

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in Tecnologia Meccanica

Progettazione del processo fusorio per la realizzazione
di cilindro per motore a combustione interna a due tempi

CANDIDATO
Federico Cimatti

RELATORE
Prof. Lorenzo Donati
CORRELATORE
Prof. Ivan Todaro

Anno Accademico 2017/2018

Indice

Indice.....	2
Introduzione.....	4
1. Le le leghe di alluminio e le tecnologie fusorie	6
1.1 Leghe di alluminio.....	6
1.2 Tipi di processo fusorio.....	8
1.3 Motte e anime.....	13
1.4 Difetti comuni sui getti di fusione.....	14
2. Il progetto in studio.....	17
2.1 Cenni sulla progettazione del componente.....	17
2.2 Scelta della lega di alluminio.....	25
2.3 Scelta del processo fusorio.....	28
2.4 Modellazione del grappolo di fusione mediante CAD 3D.....	29
3. Simulazioni FEM.....	34
3.1 Analisi della colata con tecniche FEM.....	34
3.2 Simulazione termodinamica.....	35
3.3 Iterazioni delle simulazioni termodinamiche e modifiche al grappolo di fusione volte all'eliminazione di cause di difettosità.....	48
3.4 Simulazione fluidodinamica.....	63
3.5 Geometria definitiva del grappolo di fusione.....	67
4. Definizione delle geometrie finali di anime e modelli.....	69
4.1 Progettazione del sistema di anime.....	69
4.2 Progettazione dei modelli.....	79
4.3 Stazione di colata.....	82
4.4 Proposte per la realizzazione delle attrezzature.....	85
5. Conclusioni.....	96
Appendice.....	98
Bibliografia.....	101
Ringraziamenti.....	102

Introduzione

La tecnologia del motore a combustione interna è oggi già molto matura, tanto che perfino i centri di ricerca delle grandi aziende che operano nel settore, faticano ogni giorno di più ad apportare migliorie consistenti a questo tipo di macchine. Prendendo in considerazione la classe dei propulsori ad accensione comandata cosiddetti a “due tempi”, probabilmente questa affermazione è ancor più vera perché, proprio la loro semplice architettura, pone dei limiti intrinseci alle prestazioni ottenibili. Per questa ragione non è strano che tale architettura dei propulsori perda ogni giorno più interesse da parte del mondo industriale dei veicoli a motore, rimanendo così sempre più relegata a sopravvivere in settori di nicchia (motociclette, kart, minimoto, ecc...) o per usi minori diversi da quelli del trasporto di persone (prevalentemente attrezzature agricole e forestali).

In riferimento proprio al mondo delle due ruote, ancora oggi è abbastanza consolidato il mercato dei ciclomotori a cambio automatico, che, con migliaia di immatricolazioni ad ogni anno, risulta la causa principale di una pari numerosità di veicoli di seconda mano dal prezzo più che modesto. Questa relativa economicità, non solo dei mezzi usati, ma anche per quel che riguarda i pezzi di ricambio, fa sì che un buon numero di appassionati si dedichi all'elaborazione di scooter per poi utilizzarli in aree private a scopo puramente ricreativo. In un'ottica di questo tipo, una delle modifiche più frequentemente apportate con il fine di accrescere la potenza erogata, è l'aumento di cilindrata mediante l'installazione di un gruppo termico ad alesaggio maggiorato al posto di quello originale; tale componentistica è ovviamente un qualcosa di disponibile sul mercato e che può essere acquistato presso produttori specializzati per cifre che vanno da diverse decine a diverse centinaia di euro a seconda dei casi. Non essendo i prezzi in questione propriamente irrisori, e visto anche il piacere per la sperimentazione, un appassionato di quelli citati poc'anzi ha pensato di provare a realizzare in proprio un cilindro che, montato sulla sua motocicletta, potesse migliorarne le prestazioni. Certo questa persona non vuole avere la pretesa di far meglio dei professionisti, ma perlomeno gratificarsi con la soddisfazione di apporre il proprio nome su un qualcosa con caratteristiche comparabili ai prodotti dozzinali di media-alta fascia. Alla luce di ciò, la richiesta del committente è stata quella di essere assistito durante tutto l'iter di progettazione del nuovo componente, e in particolar modo per quel che riguardava il processo di

fabbricazione, che per la natura stessa del pezzo include l'uso di un processo fusorio che sarà oggetto di trattazione dettagliata nei seguenti capitoli.

Per completezza d'informazione, si riporta il fatto che nessun approccio ingegneristico è stato applicato nella definizione delle forme dei condotti di scarico, di travaso e di raffreddamento e, similmente, non sono state eseguite verifiche di resistenza strutturale di alcun genere lasciando questi aspetti al buon senso e all'esperienza del cliente in quanto da lui specificamente voluto.

Capitolo 1

Le le leghe di alluminio e le tecnologie fusorie

1.1 Leghe di alluminio

L'alluminio, inteso come metallo puro, presenta caratteristiche meccaniche e tecnologiche abbastanza scadenti per gli impieghi nelle costruzioni, dunque viene praticamente sempre additivato con altri elementi chimici allo scopo di mettere in risalto alcune delle sue proprietà. I leganti impiegati più diffusamente sono Cu, Si, Mg, Zn e Mn, aggiunti sia singolarmente, a formare leghe binarie, che più di uno per volta nel caso di leghe complesse, naturalmente le possibilità per la scelta della composizione sono illimitate, tuttavia la normativa indica alcune di esse come unificate e quindi facilmente reperibili sul mercato. La designazione viene fatta secondo due diverse metodologie: la prima secondo la normativa UNI EN 573-3:2013 discendente dalla alfanumerica americana "AA" si riferisce ai materiali da impiegarsi per deformazione plastica, la seconda invece segue le direttive della UNI EN 1706:2010 e contempla le leghe per fonderia identificate non secondo una suddivisione per tipologia, ma riportando la precisa composizione chimica (Tabella in appendice); d'ora in avanti si farà riferimento solo a quest'ultima codifica poiché si tratta di quella che di fatto risulta attinente al processo di fabbricazione oggetto di studio.

Esaminando le tabelle ci si rende immediatamente conto che, per impieghi di fonderia, dei cinque leganti più comuni, se ne utilizzano essenzialmente tre: rame, silicio e magnesio.

Il rame contribuisce principalmente ad aumentare il carico di snervamento e la durezza, sia a freddo che a caldo, tanto più quanto più è elevato il suo tenore, tuttavia non si può eccedere il 12% pena una eccessiva fragilità, la sua presenza rende inoltre il pezzo temprabile e migliora la lavorabilità all'utensile. Di contro rende il materiale molto poco saldabile, peggiora la resistenza alla corrosione e, se contenuto in misura inferiore al 2%, riduce la colabilità e aumenta la fragilità in fase di ritiro, per queste ragioni, nelle leghe per fonderia, il suo quantitativo varia circa tra il 4 e il 10%.

Il silicio, in percentuali dal 2 al 14% circa, conferisce ad una lega di alluminio un aumento del carico di snervamento e della durezza senza portarle infragilimento, non modifica la

resistenza alla corrosione ma soprattutto migliora significativamente la colabilità. Il suo effetto collaterale più evidente è il fatto che porta ad una riduzione della lavorabilità all'utensile.

Il magnesio fondamentale porta ad avere una buona resistenza alla corrosione senza però far registrare alcun beneficio sulle proprietà meccaniche, la sua presenza generalmente peggiora la colabilità quindi, nelle composizioni destinate alla fonderia, è in piccole quantità. Se le percentuali invece dovessero essere considerevoli, sicuramente si tratterebbe di un caso particolare in cui, o i getti devono essere posti in servizio in ambienti aggressivi come quello marino, oppure si vuole, in combinazione con il silicio, costituire una lega da trattamento termico. Usualmente il tenore tipico sta tra il 3 e il 10% circa.

Altri eventuali elementi, come si evince dalle basse percentuali, sono generalmente impurezze o comunque aggiunti con scopi di secondaria importanza.

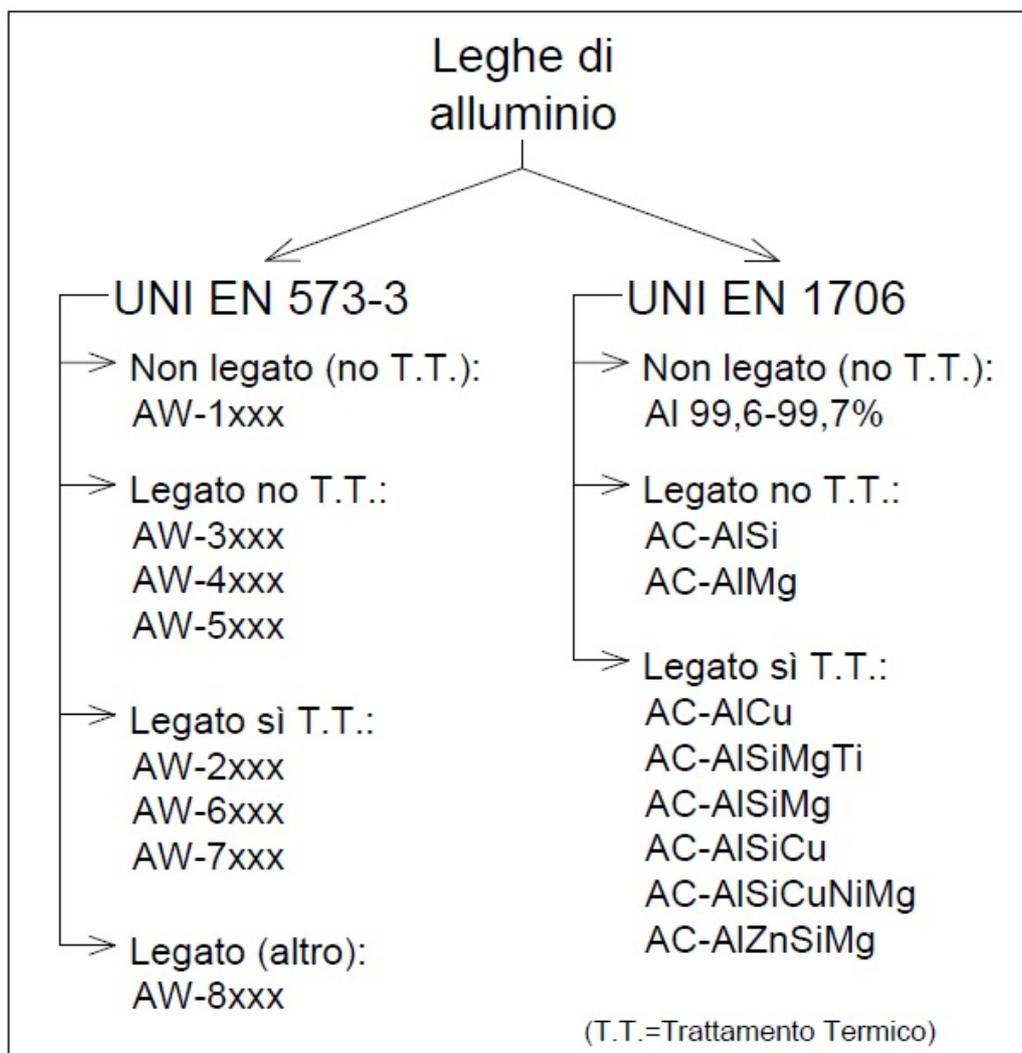


Figura 1: designazioni delle leghe di alluminio, schema di sintesi

Le proprietà meccaniche delle leghe per fonderia sono classificate dalla norma, oltre che per la singola lega, anche per come essa viene colata (fusione in terra, in conchiglia, pressocolata, ecc...), a titolo di esempio, per il processo in sabbia, si hanno carichi di snervamento che vanno da 70 a 225MPa e durezza Brinell da 50 a 110MPa in funzione della composizione e dei trattamenti termici eventualmente subiti. Questi ultimi, in particolare vengono generalmente eseguiti per aumentare le proprietà meccaniche sfruttando il meccanismo dell'indurimento per precipitazione. Il processo, per la sua messa in atto, inizia generalmente da uno stato metallurgico in cui, vicino al bordo dei grani di alluminio, sono depositati coaguli di composti duri derivanti da legami chimici tra lo stesso alluminio e alcuni leganti. La prima fase consiste in un riscaldamento oltre la temperatura di solubilizzazione (caratteristica della singola lega) seguito da un veloce raffreddamento, in questo modo si ha un ridiscioglimento del precipitato depositato a bordo grano e una sua diffusione più o meno omogenea in tutto il volume del pezzo che viene "congelata" dalla rapida diminuzione di temperatura. Il secondo passaggio, successivo a quello di solubilizzazione, è quello dell'invecchiamento, ossia si torna a fornire al pezzo una piccola quantità di energia termica che permetta la precipitazione intergranulare di composti tali e quali a quelli precedentemente disciolti, solo, in questo caso, essi risultano molto fini e uniformemente distribuiti nella matrice di alluminio puro, quindi adatti ad aumentare la durezza media globale del materiale. Va precisato che è buona norma non eccedere con il tempo e la temperatura del ciclo di invecchiamento perché il rischio sarebbe quello di trovarsi in una situazione simile a quella di partenza, cioè con precipitati duri coagulati il che non è utile al fine del miglioramento delle caratteristiche di resistenza. In alcuni casi è anche possibile eseguire invecchiamento naturale, cioè attendere un certo periodo di tempo prima della messa in uso del pezzo così da sfruttare i naturali processi di diffusione attivi anche a temperatura ambiente, in questo modo si ha un risparmio in termini energetici ma un tempo del ciclo di produzione molto più lungo.

Nel mondo industriale sono stati definiti dieci diversi cicli termici che coprono tutte le possibili declinazioni del trattamento di indurimento per precipitazione, essi vengono indicati apponendo alla designazione del materiale, la dicitura "T" più un numero da 0 a 10, precisamente:

- T0: ricottura
- T1: raffreddamento dalla temperatura di lavorazione (a caldo) e invecchiamento naturale

- T2: raffreddamento dalla temperatura di lavorazione (a caldo), incrudimento e invecchiamento naturale
- T3: solubilizzazione, incrudimento e invecchiamento naturale
- T4: solubilizzazione e invecchiamento naturale
- T5: raffreddamento dalla temperatura di lavorazione (a caldo) e invecchiamento artificiale
- T6: solubilizzazione e invecchiamento artificiale
- T7: solubilizzazione e iperinvecchiamento
- T8: solubilizzazione, incrudimento e invecchiamento artificiale
- T9: solubilizzazione, invecchiamento artificiale e incrudimento
- T10: raffreddamento dalla temperatura di lavorazione (a caldo), incrudimento e invecchiamento artificiale

Altre codifiche vengono inoltre utilizzate per indicare stati di trattamento diversi da quello di indurimento per precipitazione, nello specifico:

- F: nessun trattamento (proprietà meccaniche dipendenti dalle lavorazioni precedenti)
- W: solubilizzato
- H: incrudito
 - H1x: semplicemente incrudito
 - H2x: incrudito e parzialmente ricotto
 - H3x: incrudito e ricotto a bassa temperatura (125°C circa)
 - H4x: incrudito e verniciato

“x” assume valori interi da 0 a 9 in proporzione al livello di incrudimento, a 0 corrisponde lo stato ricotto, a 9 un estremo incrudimento, da 1 a 8 si hanno, ovviamente, tutti gli stadi intermedi.

