglia nella direzione di apertura possa essere maggiore; tuttavia, questo aspetto sarebbe da studiare in modo più approfondito.

Le simulazioni sono state svolte in maniera analoga su una piastra che è stata modellata appositamente per questo studio. Le simulazioni sono state ripetute su questo componente perché la conchiglia utilizzata per produrre i supporti motori non si è prestata in modo ottimale alla modifica dello spessore; perciò, è stata modellata una piastra con una forma più semplice in modo da verificare i risultati precedentemente ottenuti con il supporto motore. Anche in questo caso le simulazioni effettuate sono state due, la prima modellando uno stampo di forma regolare e uno spessore di circa 100mm per ogni mezza conchiglia e la seconda con una forma prossima a quella del getto e uno spessore di circa 50mm. Tra le due prove non si sono osservate notevoli variazioni, se non un aumento di temperatura in prossimità della parte centrale della conchiglia unitamente ad una diminuzione della stessa in corrispondenza dei bordi.

Infine, è stata svolta un'ultima simulazione utilizzando un raffreddamento artificiale grazie a due tubazioni poste lateralmente alla piastra. Nelle tubazioni avviene il passaggio di acqua corrente a 15°C e questo permette di abbassare notevolmente la temperatura della conchiglia, con conseguenti miglioramenti a livello di tempi di solidificazione e di caratteristiche dei componenti. Questa analisi non è stata studiata a fondo in quanto gli effetti del raffreddamento artificiale sono già conosciuti e attualmente in uso e questa simulazione aveva il solo scopo di mettere in evidenza in quale ordine si debbano avere delle variazioni per poter valutare i benefici di una modifica al processo.

In conclusione, quindi, si può dire che la validazione della simulazione abbia avuto esito positivo sia per quanto riguarda la parte termica che la parte metallurgica. L'alleggerimento della conchiglia dato dalla diminuzione dello spessore, invece, non ha portato ad alcun beneficio, anche se sarebbe da analizzare l'effetto della modifica sulla deformazione della conchiglia. Per quanto riguarda la riduzione di tempi ciclo, invece, conviene fare uso di raffreddamento artificiale, che, abbassando la temperatura, permette anche di ottenere svariati miglioramenti.

9 Riferimenti

1. **Long, Lorenzo.** Gli elementi più abbondanti della crosta terrestre. *Ripley Believes*. [Online] gennaio 2022. [Riportato: 1 luglio 2022.] <https://it.ripleybelieves.com/most-abundant-elements-in-earth-s-crust-157>.
2. **Aluminum Company of Canada.** *Handbook of aluminum*. Canada : Aluminum Company of Canada, 1957.
3. *Industrial Aluminium Production: The Hall-Heroult Process Modelling*. **Ph. Mandin, R. Wüthrich, H. Roustan**. New Jersey : The Electrochemical Society, 2009.
4. *Foundry Industry in Sri Lanka*. **De Silva, Indika**. Sri Lanka : The Institution of Engineers, 2019.
5. **Vu, Dinh Tien.** How to cast aluminum: comparison of aluminum casting methods. *vietnamcastiron.com*. [Online] 2021. <https://vietnamcastiron.com/aluminum-casting-process/>.
6. **L. Iuliano, J. Alva, G. Campana, E. Caruso, E. Flamigni, C. Fragrassa, E. Gabellich, A. Gatto, A. Ghidini, C. Giardini, N. Gramegna, G. Magistrali, A. Panvini, M. Rosso, A. Salmi, M. G. Violante.** *Manuale della fonderia*. Milano : Tecniche Nuove, 2007.
7. **M. R. Ghomashchi, A. Vikhrov.** Journal of Materials Processing Technology. *Squeeze Casting: an overview*. Amsterdam : Elsevier, 2000. Vol. volume 101, 1-3.
8. **Ashby, Michael F.** Chapter 14 - Case Studies: Process Selection. *Materials Selection in Mechanical Design*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2011.
9. **Sanders, Willy.** What is Optical Emission Spectroscopy (OES)? *www.hha.hitachi-hightech.com*. [Online] 2017. [Riportato: 5 7 2022.]
10. **1780-1, EN.** Aluminium and aluminium alloys - Designation of alloyed aluminium ingots for remelting, master alloys and castings. *Part 1 - Numerical designation system*. London : British Standard, 2002.
11. **1780-2, EN.** Aluminium and aluminium alloys - Designation of alloyed aluminium ingots for remelting, master alloys and castings. *Part 2: Chemical symbol based designation system*. London : British Standard, 2002.
12. **Veschi, Daniele.** *L'alluminio e le leghe leggere*. Milano : Hoepli editore, 1989.
13. **Glazoff, Michael V. Khvan, Alexandra V. Zolotarevsky, Vadim S. Belov, Nikolai A. Dinsdale, Alan T.** *Casting Aluminum Alloys - Their Physical and Mechanical Metallurgy (2nd Edition)*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2019.
14. **Marco V. Boniardi, Andrea Casaroli.** L'alluminio e le sue leghe. *www.fa-fe.com*. [Online] 2013. [Riportato: 5 7 2022.]
15. **ASM Handbook Committee.** *ASM Handbook - Casting Volume 15*. Ohio : ASM International - The material Information Company, 1998.
16. **Campbell, John.** *Complete Casting Handbook*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2015.
17. **S. Lombardo, E. Fracchia, F. S. Gobber, M. Rosso.** Gestione delle conchiglie nella colata in gravità e possibili vie per migliorarne prestazioni e durata. *La metallurgia italiana*. 6, 2019.
18. **Vadim S. Zolotarevsky, Nikolai A. Belov, Michael V. Glazoff.** *Casting Aluminum Alloys*. Amsterdam : Elsevier, 2007.
19. **Sangiorgi Cellini, Giovanni.** Ricerca e sviluppo di tecniche integrate basate sull'analisi termofluidodinamica dei processi fusori e sull'analisi strutturale per la progettazione di componenti in

alluminio ad alte prestazioni. *[tesi di dottorato di ricerca]*. Bologna : Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, 2008.

20. **ESI Group**. ProCAST user manual. [Online] 2006.

21. **B. Zhang, M. Garro, S. Guelfo, M. Rosso**. Studio della distanza interdendritica (DAS) in teste cilindri prodotte tramite colata in gravità con differenti leghe di alluminio. *la metallurgia italiana*. 6, 2005.

22. **3251, UNI**. Esame macroscopico dei materiali metallici non ferrosi. *Preparazione delle superfici di alluminio e di leghe di alluminio - Reattivi di attacco*. Milano : UNIMET.

23. **ASTM E340-15**. Standard practice for macroetching metals and alloys. Pennsylvania : ASTM International, 2015.

24. **Gianotti, Elio**. Alluminio e sue leghe. *www.gianottielio.it*. [Online] 2006. [Riportato: 5 7 2022.]