1.2 Tipi di processo fusorio

Le tipologie di processo fusorio sono molteplici e hanno tutte in comune il fatto che il getto viene realizzato partendo da una massa di metallo fuso, l'unico modo per differenziarle dunque è in base a come il liquido viene condotto alla solidificazione per formare l'oggetto desiderato. La prima grande distinzione si fa sul fatto che lo stampo sia riutilizzabile oppure

debba essere distrutto per consentire l'estrazione del getto: nel primo caso l'attrezzatura in cui avviene la colata del metallo è in acciaio o ghisa e presenta costi di realizzazione elevati ammortizzabili solo su lotti di diverse migliaia di pezzi; nel secondo invece, essendo in sabbia, la sua costruzione è più economica, dunque tale tecnologia è utilizzabile anche per piccoli lotti (Figura 1). La seconda maggiore discriminante invece riguarda il modo di eseguire il riempimento, ovvero, si separano i processi che funzionano per gravità da quelli che sfruttano un qualche artificio per pressurizzare il metallo liquido costringendolo nello stampo.

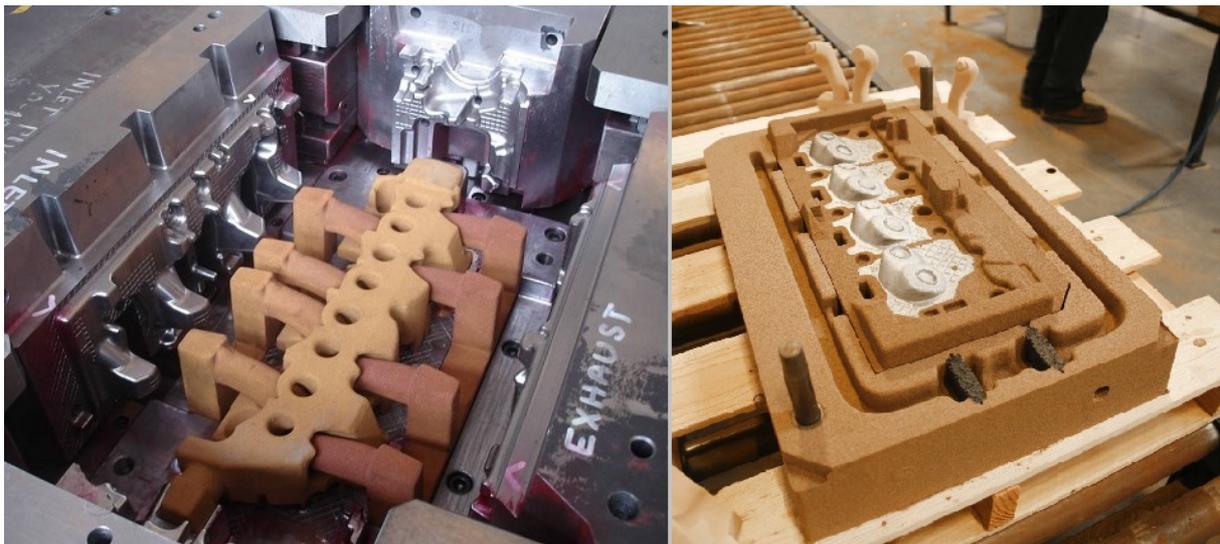


Figura 1: stampo permanente metallico con anime in sabbia a perdere (a sinistra) e forma transitoria completamente in terra (a destra)

Considerando che il componente oggetto di questa trattazione dovrà essere realizzato in un numero molto contenuto di esemplari, si decide fin d'ora di non prendere in considerazione tutti quei processi che fanno uso di forme permanenti e riempimento forzato, ossia che per i loro costi risulterebbero giustificati solo per grandi volumi produttivi. Ciò detto, quel che rimane, sono essenzialmente i processi fusori a gravità con stampo in terra le cui varie declinazioni sono funzione del tipo di sabbia o del tipo di additivo agglomerante utilizzato.

Colata in terra verde

Lo stampo è realizzato in sabbia silicea a granulometria controllata additivata di betonite e acqua, essa viene compattata all'interno di una staffa a ricalcare la forma di un modello le cui sembianze sono quelle del getto finito. Una volta realizzati i gusci, il modello viene rimosso e si esegue l'assemblaggio delle diverse parti costituenti la forma (Figura 2) così da delimitare il volume che andrà riempito di metallo fuso; per realizzare particolari con cavità si possono eventualmente inserire anche delle anime. Il procedimento di costruzione dello stampo è



Figura 2: assemblaggio di due motte in terra verde, visibile, di colore chiaro, le anime

relativamente poco costoso se analizzato solo per quel che riguarda la manifattura delle parti in sabbia, questo perché può anche essere svolto senza l'impiego di attrezzature particolari. Quel che invece comporta l'esborso più ingente è la costruzione dei modelli e delle casse d'anima che, a loro volta, servono per fabbricare motte e anime. Le tolleranze ottenibili sono dell'ordine del millimetro e le rugosità superficiali non particolarmente buone, la dimensione dei getti realizzabili può essere resa considerando che la massa di questi generalmente sta tra 1kg e diverse tonnellate, in questi ultimi casi a volte la sabbia viene additivata di cemento per ottenere una forma abbastanza resistente da non rompersi sotto la spinta metallostatica. Un problematica non trascurabile di questo sistema di lavorazione è la presenza di acqua nella sabbia, la quale può portare al nascere di porosità per l'inglobamento del vapore derivante dalla sua vaporizzazione.

Colata in sabbia legata secondo processo a CO₂

La forma viene costruita in sabbia silicea (sabbia di zircone o cromite per esigenze particolari) di granulometria ben definita a cui viene aggiunta una quota del 3-6% di silicato di sodio (Na₂SiO₃). Come per il processo "a verde", si esegue una compattazione dell'impasto a base di inerte all'interno di una cassa sul fondo di cui è fissato il modello così da realizzare un guscio recante un'impronta con le forme del pezzo. Non appena la cassa risulta riempita in modo soddisfacente, si procede ad iniettare attraverso la porosità della terra compattata una corrente

di anidride carbonica (CO_2), questa si combina quasi istantaneamente con il silicato di sodio a formare bicarbonato di sodio (Na_2CO_3) e silice (SiO_2) che conferiscono immediata durezza alla massa di sabbia, a questo punto motta e modello possono essere separati (Figura 3).

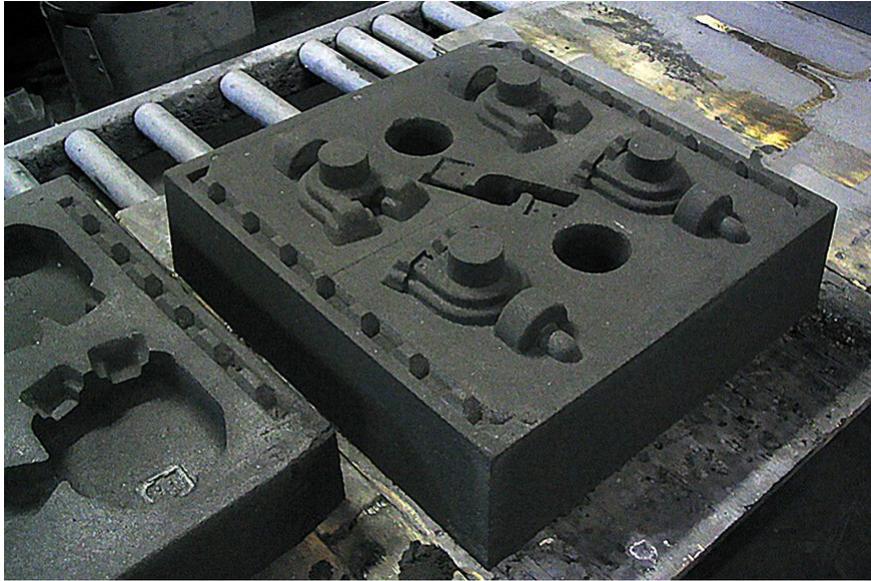


Figura 3: motte realizzate con processo a CO_2 , si notino l'assenza di staffe e i riferimenti per la chiusura dello stampo ricavati direttamente nella sabbia

Le proprietà meccaniche che si ottengono sul getto sono generalmente migliori rispetto al processo “a verde” perché il rischio di inglobamento di sabbia distaccata dalle pareti è molto basso, la quantità limitata d'acqua contenuta nella terra rende più improbabile il nascere di porosità per l'inglobamento di vapore e, infine, la maggior conducibilità termica dello stampo conduce a velocità di raffreddamento più elevate, quindi a un grano più fine del materiale costituente il fuso. I pesi massimi dei getti sono dell'ordine di decine di chili, le tolleranze dimensionali possono essere anche poco inferiori al millimetro e la rugosità risulta più o meno bassa a seconda della finezza della sabbia. Chiaramente questo metodo si presta molto bene per costruire non solo le motte, ma anche le anime; naturalmente, lo svantaggio rispetto al sistema tradizionale risiede nel maggior costo derivante dalla necessità di impiegare macchine specifiche per la preparazione degli impasti e per il “curing” della sabbia dopo la sua formatura.

Colata in sabbia legata secondo processo “cold box”

L'impasto utilizzato per la manifattura delle motte ed eventuali anime è composto generalmente da sabbia silicea (zircono o cromite per impieghi particolari) miscelata con resine fenoliche, epossidiche e ureiche. La formatura, come di consuetudine, viene fatta con

l'aiuto di cassette, le quali, una volta riempite della terra, subiscono una iniezione di catalizzatore chimico in forma gassosa che ha il compito di condurre i leganti a polimerizzazione. Per finire si estrae la parte in sabbia dal rispettivo stampo senza bisogno di maneggiarla con eccessiva cautela poiché dotata di una certa resistenza strutturale (Figura 3).



Figura 4: stampo realizzato in sabbia legata secondo processo "cold box", evidente l'elevata qualità della finitura superficiale e l'assenza delle staffe

Si raggiungono generalmente tolleranze, grado di finitura, proprietà meccaniche nonché dimensioni e pesi dei getti paragonabili a quelli ottenuti con il sistema a CO₂ con il vantaggio che l'uso di resine polimeriche consente di realizzare anime più complesse senza incorrere nel rischio che possano rompersi sotto l'azione della spinta metallostatica. I costi non sono esattamente irrisori anche perché, oltre a dover maneggiare sostanze di una certa complessità chimica, la sabbia risulta difficilmente riciclabile.

Colata in sabbia legata secondo processo "hot box"

Si tratta di una terza variante di processo in sabbia legata dove, come agglomerante, si utilizzano resine ureiche e fenoliche che, dopo una fase di polimerizzazione, conferiscono una migliore resistenza meccanica alle motte e alle anime. Gli inerti impiegati sono sempre sabbia silicea, di zircone o cromite come nel caso "a freddo" e pure la fase di formatura in cassetta non vede sostanziali differenze, quel che invece giustifica la denominazione "a caldo" è il fatto che la fase di curing necessita di essere eseguita ad alta temperatura. In un primo momento, infatti, l'intera cassa di formatura piena di sabbia va posta in forno per avere una prima coesione dell'impasto che permetta di eseguire la sua estrazione dal relativo stampo. In

seguito si esegue una seconda cottura che ha il compito di portare a completamento la polimerizzazione della resina e di estrarre tutta l'umidità residua. Si possono naturalmente prevedere delle anime per realizzare oggetti con cavità. Le dimensioni, le proprietà meccaniche del getto, le tolleranze dimensionali e la rugosità sono paragonabili alla soluzione “cold box” o di poco superiori per la completa assenza di acqua in gusci e anime al momento della colata e per una durezza superficiale dello stampo ancora più elevata. I costi sono chiaramente superiori rispetto al caso in cui l'agglomerante polimerizza a temperatura ambiente poiché, oltre ad impianti per la miscelazione, la formatura e lo smaltimento della terra esausta, servono anche forni per la fase ad alta temperatura.



Figura 5: anime realizzate con tecnologia "hot box", si notano le sfumature brune derivanti dalla cottura in forno

Colata con processo “shell molding”

Rappresenta una ulteriore declinazione dell'utilizzo della sabbia legata con additivi resinosi polimerizzanti ad alta temperatura, in questo caso le attrezzature per la costruzione delle parti dello stampo devono necessariamente essere metalliche perché devono essere riscaldate a 2-300°C prima che su di esse venga colato l'impasto di inerti. Tale pratica fa sì che la sabbia depositata nelle immediate vicinanze della superficie del modello inizi, nel giro di breve tempo, ad indurire con una progressione del fenomeno che segue la naturale diffusione termica. Non appena risulta formato un guscio di sufficiente spessore l'eccedenza di terra viene eliminata e si separa il corpo in materiale refrattario dal relativo modello (Figura 6). Essendo l'inerte usato sabbia silicea a grani sferoidali, la permeabilità dello stampo consente molto bene la fuoriuscita dei gas in fase di colata, il suo spessore sottile porta ad ottenere elevate velocità di raffreddamento e le tolleranze nonché la qualità della finitura sono buone

considerato che appartengono ad fusio. Le controindicazioni stanno nel fatto che il presente procedimento non può essere impiegato per pezzi molto grandi (non oltre 30kg) e nella non



Figura 6: coppia di gusci ottenuti mediante "shell molding", risultano già posizionate le anime, anch'esse realizzate con la stessa tecnica

riciclabilità della sabbia poiché essa viene additivata in modo troppo pesante per potersi sottoporre ad altri cicli, quest'ultima affermazione è, insieme alla necessità di impiegare modelli metallici, la causa dell'elevato costo di tale tecnologia produttiva.

Colata con processo a cera persa

Denominato anche microfusione, prevede la realizzazione di una copia in cera del getto che viene in seguito ricoperta di sabbia di zircone o allumina mescolata con resine a creare un rivestimento refrattario di una certa consistenza. L'estrazione del modello dalla forma viene fatta in forno, ove la cera si liquefà e viene drenata dalle cavità in cui verrà in seguito versato il metallo fuso. A valle di ciò, si esegue un secondo ciclo termico per completare la polimerizzazione dei leganti, indi si provvede alla colata vera e propria (Figura 7). Terminata la solidificazione, lo stampo viene distrutto per estrarre il getto che, generalmente, ha ottime qualità in termini di tolleranze dimensionali e grado di finitura. Le proprietà meccaniche risultano buone ma le dimensioni dei particolari ottenibili sono contenute nell'intorno di 1kg e i costi sono elevati a causa della realizzazione dello stampo con materiali pregiati non riutilizzabili. Da tenere in conto, anche il grande apporto di lavoro manuale specializzato necessario per la fabbricazione del modello in cera.



Figura 7: riempimento delle forme, si noti la conformazione a grappolo tipica del processo a cera persa

Colata con processo “lost foam”

Sostanzialmente è una versione molto povera del sistema a cera persa, infatti, anche in questo caso, il modello non è riutilizzabile perché viene distrutto all'atto del riempimento. La sequenza delle operazioni prevede di costruire un esemplare del grappolo di fusione in schiuma di polistirene, di rivestirlo di uno strato di refrattario per poi annegarlo in una staffa piena di terra che ha l'unico scopo di sostenere la spinta metallostatica. La colata si fa direttamente a bagnare la schiuma espansa ancora intrappolata nella motta che, esposta al calore del metallo fuso vaporizza lasciando la cavità necessaria per dare forma al getto.



Figura 8: a destra il modello in schiuma espansa da verniciare e annegare nella sabbia per l'esecuzione del getto, a sinistra il pezzo estratto dalla forma e rifinito

Risulta un procedimento veloce ed economico per costruire pezzi anche grandi (diverse tonnellate) grazie alla completa riciclabilità della sabbia, l'assenza di anime e della non necessità di risolvere i problemi di sottosquadro. La finitura superficiale e le tolleranze sono anche relativamente soddisfacenti, permane tuttavia il grosso problema dell'inclusione di gas derivanti dal disfacimento del modello che va ad influire negativamente sulle caratteristiche resistenziali del getto.

1.3 Motte e anime

Motte e anime, nell'ambito della fonderia, costituiscono le parti dello stampo refrattario necessario alla formatura del getto, limitatamente ai processi di colata con stampo a perdere, esse sono sempre realizzate con un impasto di inerti ed eventualmente leganti il quale viene modellato con l'aiuto di apposite attrezzature che gli conferiscono la forma desiderata. Per la costruzione delle motte, si fa uso di un modello, ossia di un solido con le sembianze del pezzo finito e che, talvolta, riporta su di sé anche alcuni volumi il cui compito è quello di imprimere nella terra le forme degli alloggiamenti destinati a sostenere le eventuali anime. Per esigenze di processo esso viene sempre utilizzato separato in due metà secondo il piano di divisione più congeniale e, volendo, ognuna di esse può essere fissata su una lastra dando forma alla cosiddetta “placca-modello”. Una simile soluzione risulta conveniente in caso di volumi di

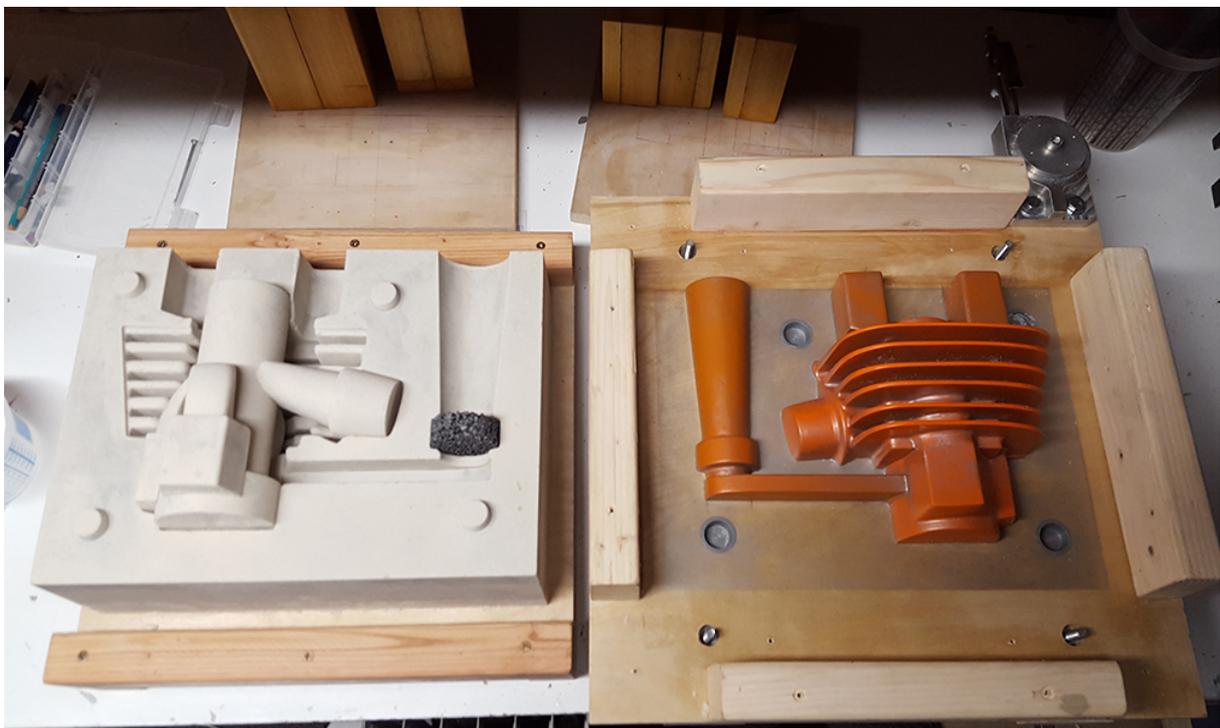


Figura 9: cassa modello disassemblata (a destra) e motta in fase di ramolaggio (a sinistra)

produzione medio grandi perché ogni placca viene dotata incastri che permettono un posizionamento ripetibile rispetto alle staffe, essendo poi le stesse staffe anche dotate di spine di riferimento che ne consentano un accoppiamento accurato l'una con l'altra, risulta possibile formare le due motte costituenti lo stampo in separata sede con la certezza che esse potranno poi essere unite nel modo corretto. Questo è quello che accade nel caso di formatura a verde, tuttavia c'è da dire che per le tecnologie che utilizzano sabbia legata, la staffa viene generalmente usata solo come ausilio per la compattazione dell'impasto e non segue la motta al ramolaggio o, addirittura, il modello giace direttamente sul fondo di una cassa che costituisce un vero e proprio stampo per i pezzi in terra (Figura 9). Per tale ragione, alle volte, si rende necessario integrare i riferimenti per l'assemblaggio direttamente sulle geometrie della motte, una simile soluzione, sebbene possa sembrare il contrario, non crea grossi problemi perché la consistenza della sabbia legata dopo l'indurimento è tale per cui incastri debitamente progettati consentono una sufficiente precisione nell'unione dei gusci.



Figura 10: anime di varia foggia e relative casse, su ognuna di esse si notano le linee di divisione e i fori per le spine di riferimento

Le anime vengono sempre prodotte avvalendosi di casse d'anima (Figura 10), cioè di stampi scomponibili in due o più parti che vengono riempiti con sabbia da fonderia (generalmente si usa sabbia legata), essendo spesso le forme da realizzarsi di una certa complessità geometrica,

non è strano vederle scomposte in più parti unite tra loro attraverso incastri e incollate al momento del ramolaggio.

La preparazione degli impasti oggi giorno viene eseguita praticamente sempre impiegando mescolatori meccanici, per la formatura invece, in alcuni casi, viene ancora sfruttata la tecnica manuale la quale può risultare economica nel caso di piccolissimi volumi produttivi quali le serie prototipali. Esistono tuttavia dei limiti che il sistema tradizionale non permette di superare agevolmente, per esempio la costruzione di anime dalle sembianze spiccatamente articolate; in queste situazioni la soluzione migliore è avvalersi di tecniche di riempimento cosiddette a “sabbia sparata” che utilizzano aria compressa per trasportare in sospensione la terra fin dentro gli anfratti più remoti dello stampo. Il prezzo dell'utilizzo di un simile procedimento non sta tanto nel maggior costo della singola parte prodotta impiegando un impianto complesso (Figura 11), quanto piuttosto nella necessità di fornire all'animista delle cassette che si possano accoppiare a tenuta ermetica con la bocca di sparo, che riportino fori di sfiato per l'aria e che risultino di dimensioni compatibili con la morsa di presa della macchina formatrice.

Naturalmente esistono processi di formatura meccanizzata anche per le motte ma c'è dire che generalmente essi sono impiegati per ragioni di economia di scala e non per reali necessità



Figura 11: macchina spara anime, nel modulo centrale su apposito ripiano va alloggiata la cassa da riempirsi tramite l'ugello posizionato superiormente

tecniche, quindi risultano di scarso interesse ai fini del presente studio perché quest'ultimo riguarda un componente da prodursi solo in un numero limitato di pezzi.

1.4 Difetti comuni sui getti di fusione

Molteplici sono le casistiche, si riportano di seguito quelle più comunemente riscontrate nei processi industriali.

Riempimento incompleto

Si dice del caso in cui il getto presenti ammanchi macroscopici di materiale che sono in genere dovuti a due motivazioni, la prima è il dimensionamento non corretto del sistema dei canali di colata che, se non sufficientemente massivo, solidifica prima ancora che il metallo possa terminare di fluire a riempire ogni singolo anfratto dello stampo. La seconda è identificabile come la situazione in cui, nella geometria della forma, siano presenti punti da cui l'aria non riesce ad uscire spinta dalle forze di galleggiamento finendo con il dare luogo a sacche il cui volume non verrà occupato dal materiale fuso. Essendo questo genere di difetto figlio solo di un errore nella progettazione della stazione di colata, il modo migliore di risolverlo è una correzione a livello di design.

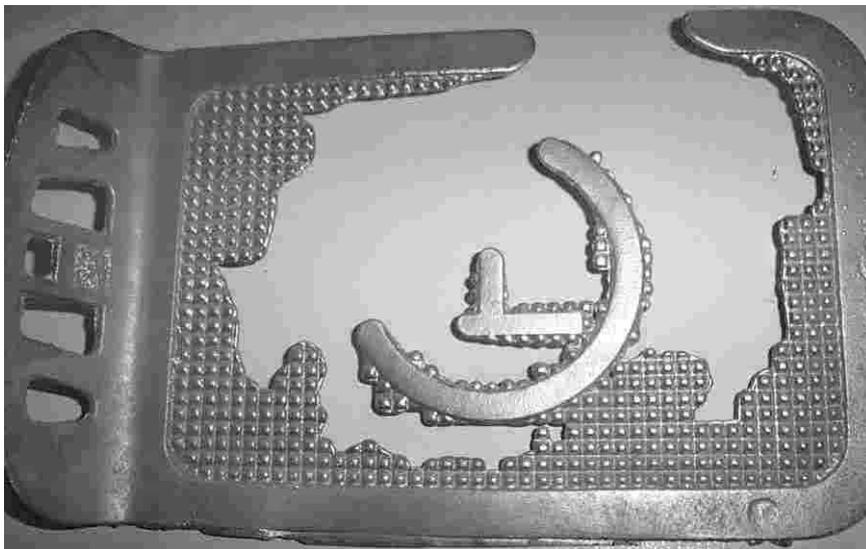


Figura 12: riempimento incompleto con ammanco di materiale nella zona centrale del getto

Porosità per inglobamento di gas

Si ha quando l'aria naturalmente disciolta all'interno del metallo in fase liquida, tende a segregarsi in bolle per via del sopraggiunto abbassamento di temperatura rimanendo intrappolata all'interno del cuore del getto oramai solidificato in superficie. L'entità di questa

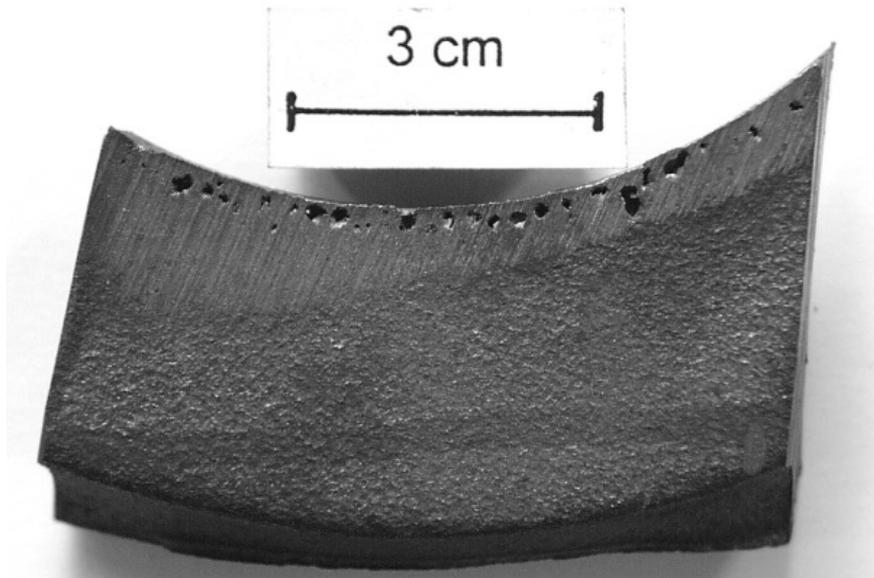


Figura 13: saggio del getto con presenza di porosità per inclusione di gas, si noti la forma tondeggiante delle cavità derivante da quella delle bolle

problematica dipende prevalentemente da se e quante occasioni ci sono per i gas atmosferici di venire in intimo contatto con la lega fusa, dunque, per limitarla, bisogna contenere il più possibile il moto caotico in fase di riempimento e favorire in egual misura la fuoriuscita dell'aria dalla forma. Nei casi in cui alcune parti dello stampo sono fatte in terra verde, dal contatto del metallo incandescente con le pareti, si può avere una nascita di vapore dall'umidità contenuta nella sabbia che sovente finisce col scindersi in ossigeno e idrogeno. Mentre il primo si lega all'alluminio formando una scoria vetrosa (non che sia desiderabile, ma perlomeno non porta a formazione di cavità), il secondo finisce quasi sempre in soluzione e, così come accade per l'aria, diviene causa di porosità le quali contribuiscono in modo significativo alla riduzione delle caratteristiche di resistenza.

Porosità da ritiro

Il processo di solidificazione del getto procede dalla superficie verso il cuore accompagnato da una contrazione termica. Nel momento in cui, al nucleo, l'ultima massa di metallo fuso cambia di stato con relativo ritiro, si ritrova ad occupare un volume inferiore rispetto a quello che aveva quando era liquida, ovvero a quello che il guscio solido circostante le aveva riservato. Non essendo tale guscio abbastanza cedevole per deformarsi recuperando l'ammancio di materiale, rimane una cavità al centro del pezzo che ne va far scendere le proprietà meccaniche. Questo tipo di difetto è intrinseco del processo di fonderia e affligge



Figura 14: porosità da ritiro localizzate prevalentemente sul montante ove si scorge anche il tipico cono

sempre l'ultima parte del getto che solidifica, cioè quella più massiva e dotata di maggior capacità termica. Poiché non è eliminabile, l'unica opzione percorribile è fare in modo che si manifesti in una zona dove non può causare danni, tipicamente quella delle materozze, che dopo l'apertura dello stampo viene separata dal pezzo vero e proprio e rottamata.

Cricche a caldo

Si tratta di fratture che insorgono durante la fase di solidificazione a causa dell'ingente ritiro a cui il materiale è soggetto, esse coinvolgono, chiaramente, solo la frazione di metallo già solidificato e possono, in certi casi, essere risolte anche dal sopraggiungere di altro liquido a riempire la crepa.

Questo tipo di difetto dipende prevalentemente dalla presenza di discontinuità geometriche nel getto, dunque può essere tenuto molto bene sotto controllo con una progettazione oculata della forma del componente. Altri fattori influenti sono comunque il tipo di materiale, la temperatura di colata e il dimensionamento del sistema di riempimento.

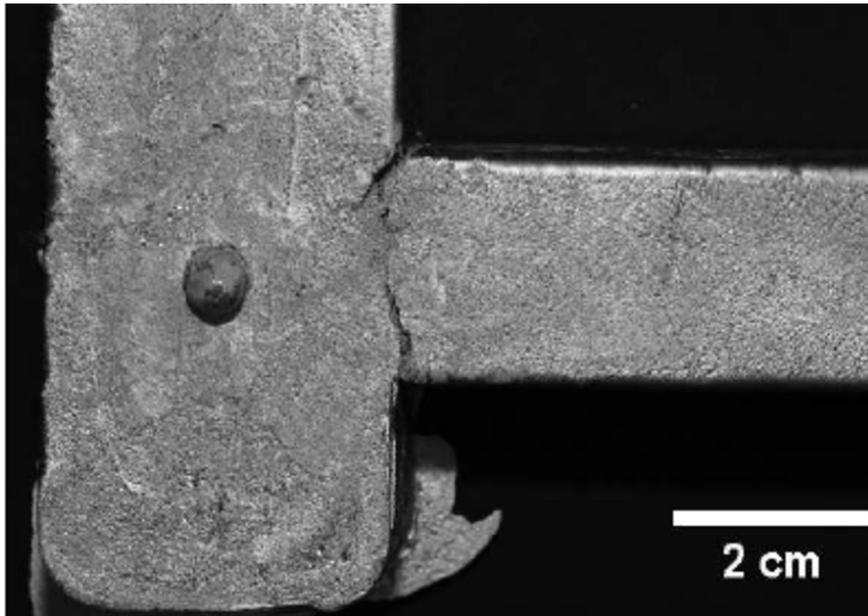


Figura 15: cricca a caldo propagata dalla discontinuità geometrica

Tensioni residue e cricche a freddo

Come conseguenza diretta dei ritiri in fase solida ci sono le tensioni residue che, nei casi peggiori, possono portare a deformazioni e cricche nelle zone del getto con grande discontinuità geometrica, è opportuno tenere conto di questo aspetto già in fase di progettazione del componente perché a livello di processo non è detto che si possa risolvere il problema, va comunque detto che un boccame ben dimensionato comunque aiuta nell'intento.

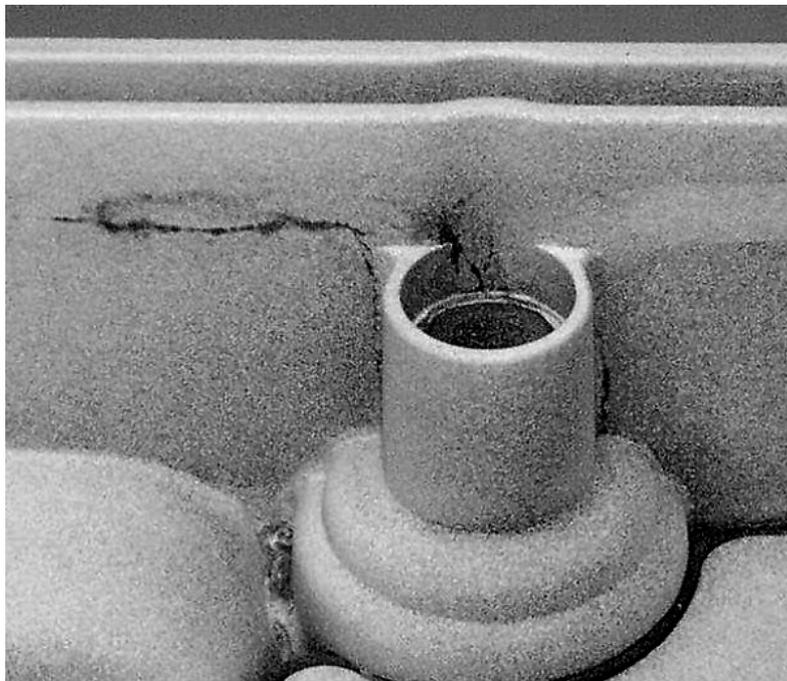


Figura 16: frattura originatasi nel punto caratterizzato da discontinuità geometrica

Inglobamento di inerti

Accade qualora non vi sia una buona pulizia dello stampo, un disgregamento della sua superficie o una cattiva rimozione delle scorie nel crogiolo, si può tenere sotto controllo prestando le dovute attenzioni nella fabbricazione della forma, durante il ramolaggio e il riempimento ed, eventualmente, inserendo un filtro ceramico sul canale di colata.



Figura 17: inclusione di inerti, la porosità di maggior estensione ne è la conseguenza (la scoria che ha causato il difetto è stata rimossa)

Grano grossolano

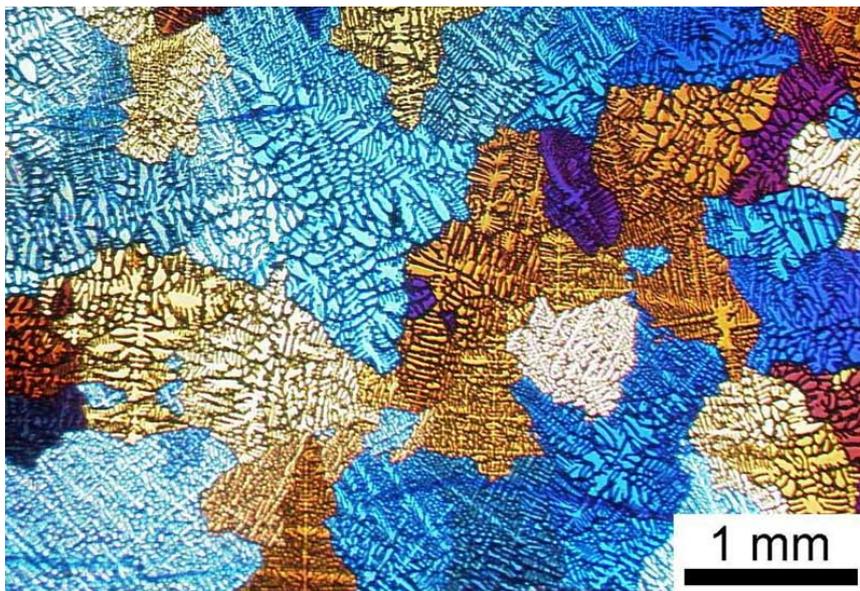


Figura 18: tipica struttura dendritica di un getto in lega di alluminio, evidenziati con diversi colori i grani metallurgici

La formatura da liquido è un processo che intrinsecamente produce grano grosso perché è oggettivamente impossibile raffreddare il getto con velocità elevate, tuttavia, qualora si richiedano particolari caratteristiche di resistenza strutturale può essere necessario tenere sotto controllo tale parametro. In questi casi bisogna studiare meticolosamente i tempi di raffreddamento del pezzo prendendo eventualmente particolari accorgimenti nella costruzione dello stampo, così da accorciarli a sufficienza. A titolo di esempio, alcune delle soluzioni più ricorrenti, sono l'inserimento di raffreddatori metallici nella forma o l'uso di sabbia di cromite per la costruzione di alcune delle sue parti.

Risulta quasi superfluo notare che il processo deve essere progettato in modo da scongiurare il più possibile la presenza delle sopracitate anomalie, tradizionalmente questa pratica era affidata all'esperienza del modellista e ad approssimazioni successive frutto di prove sul campo. Oggigiorno, grazie all'ausilio dei simulatori di processo e qualche buon consiglio, tale attività può anche essere approcciata da un tecnico non propriamente esperto del mestiere in modo proficuo.

Capitolo 2

Il progetto in studio

2.1 Cenni sulla progettazione del componente

La prima fase del lavoro ha riguardato la progettazione non del processo fusorio, bensì del componente vero e proprio; questo perché il committente non era in possesso di un disegno già ben definito, ma solo di una quantità non meglio precisata di schizzi fatti a mano libera e vecchie parti rottamate e sezionate da cui prendere spunto. Si è quindi cominciato con il definire le specifiche di progetto, in particolare il nuovo cilindro doveva:

- essere compatibile con i due basamenti più diffusi sul nostro territorio, ovvero quelli prodotti da “Piaggio & C. s.p.a.” e da “Motori Minarelli s.p.a” per cilindrata di 50cm³;
- poter consentire l'assemblaggio e il funzionamento del motore con diverse configurazioni della geometria del manovellismo di spinta (in particolare ci si riferisce alla lunghezza della biella e al raggio di manovella) modificando di volta in volta solamente alcune delle lavorazioni meccaniche di finitura;
- potersi prestare per la realizzazione in diverse configurazioni di cilindrata comprese tra 70 e 100cc a seconda del diametro che veniva prescritto per l'alesaggio della canna;
- essere realizzato interamente in lega di alluminio;
- essere costruito in modo da funzionare con precise fasature di apertura e chiusura delle luci di travaso;
- potersi accoppiare con il motore ricevente riducendo al minimo le modifiche da eseguire sul relativo basamento;
- essere dotato di circuito di raffreddamento a liquido.

Seppur le richieste del cliente di fatto non fossero molte, alcune di esse erano piuttosto insolite, a partire, se non altro, dal voler realizzare un solo componente che potesse sposarsi con due motori tra loro diversi. Per verificare se la cosa fosse effettivamente fattibile e scongiurare il più possibile qualsiasi altro tipo di errore progettuale che potesse impedire l'assemblaggio, si è provveduto ad eseguire un rilievo delle dimensioni dei due basamenti Piaggio (Figura 19) e Minarelli (Figura 20), così facendo è stato possibile realizzare uno

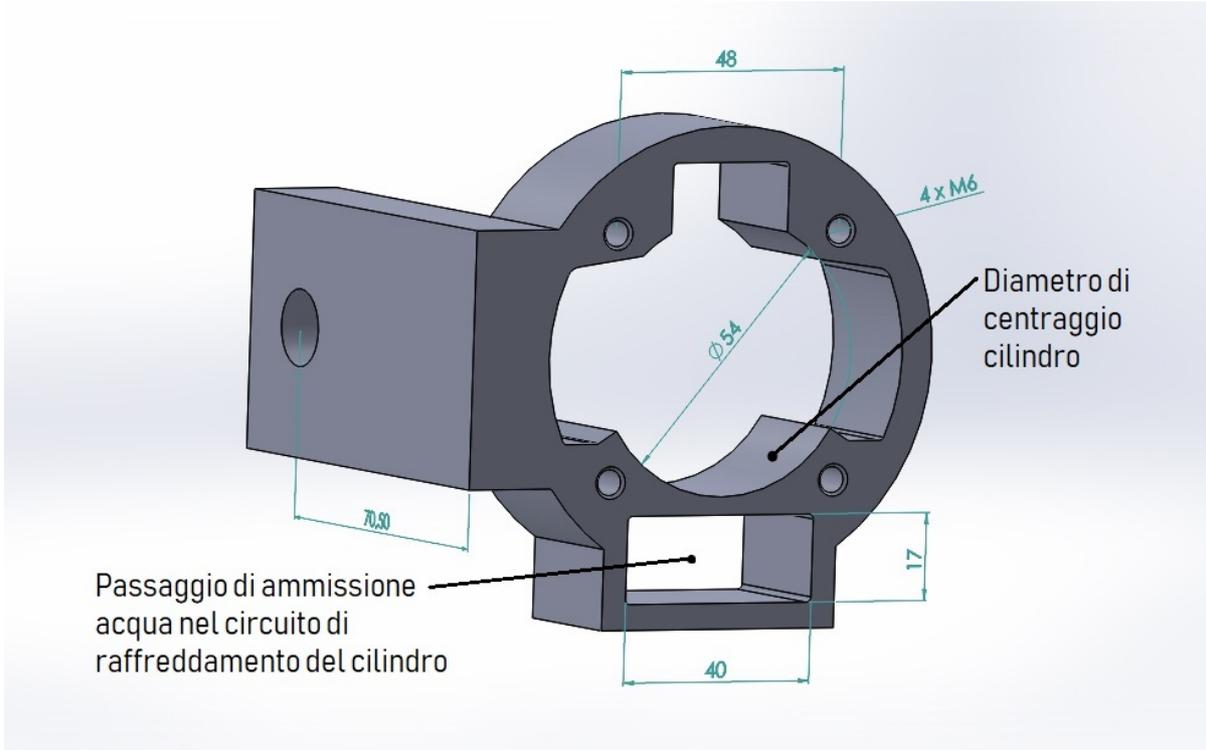


Figura 19: basamento Piaggio (rappresentazione schematica)

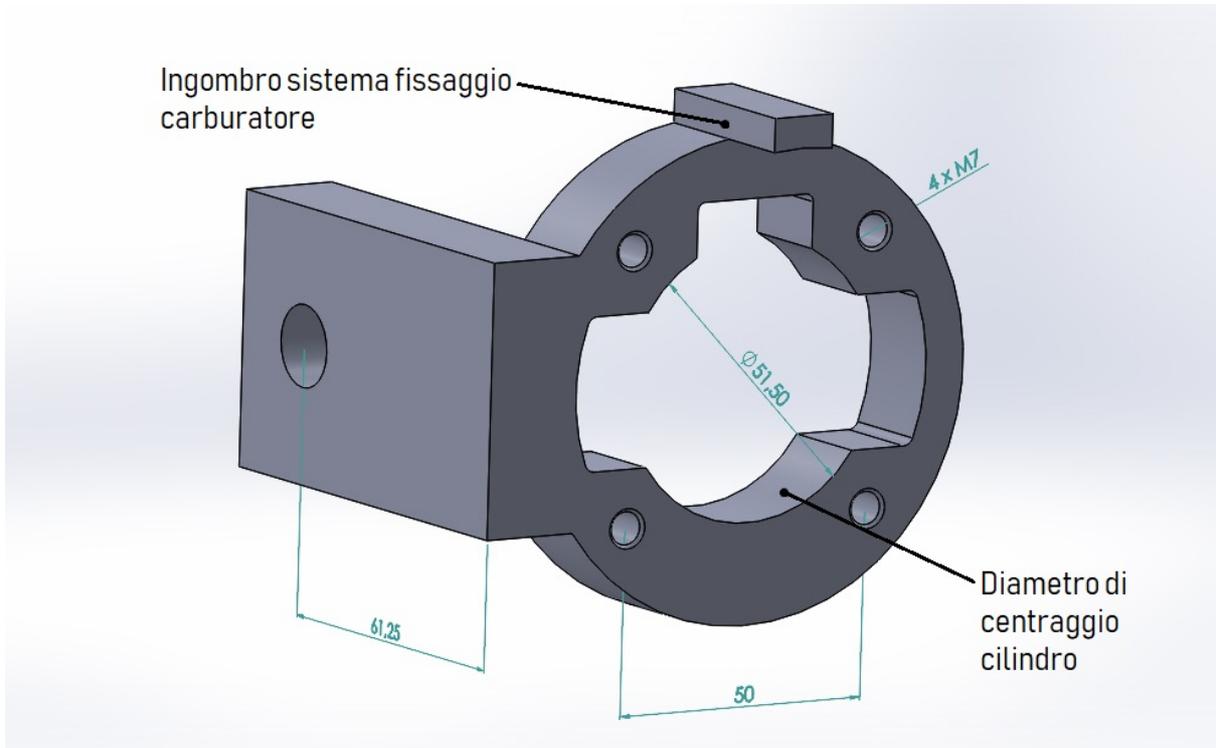


Figura 20: basamento Minarelli (rappresentazione schematica)

schematico modello 3D di entrambi e simulare il montaggio del cilindro durante le diverse fasi di design.

Dopo un attento esame, le due tipologie di carter motore, avevano tra loro alcune differenze: si riscontrava infatti l'impiego di viti prigioniere M6 con interasse di 48mm per quel che riguardava la produzione Piaggio, contro un tipo M7 e interasse di 50mm sui Minarelli, inoltre, per il primo, la distanza *piano basamento – centro albero motore* ammontava a 70,50mm, sul secondo invece risultava di 61,25mm; si notava infine la presenza di una feritoia di sezione 40x17mm implementata dalla casa di Pontedera sul piano del basamento con funzione di ammissione dell'acqua di raffreddamento nel cilindro che, invece, era evidentemente mancante sui carter di fabbricazione bolognese. Ovviamente anche sui diametri dei collari di centraggio del cilindro rispetto al carter c'era una certa discrepanza (54mm per il Piaggio e 51,5mm per il Minarelli), tuttavia, in questo caso, era previsto un notevole incremento dell'alesaggio della camicia e l'esperienza insegnava che, in tali situazioni, una ripresa della barenatura era obbligatoria per aumentarne il diametro in modo da riuscire ad alloggiare un gruppo termico più ingombrante. Ammettendo la possibilità di rieseguire questa lavorazione, il limite automaticamente diveniva sancito dalla sola localizzazione delle viti prigioniere con funzione di bloccare il cilindro sul piano del banco; in altre parole il diametro di imbocco del carter poteva essere allargato a piacimento, ma solo fino a che non si arrivasse ad intaccare il pezzo in vicinanza dei fori filettati, dunque le uniche quote realmente da considerare erano quelle relative alla posizione e diametro di questi ultimi (Figure 19 e 20).

Non risultando i basamenti dei due motori troppo dissimili, risultava possibile riuscire a trovare una soluzione che si adattasse ad entrambi, ed infatti, così è stato, certo al prezzo di decine di ore di lavoro al CAD e solo dopo il superamento di alcune questioni tecniche:

- il diverso interasse e diametro delle viti prigioniere (la cui funzione era di fissare il cilindro al basamento) obbligava a realizzare un differente pattern di foratura passante, a seconda che il cilindro finito dovesse essere montato su un motore Piaggio o Minarelli, questo ha obbligato a prevedere un certo volume di materiale che potesse essere intaccato dall'utensile senza rischio di interferenza con i condotti di travaso o il circuito di raffreddamento (Figure 22 e 23);
- la diversa distanza *piano basamento – centro albero motore* poneva nella condizione di avere, nei due casi, una analoga differenza sulla quota *piano basamento – piano*

testata, ovvero sulla lunghezza della canna. Questo si traduceva nel fatto che, lo stesso cilindro, funzionante con lo stesso manovellismo, lo stesso pistone e le stesse fasature di aspirazione e scarico, doveva essere più lungo se montato su motore Minarelli e più corto se montato su motore Piaggio. Il problema è stato risolto prevedendo di realizzare un getto che, una volta lavorati a macchina i piani di accoppiamento con carter e testata, potesse essere alloggiato sul basamento Minarelli e, nel caso in cui lo stesso volesse essere montato su Piaggio, era sufficiente eseguire una ulteriore asportazione sulla superficie “lato basamento” di entità pari a $70,50-61,25=9,25\text{mm}$, ovvero, per i due carter, la differenza tra le quote *piano basamento – centro albero motore* (Figure 24 e 25);

- l'assemblaggio dei due motori con diverse geometrie del manovellismo di spinta si traduceva in diverse lunghezze della bielle e della corsa del pistone. Precisamente, una corsa del pistone di entità ridotta, aveva come conseguenza un punto morto superiore più vicino al centro dell'albero motore, viceversa una corsa più lunga richiedeva che lo

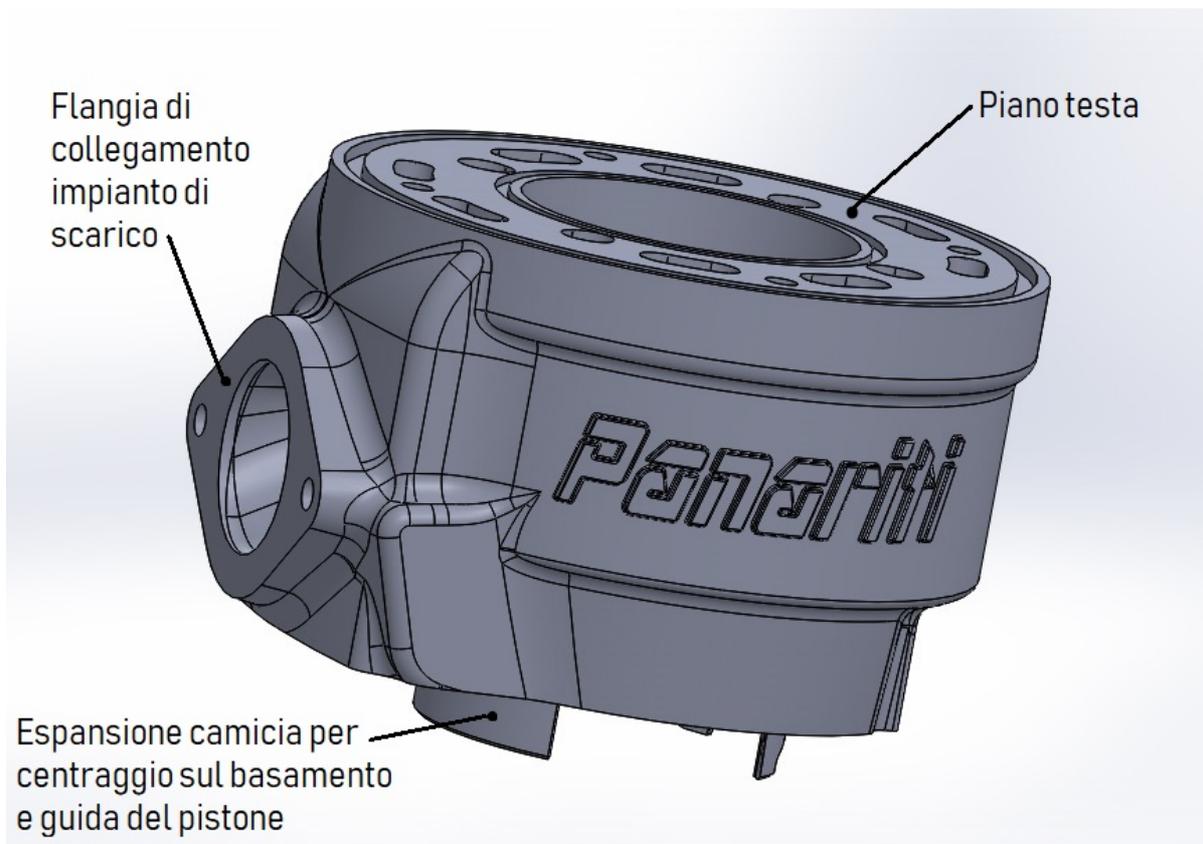


Figura 21: modello 3D del componente a lavorazioni meccaniche eseguite, visibili la flangia per il collegamento dell'impianto di scarico e il recesso della camicia che funge da guida al pistone e da riferimento per il centraggio del sul basamento

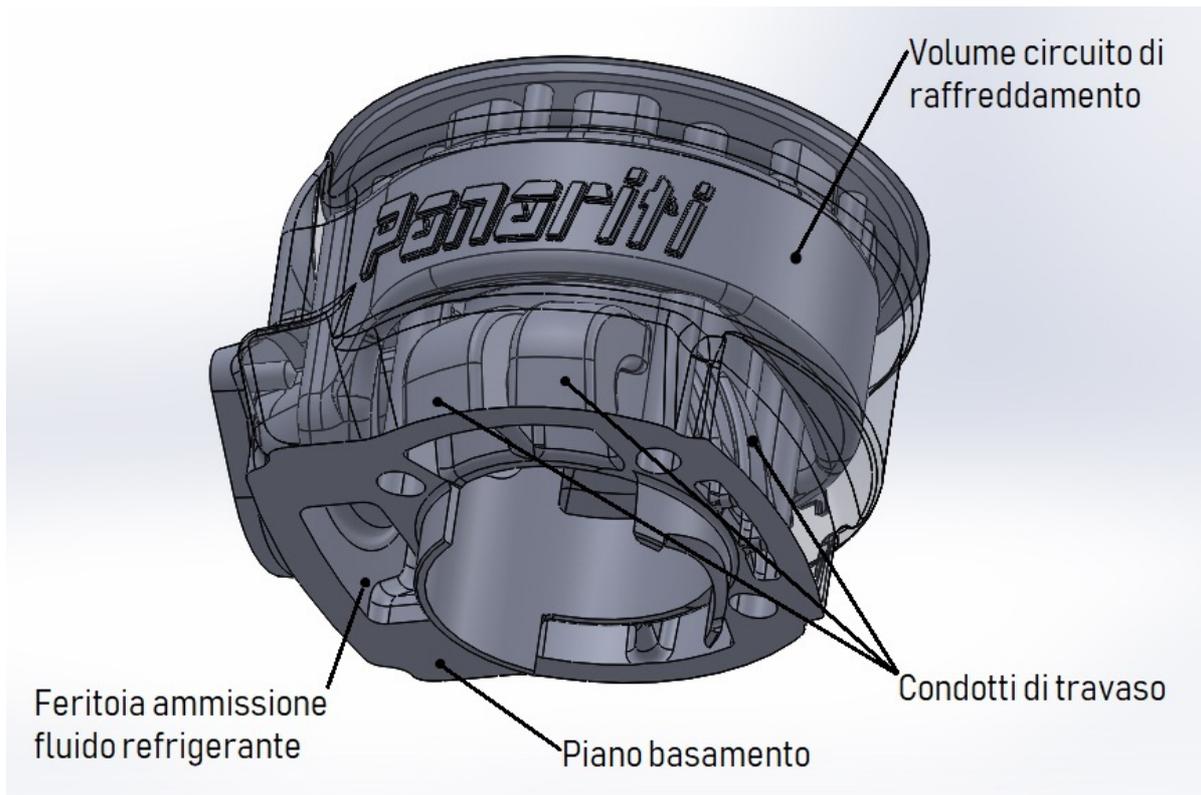


Figura 22: vista inferiore, identificabili i condotti di travaso e scarico, il circuito di raffreddamento e la feritoia di ammissione del refrigerante utilizzata dai motori Piaggio

stesso punto morto fosse spostato nella direzione opposta. Similmente, una biella più corta, oltre ad imprimere una diversa legge di moto al pistone, spostava entrambi i punti morti più a ridosso del centro dell'albero, il contrario invece accadeva se fosse stata più lunga. Se, nel passaggio da una configurazione all'altra, si fosse verificata una traslazione del solo punto morto superiore, a risentirne doveva essere il solo piano di accoppiamento con la testata, se invece lo scorrimento avesse coinvolto entrambi i punti morti, si doveva agire modificando anche la quota della lavorazione del piano di accoppiamento con il basamento. La possibilità di utilizzare più di una geometria del meccanismo biella-manovella, è stata consentita prevedendo nel grezzo un opportuno sovrmetalto sulle superfici del cilindro che si sarebbero dovute sposare con testa e basamento: per un motore cosiddetto a “corsa lunga” l'asportazione di materiale lato “piano testata” sarebbe stata minima e via via maggiore mano a mano che si passava a corse più corte; per un motore a biella lunga, parimenti, si sarebbe dovuto rimuovere poco sovrmetalto lato “piano basamento” e lo spessore in questione sarebbe cresciuto per bielle più corte;

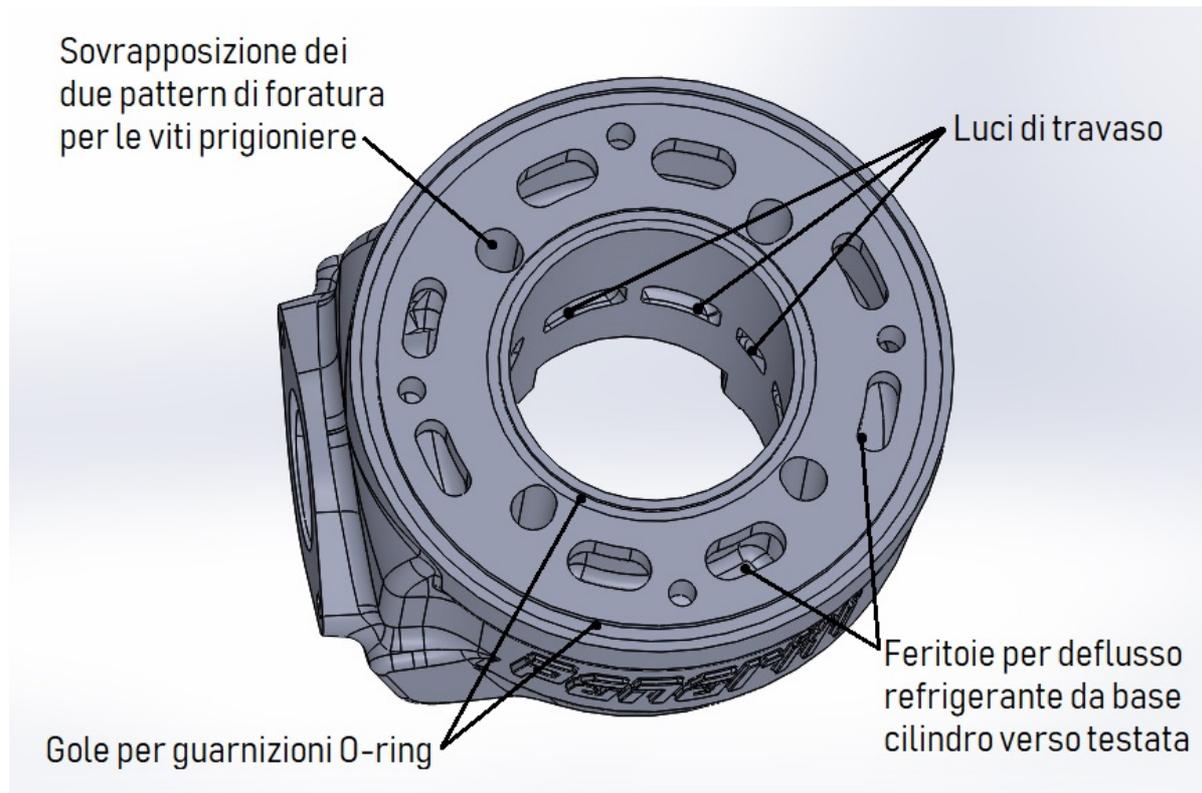


Figura 23: vista superiore del cilindro, si notino le diverse forature per i prigioniere ivi sovrapposte, le gole per le guarnizioni di tenuta della testata, le feritoie per il passaggio del fluido refrigerante e le luci di travaso

- l'ammissione del fluido nel circuito di raffreddamento, nei due casi, doveva avvenire in modo completamente diverso, infatti la messa in comunicazione tra la pompa dell'acqua e la base del cilindro avveniva tramite un tubo in gomma per i motori Minarelli e tramite una apposita feritoia (visibile in Figura 19) per i Piaggio. Nel caso di un gruppo termico destinato a un propulsore prodotto dal costruttore bolognese, è stato previsto un punto dove montare un raccordo portagomma per collegare il tubo proveniente dalla pompa; per il montaggio su Piaggio invece, la maggiore rimozione di materiale dalla base del cilindro (a causa della maggior distanza *piano basamento – centro albero motore*) porta anche ad intercettare la cavità del circuito di raffreddamento consentendo di aprire una luce pensata appositamente per accoppiarsi con la corrispondente sul carter. Naturalmente nel primo caso la lavorazione del piano basamento non interferisce con il giro acqua scongiurando così trafilementi, analogamente nel secondo non è necessario eseguire la foratura per il montaggio del portagomma (Figure 24 e 25);

- ottenere le diverse cilindrate partendo dello stesso grezzo di fusione, già dal principio risultava una richiesta facilmente soddisfabile perché, una volta completato il progetto del cilindro in configurazione 100cc, una semplice aggiunta di sovrametallo sulla camicia avrebbe consentito di realizzare la sua rifinitura anche con alesaggi inferiori a quello massimo. Tuttavia, così facendo, si palesava comunque un problema: le luci di travaso e di scarico appositamente studiate per il motore da un decimo di litro occupavano, sulla superficie laterale della canna, già tutta l'area disponibile presentandosi come otto aperture separate le une dalle altre da setti di spessore esiguo. Tenendo conto di questo, una diminuzione dell'alesaggio, avrebbe portato i diversi condotti a convergere a tal punto da compenetrarsi e, invece che con una serie di feritoie, ci si sarebbe ritrovati con uno scavo in rivoluzione più somigliante ad una gola. Tale accidentalità avrebbe sicuramente causato l'impuntamento del pistone a causa della spontanea fuoriuscita dei segmenti di tenuta dalle loro sedi, era quindi necessario trovare una soluzione che potesse ripristinare i setti separatori delle diverse luci, poiché essi avevano la funzione di accerchiare e costringere le fasce elastiche a rimanere in posizione senza che, per il ritorno elastico, potessero espandersi troppo fino ad insinuarsi in una delle varie aperture. A fronte di un tal impedimento, la soluzione è stata quella di ridurre la sezione del condotto di scarico nel suo tratto

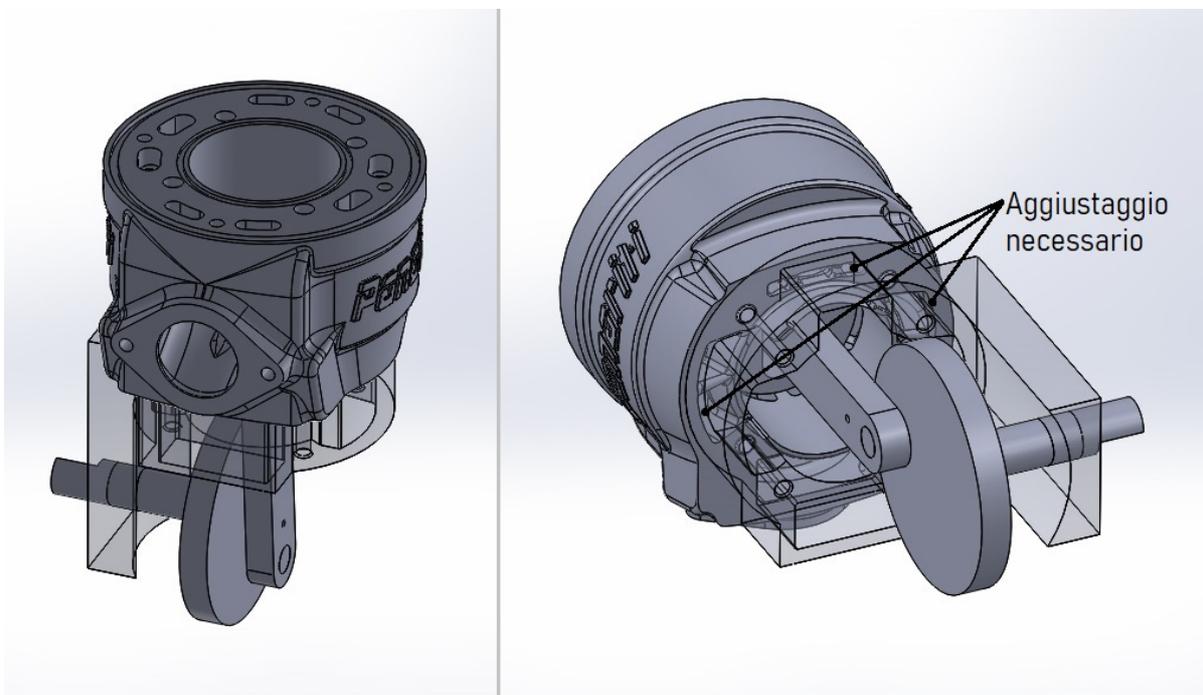


Figura 24: prova schematica di assemblaggio su basamento Piaggio, visibili le zone del carter da raccordare al nuovo cilindro attraverso un aggiustaggio manuale

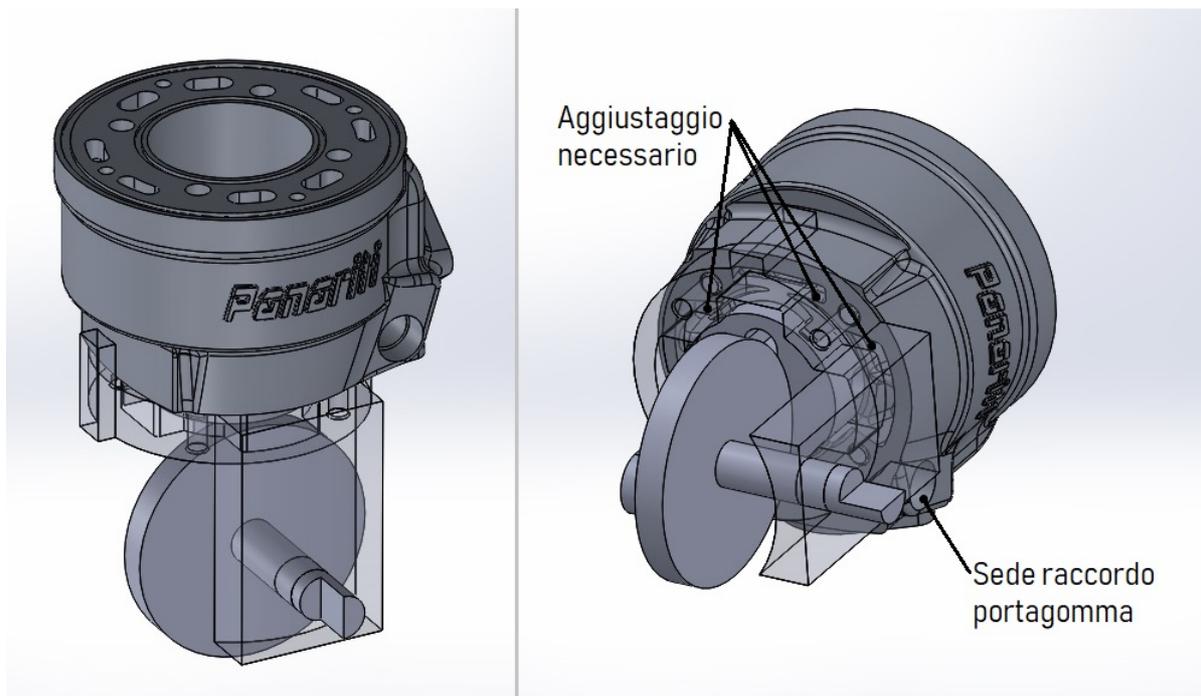


Figura 25: prova schematica di assemblaggio su basamento Minarelli, visibili le zone del carter da raccordare al nuovo cilindro attraverso un aggiustaggio manuale

iniziale e di rendere fortemente convergenti i travasi nei loro ultimi millimetri prima di gettarsi in camera di combustione. Questa scelta va chiaramente contro la linea delle elevate prestazioni, tuttavia consente di ricavare dallo stesso getto, anche cilindrate più modeste che possono comunque avere un impiego per elaborazioni meno esasperate. In tutto questo, va comunque detto che eseguendo la tornitura del grezzo per un alesaggio di 52mm (corrispondente al massimo previsto), si va ad eliminare la maggior parte dei “colli di bottiglia” perché la forte convergenza è localizzata sui tratti terminali dei passaggi per il fluido, in più rimane sempre aperta anche la strada di un meticoloso aggiustaggio manuale che consente di limare quegli eventuali pochi decimi che possano portare al tanto ricercato aumento delle sezioni;

- la necessità di accoppiare il medesimo componente con due diversi basamenti, poneva problemi non solo a livello di compatibilità delle geometrie (ovvero assenza di interferenze e impedimenti per l'assemblaggio), ma anche su come sagomare i condotti di travaso alla base del cilindro di modo da avere la minima presenza di accidentalità per il flusso dei gas. Nonostante le differenze tra i carter Piaggio e Minarelli fossero modeste, non è stato possibile trovare una forma che desse in entrambi i casi un risultato soddisfacente, la scelta quindi è stata quella di lasciare una piccola quota di

sovrametallo nei punti strategici, prevedendo poi di volta in volta un aggiustaggio a mano della raccordatura alla camera di manovella (Figure 24 e 25).

Il risultato del lavoro di progettazione è stato evidentemente disseminato di compromessi, non voluti ma necessari al soddisfacimento delle richieste del cliente tutto sommato abbastanza insolite. Si vuole però rimarcare il fatto che nessuna delle scelte progettuali è stata presa con la consapevolezza che fosse limitante per un ulteriore sviluppo del prodotto, ovvero le geometrie del pezzo da ottenersi in fonderia non sono state pensate propriamente per rimanere tali, bensì per essere modificate, anche pesantemente dalle sapienti mani di un preparatore, il quale possa trovare sul suo tavolo da lavoro, non un prodotto “plug & play” ma piuttosto un punto di partenza da trasformare, a suon di lima e fresino, in un oggetto dalle prestazioni ragguardevoli. Si è quindi scelto di privilegiare non la riduzione di peso e la minimizzazione dell'ingombro, bensì la presenza di spessore maggiore di materiale nei punti strategici che potrebbero richiedere aggiustaggi manuali e di un circuito di raffreddamento con capacità notevole, così da evitare problemi di surriscaldamento in esercizio.

2.2 Scelta della lega di alluminio

Il componente da realizzare è un cilindro per motore endotermico alternativo in lega di alluminio, ovviamente ad esso dovrà essere accoppiato un pistone con relative fasce elastiche e i due componenti nel normale utilizzo risulteranno in moto relativo con velocità che possono arrivare facilmente anche a 20m/s. Dovendo essere garantita la tenuta al trafilamento dei gas di combustione, i due organi si troveranno tra loro in intimo contatto e, senza prendere speciali accorgimenti, l'usura derivante dalle forze di attrito li metterebbe fuori servizio in poco tempo. Poiché la tecnologia non ci consente di rendere trascurabili le perdite di materiale in questo tipo di situazione, la scelta più sensata è quella di sacrificare il membro la cui sostituzione risulta più economica, che in questo caso è proprio il pistone. Per ottenere un simile risultato, la strategia più efficace è quella di donare al componente da salvare una durezza notevolmente superiore a quello su cui si vuole localizzare l'usura, ora, essendo il pistone in alluminio, già una canna riportata in ghisa potrebbe essere sufficiente a vincere la sua modesta durezza. Tale scelta si rivela tuttavia inadeguata nel momento in cui si va a considerare che, a contatto con l'interno del cilindro, ci sono anche uno o due (a seconda dei casi) segmenti di tenuta in acciaio temprato che chiaramente risultano a loro volta più duri della ghisa. A questo punto quindi si pone il problema di trovare qualcos'altro con cui rivestire

la superficie della canna che abbia durezza ancora superiore all'acciaio temprato: la soluzione, per fortuna, è disponibile da già oltre trent' anni e consiste in un rivestimento galvanico a base di cromo o nichel il quale consente di raggiungere oltre 1000 punti Vickers per uno spessore di pochi centesimi di millimetro (contro circa 500-700HV di un acciaio trattato). Per quanto buona sia l'efficacia di tale trattamento contro l'usura, esiste anche una altrettanto insidiosa problematica legata al modestissimo spessore dello strato superficiale: il rischio è infatti quello di vedere frantumato il riporto per via della fragilità che acquisisce se depositato su un substrato in lega di alluminio la cui durezza è molto inferiore (generalmente sui 70-80 punti Brinell).

Tenendo conto dell'aspetto appena descritto, nella scelta del materiale per il cilindro, avere un valore elevato sulla durezza è probabilmente più importante di altre prestazioni sul carico di

Alloy group	Alloy designation		Temper designation	Tensile strength R_m MPa min.	Yield strength $R_{p0,2}$ MPa min.	Elongation A % min.	Brinell hardness HBW min.
	Numerical	Chemical symbols					
Al	-	Al 99,6E	F	75	-	30	17
	-	Al 99,7E	F	75	-	30	17
AlCu	EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	T4	300	200	5	90
	EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti	T6	300	200	3	95
			T64	280	180	5	85
EN AC-21200	EN AC-Al Cu5MgMn	T4	330	225	3	100	
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi	F	140	70	3	50
			T6	240	180	3	85
AlSi7Mg	EN AC-42000	EN AC-Al Si7Mg	F	140	80	2	50
			T6	220	180	1	75
	EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6	T6	230	190	2	75
AlSi10Mg	EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	F	150	80	2	50
			T6	220	180	1	75
	EN AC-43100	EN AC-Al Si10Mg(b)	F	150	80	2	50
			T6	220	180	1	75
	EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	F	160	80	1	50
T6	220	180	1	75			
EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg	T6	230	190	2	75	
AlSi	EN AC-44000	EN AC-Al Si11	F	150	70	6	45
	EN AC-44100	EN AC-Al Si12(b)	F	150	70	4	50
	EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)	F	150	70	5	50
	EN AC-44400	EN AC-Al Si9	F	170	80	4	50

(continued)

Tabella 1: proprietà meccaniche delle leghe fuse in terra per provini colati separatamente

Alloy group	Alloy designation		Temper designation	Tensile strength R_m MPa min.	Yield strength $R_{p0.2}$ MPa min.	Elongation A % min.	Brinell hardness HBW min.
	Numerical	Chemical symbols					
AlSi5Cu	EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu4	F	150	90	1	60
	EN AC-45300	EN AC-Al Si5Cu1Mg	T4 T6	170 230	120 200	2 < 1	80 100
	EN AC-45500	EN AC-Al Si7Cu0,5Mg	T6	250	190	1	85
AlSi9Cu	EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3	F	150	90	1	60
	EN AC-46400	EN AC-Al Si9Cu1Mg	F	135	90	1	60
	EN AC-46600	EN AC-Al Si7Cu2	F	150	90	1	60
AlSi(Cu)	EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)	F	150	80	1	50
AlMg	EN AC-51100	EN AC-Al Mg3	F	140	70	3	50
	EN AC-51300	EN AC-Al Mg5	F	160	90	3	55
	EN AC-51400	EN AC-Al Mg5(Si)	F	160	100	3	60
AlZnSiMg	EN AC-71100	EN AC-Al Zn10Si8Mg	T1	210	190	1	90

T4 tempers shall be avoided for castings subjected even temporarily to temperatures from 70 °C to 160 °C and thereafter subjected to corrosive media.

NOTE 1 N/mm² = 1 MPa

Tabella 1 (continua): proprietà meccaniche delle leghe fuse in terra per provini colati separatamente

snervamento; in questo senso, una buona candidata, sarebbe una lega contenente, oltre al silicio, anche una quota di rame che porterebbe il pezzo ad essere temprabile così da ritrovarvi proprietà meccaniche migliorate rispetto ad un comune grezzo di fonderia.

Dalla tabella allegata (Tabella 1), la composizione EN AC-AlCu5MgMn è quella che consente di raggiungere le più elevate prestazioni quantificabili in 110 HB e 370MPa dopo trattamento T7 e 100HB e 330MPa con ciclo termico T4, c'è però da dire che il materiale in questione non contiene silicio, quindi non è sicuramente tra quelli con la colabilità più elevata, inoltre lo stato T7 (solubilizzazione e iperinvecchiamento) è un qualcosa di abbastanza inusuale, quindi potenzialmente costoso e rischioso da mettere in atto, d'altro canto i 100 punti Brinell che risultano in seguito al T4, sono ottenibili anche impiegando EN AC-AlSi5Cu1Mg T6 che invece presenta il 5% di silicio, quindi una fluidità sicuramente migliore. Bisogna però tenere in conto che tale lega non è tra quelle più frequentemente impiegate e richiedere alla fonderia di occupare un forno per le ore necessarie alla preparazione di una miscela personalizzata, risulterebbe oltremodo costoso. Per questo motivo si ritiene opportuno prendere in grande considerazione, almeno per la prima serie di prototipi, anche il più comune EN AC-AlSi7Mg0,6 T6 che comunque è capace di 85 punti Brinell e 210MPa dopo lo stesso tipo di trattamento termico.

2.3 Scelta del processo fusorio

Tra i diversi processi di colata in terra, un ottimo compromesso si ha utilizzando uno stampo realizzato completamente in sabbia legata impiegando, come agglomerante, il silicato di sodio (Na_2SiO_3) che, reagendo con una corrente di anidride carbonica (CO_2), porta ad avere motte e anime con una buona consistenza. Proprio questa resistenza meccanica migliorata della sabbia (Figura 26 e 27) rispetto alle soluzioni “a verde”, permette di realizzare geometrie abbastanza complesse senza che si abbiano i classici problemi di danneggiamento dei dettagli più piccoli nella fase di estrazione dei modelli dalle forme e, delle anime dalle relative casse, questo conduce direttamente ad un getto di qualità superiore in termini di tolleranze di forma e dimensionali. La rugosità, in modo analogo, ne trae beneficio poiché le parti in sabbia difficilmente finiscono col presentare irregolarità accidentali (es. spigoli scheggiati) e,

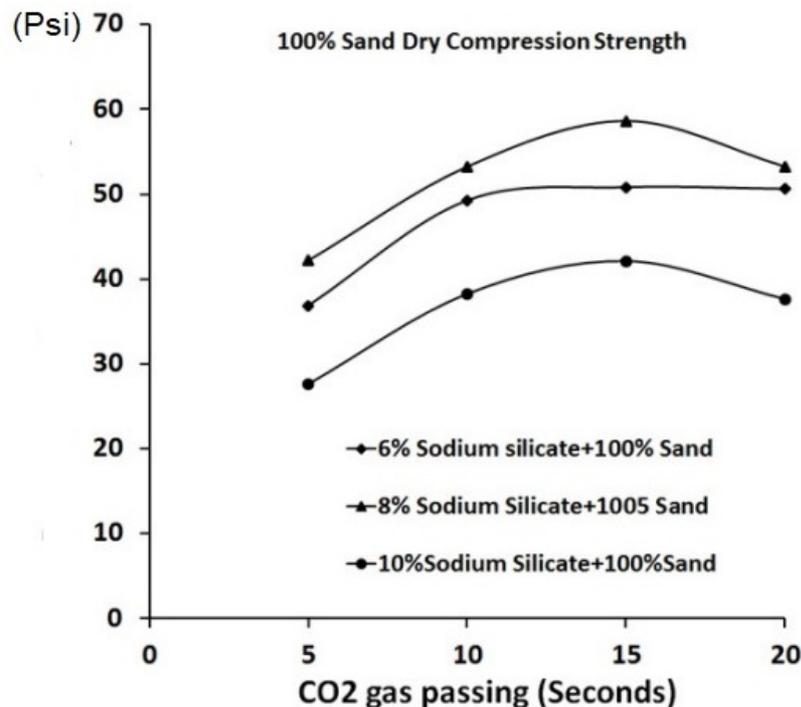


Figura 26: resistenza meccanica a compressione della sabbia legata con processo a CO_2 in funzione di composizione e tempo di esposizione al gas (1psi=0,00689Mpa)

risultando, in generale, proporzionale alla finezza della granulometria utilizzata.

La presenza nell'impasto di acqua in minima quantità, fa in modo che le inclusioni di vapore e di idrogeno divengano molto improbabili, parallelamente la buona durezza superficiale rende l'erosione della forma una possibilità più remota nella fase di riempimento, quindi anche l'inglobamento di granuli di sabbia risulta cosa rara.

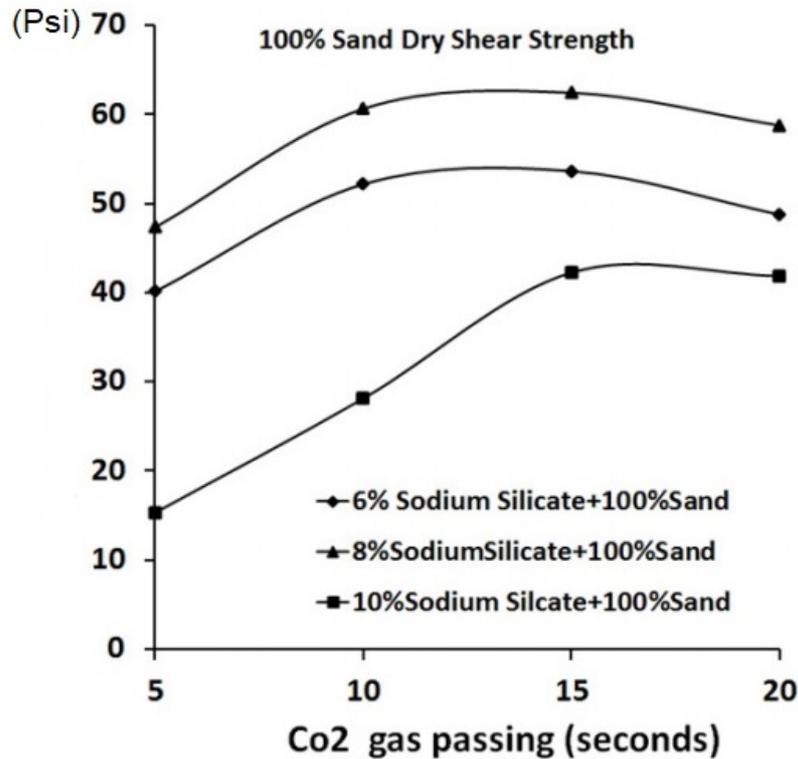


Figura 27: resistenza meccanica a taglio della sabbia legata con processo a CO₂ in funzione di composizione e tempo di esposizione al gas (1psi=0,00689Mpa)

La miglior compattezza porta anche ad avere una miglior conducibilità termica, se in più si considera che la maggior resistenza meccanica consente di realizzare lo stampo con spessori contenuti, risulta ovvia una ridotta entità della resistenza allo smaltimento del calore da parte del getto; questo porta ad avere tempi di raffreddamento più limitati, quindi un grano meno grossolano di quel che risulterebbe con il tradizionale processo a verde, il che è a beneficio delle proprietà meccaniche del pezzo.

Il prezzo da pagare per realizzare non solo le anime (per le quali la scelta è quasi obbligata vista la complessità), ma anche le motte in sabbia legata, è la necessità di dotarsi, anche per la costruzione di queste ultime, di apposite casse invece di una semplice placca modello. Inoltre andrà conteggiato anche un superiore costo imputabile all'impiego di sostanze agglomeranti e di macchine ausiliarie al vero e proprio processo di formatura quali impastatrici, formatrici meccaniche, attrezzature per iniezione di CO₂, ecc...

Va comunque detto che, a parte una piccola complicazione del modello, la differenza tra il sistema con gusci "a verde" e uno cosiddetto "a CO₂", sul costo del singolo pezzo ha una incidenza piuttosto modesta (si parla di centesimi di euro al chilo sul peso delle motte) che

avrebbe senso prendere in considerazione in caso di produzione su grande scala. Siccome in questo caso ci si propone di realizzare una piccola serie prototipale, il risparmio in assoluto sarebbe esiguo rispetto agli innumerevoli vantaggi, dunque la scelta rimane sulla sabbia legata seppur una tradizionale colata in terra possa far pervenire a risultati ugualmente soddisfacenti. Nel caso in cui le anime dovessero risultare problematiche da farsi con il sistema di indurimento a CO₂, rimane comunque sempre aperta la possibilità di passare alla tecnologia cold box con l'unica differenza di un costo leggermente superiore sulla singola parte per via dell'uso di un impasto meno economico sia da farsi che da maneggiarsi.

2.4 Modellazione del grappolo di fusione mediante CAD 3D

La prima fase di progettazione ha avuto come risultato un disegno CAD 3D del particolare oggetto di studio, tale modello è chiaramente costruito con lo scopo di verificare l'effettiva funzionalità del componente, dunque viene realizzato rappresentando la geometria come essa deve risultare alla fine di tutto il processo di fabbricazione. Tuttavia bisogna tenere in conto che tra le varie lavorazioni che portano ad ottenere il pezzo finito, ce ne sono anche alcune in cui si fa asportazione di truciolo, ciò implica che sul grezzo di fusione si rende necessario prevedere un sovrametallo, il quale, una volta rimosso, lascerà a nudo le superfici finite a macchina e pronte per essere accoppiate alle altre parti del motore. Se non si lasciasse uno spessore sufficiente di materiale in eccesso, ci si troverebbe con un oggetto la cui costruzione non potrebbe essere portata a termine rispettando le quote a disegno, dunque il pezzo sarebbe da scartare perché inutilizzabile.

Per evitare di questi spiacevoli inconvenienti, la prima modifica da apportare alla geometria del finito è la meticolosa valutazione dell'entità, nonché aggiunta, dei volumi costituenti i sovrametalli nelle zone che saranno interessate da ripresa a macchina utensile. Un secondo aspetto considerare è il problema della contrazione termica, ovvero accade che, durante il riempimento, il metallo fuso va ad occupare tutta la cavità delimitata dalla forma ma non appena la solidificazione è completata, il materiale è soggetto ad una diminuzione di volume che porta il getto, una volta a temperatura ambiente, ad avere dimensioni inferiori rispetto a quelle che gli erano state impresse dallo stampo. Per risolvere la cosa è sufficiente maggiorare le dimensioni del getto di una quota pari al ritiro (1,2-1,3% per le leghe di alluminio) così che la reale dimensione del fuso risulti proprio pari a quella voluta. Questo vuol dire che, nel passaggio dal disegno del finito a quello del grappolo, si deve riscalarare il volume delimitato

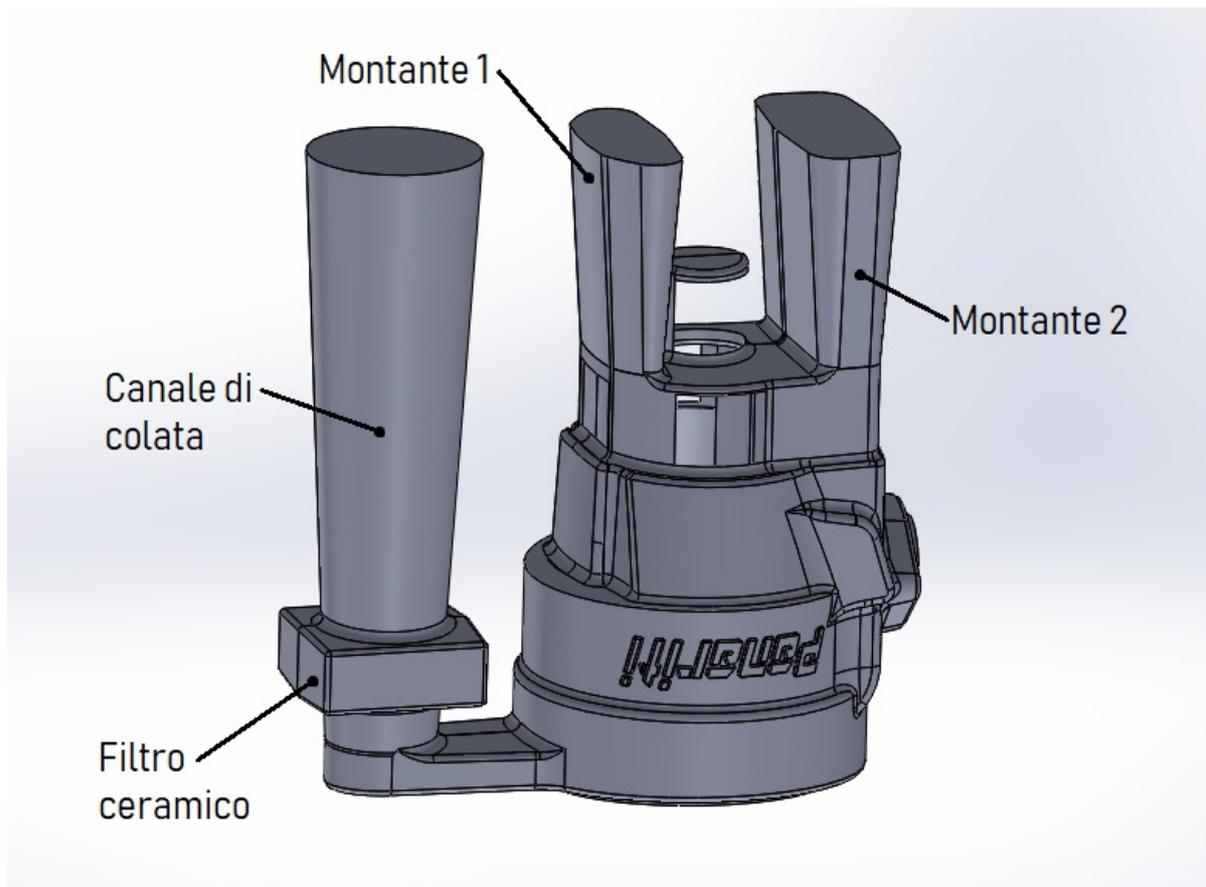


Figura 28: disegno di primo tentativo del grappolo di fusione

dalla superficie esterna del pezzo aumentandolo di quel poco che serve. Sulle cavità invece, lo stesso problema è abbastanza trascurabile perché la presenza della sabbia che oppone resistenza alla compressione, limita alquanto le deformazioni, inoltre, essendo le geometrie in questione di dimensioni piuttosto contenute, in assoluto il ritiro corrispondente probabilmente sarebbe di entità inferiore alle tolleranze dimensionali che il processo fusorio consentirebbe di ottenere. Per queste ragioni, in sostanza, l'aumento di volume viene applicato solo ai gusci e non alle anime.

Il grappolo di fusione, per chiamarsi tale, oltre al getto (che idealmente corrisponde al frutto) deve anche avere il suo raspo il quale invece si identifica con il boccame, cioè l'insieme di canale di colata e montanti. La localizzazione di questi condotti viene generalmente fatta, almeno al primo tentativo, sulla base dell'esperienza, quindi, una volta deciso come orientare il getto rispetto alla direzione della gravità, dalla sua parte inferiore si farà partire il sistema di riempimento, mentre dalla sommità si avrà la diramazione delle materozze. Entrambe le tipologie di canale termineranno sulla superficie superiore dello stampo esposte all'atmosfera.

Il dimensionamento del sistema di riempimento deve essere fatto, sia con la consapevolezza che esso non deve solidificare prima che tutto il metallo fuso abbia invaso lo stampo, sia in modo da non portare a velocità del fluido troppo elevate in quanto, una simile condizione, potrebbe contemporaneamente essere causa di erosione della forma (con conseguente inglobamento di inerti nel getto) e di moto turbolento (che porta a rischiare inclusioni di aria). Supponendo grossomodo fissata l'entità della potenza termica smaltita verso l'esterno al passare del tempo, un condotto di alimentazione con una capacità termica cospicua, impiegherà più tempo per raffreddarsi di uno meno massivo, dunque la situazione è tanto più favorevole ad impedire intasamenti quanto più, a parità di lunghezza, la sua area trasversale risulterà grande. Secondo i fondamenti della fluidodinamica invece, nota la portata, la velocità in generale risulta inversamente proporzionale alla sezione di passaggio, dunque è evidente che un canale di colata generoso ha un effetto positivo nell'ottica di ricercare un regime di moto il più possibile laminare. Oltre un certo limite però i benefici non risultano più tangibili e, considerato anche che il materiale intrappolato nel bocchame è destinato a divenire rottame, non risulta economicamente sensato esagerare con le dimensioni in fase di proporzionamento. Questo è ancor più vero se, come in questo caso, nella fase terminale del canale di ammissione del metallo fuso viene prevista la presenza di un filtro ceramico che, oltre a trattenere eventuali impurità sospese nel liquido, funge anche da raddrizzatore di flusso riducendo la probabilità di nascita di moto caotico. Nella rappresentazione tridimensionale il filtro in questione viene rappresentato come il volume del suo alloggiamento nella motta, questo perché renderlo un corpo separato da quello principale sarebbe completamente inutile e comporterebbe una serie di complicazioni nella gestione dei disegni.

Per il posizionamento dei montanti, il criterio seguito è stato quello di avvicinarli il più possibile alle zone che, secondo il personale giudizio, parevano a rischio di porosità da ritiro. In particolare si è tenuto un occhio di riguardo per quei punti caratterizzati da una certa complessità geometrica che avevano tutti i requisiti per far nascere fronti di solidificazione secondari, ossia quantità consistenti di materiale collegate alla porzione più ingente del getto solo da sottili pareti le quali, se avessero completato per prime il passaggio di stato, avrebbero separato due volumi ancora in fase liquida con tutte le conseguenze del caso.

In questa fase della progettazione è inoltre parso opportuno scegliere il piano di divisione, verificare l'assenza di sottosquadri e rendere sformabili quelle superfici che già non lo fossero aggiungendo anche, dove necessario, raggi di raccordo di ampiezza appropriata.

Tale pratica potrebbe apparire come una inutile perdita di tempo se si considera che è stata messa in atto su un disegno tutt'altro che definitivo, va dunque detto che l'intento non era quello di estrarre già in questa fase una prima bozza dei modelli, bensì si voleva eseguire una generale verifica del fatto che la geometria attuale non presentasse potenziali problematiche cruciali per la loro realizzabilità. Prendendo visione dell'analisi di sforno effettuata dal CAD (Figure 29 e 30), in verde sono indicate le aree a sforno positivo per una direzione di estrazione secondo il versore “-x” normale al piano di divisione (in figura colorato in azzurro a trasparenza), in giallo quelle aree il cui angolo di sforno è inferiore ai 2 gradi (sia in negativo che in positivo) mentre appare colorato di rosso tutto ciò che è sottosquadro. Non avendo eseguito l'indagine su di un semimodello ma sull'intero volume del grappolo, la parte sotto al piano di divisione viene vista come problematica, in realtà ciò sta solo ad indicare che la metà inferiore del pezzo va estratta, come ci si può aspettare, secondo la direzione “+x” opposta a quella della metà superiore.

Un altro aspetto che si può facilmente notare dalle immagini riguardanti l'analisi di sforno, è che, oltre a sistemare spoglia, sottosquadri e raccordi, si è anche provveduto ad accennare le portate d'anima e, sebbene il ragionare su questo ultimo aspetto sia veramente molto

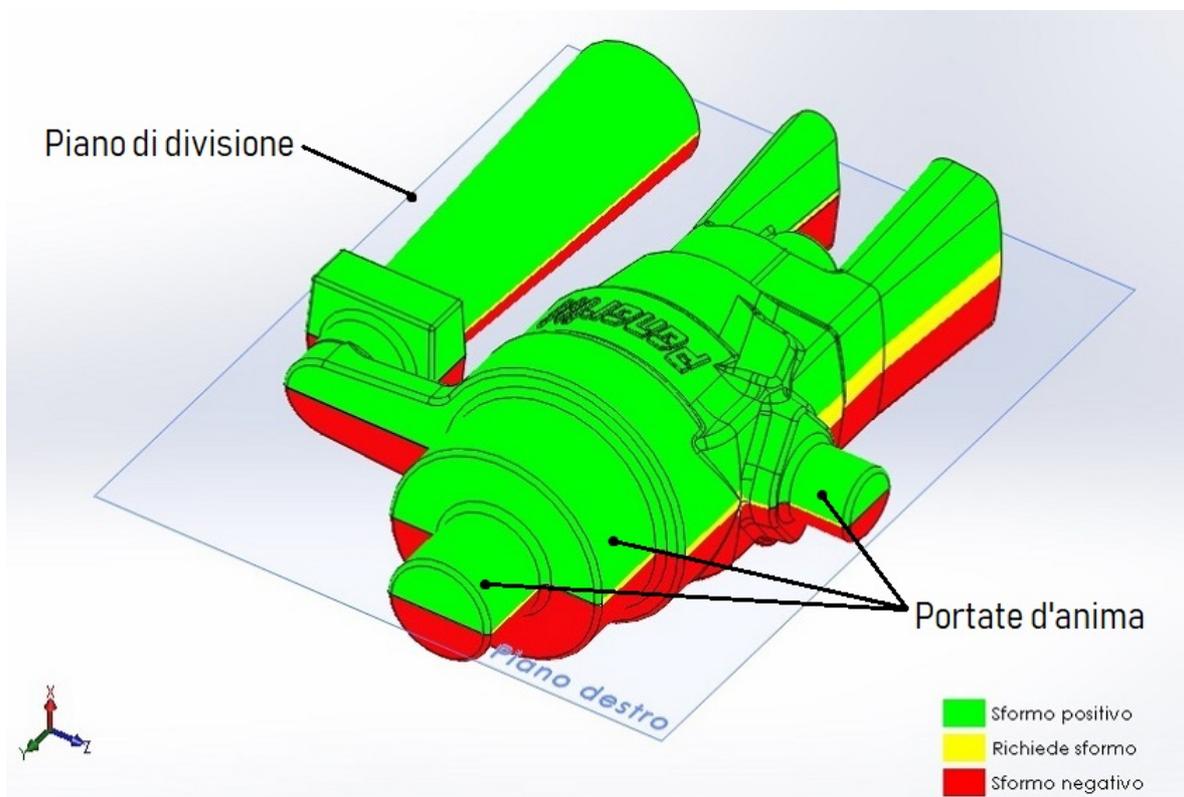


Figura 29: analisi di sforno, in verde le zone correttamente sfornate, in giallo quelle con angolo di sforno inferiore a 2°, in rosso i sottosquadri

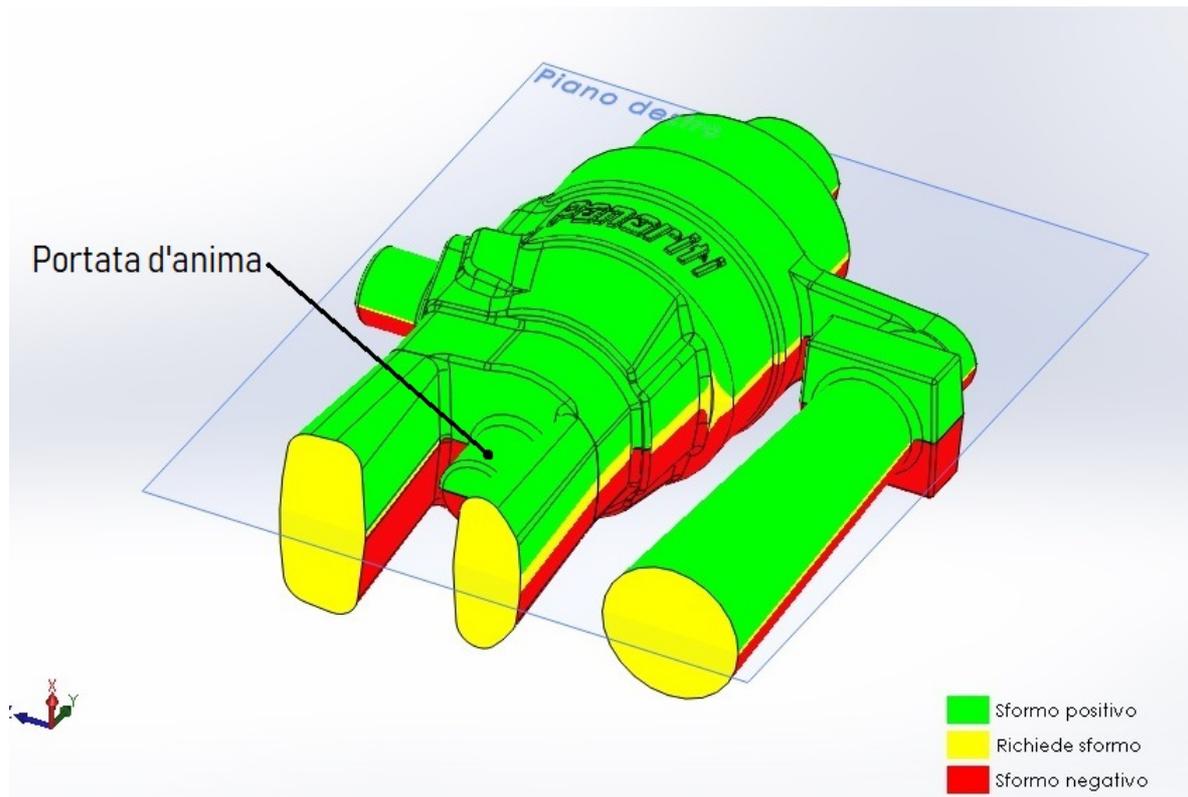


Figura 30: analisi di sforno, in verde le zone correttamente sfornate, in giallo quelle con angolo di sforno inferiore a 2°, in rosso i sottosquadri

premature, si è deciso comunque di redigere una bozza. Questo sostanzialmente in virtù di due considerazioni: la prima riguarda il fatto che, essendo il disegno del getto già per certi dettagli definitivo, i punti in cui dare appoggio alle anime sono pressoché obbligati quindi il disegno di primo tentativo sarà probabilmente passibile solo di piccole modifiche; in seconda battuta, l'inserimento di questi nuovi volumi funge anche da promemoria per il disegnatore, il quale potrà, vedendoli ripetutamente durante il lavoro, evitare di dimenticare di tener conto della funzione essenziale che essi svolgono.

Capitolo 3

Simulazioni FEM

3.1 Analisi della colata con tecniche FEM

Dal punto di vista ingegneristico, è oltremodo utile conoscere con precisione il comportamento termofluidodinamico del metallo fuso durante la fase di colata perché, in tal modo, è possibile scongiurare la presenza di difetti. A titolo di esempio, stimare il campo di velocità durante il riempimento è di grande aiuto nel valutare possibili inglobamenti di aria, determinare il cammino del fronte di solidificazione serve per capire se e dove possono nascere porosità da ritiro, infine calcolare l'andamento nel tempo del campo di temperatura è utile per ricavare informazioni sulla finezza del grano che si andrà ad ottenere, o, più banalmente, a decidere quanto tempo attendere prima di eseguire la distaffatura.

Precisamente, per quel che riguarda la parte fluidodinamica, si osserva una massa di metallo liquido che fluisce all'interno di un sistema di condotti dalle forme più o meno complesse nell'arco di un intervallo di tempo piuttosto limitato. L'ente motore è, nella maggior parte dei casi, la forza di gravità e le interazioni con le superfici solide dello stampo possono essere descritte attraverso le equazioni di Navier-Stokes.

Nella scrittura di tali equazioni, poiché il tempo di riempimento è usualmente molto breve, si può supporre la temperatura del metallo fuso costante, il che conduce direttamente ad una costanza anche della densità e della viscosità con il trascorrere del tempo e ciò semplifica notevolmente la trattazione analitica del problema. Quello che invece rimane un ostacolo è la complessità della geometria tridimensionale perché sì, è vero che computando il numero di Reynolds si può stimare quale sarà il regime di moto nei condotti, ma senza risolvere le equazioni del moto dei fluidi non è dato conoscere in modo preciso la velocità punto per punto che fornirebbe un'informazione ben più dettagliata.

Nell'analisi della solidificazione, invece si registra la trasmissione del calore dal metallo fuso verso l'aria dell'ambiente attraverso le pareti della forma. In questo caso i meccanismi di smaltimento dell'energia termica sono principalmente di tipo conduttivo e convettivo, quindi il problema, oltre che fluidodinamico, diviene anche termodinamico, il che, chiama

direttamente in causa la legge di Fourier da applicarsi su un problema non stazionario e tridimensionale per il quale la mole di variabili non è del tutto irrilevante.

Bastando così poche righe per accennare alle più evidenti problematiche che si incontrerebbero cercando al problema termofluidodinamico una soluzione analitica, risulta evidente che non è possibile operare manualmente. Quel che invece si può fare è scomporre il dominio di calcolo in una quantità ragionevolmente grande di volumi elementari in modo da semplificare alquanto la singola entità geometrica, per ognuno di essi scrivere le equazioni di governo e le condizioni al contorno, indi ricercare per tutte una soluzione per via numerica. Naturalmente, a causa dell'elevatissimo numero di computazioni necessarie, un simile processo deve essere portato a convergenza da un calcolatore con l'esecuzione di un software specifico, nel caso oggetto di studio la scelta è ricaduta su un prodotto commerciale realizzato e distribuito da ESI Group denominato ProCAST.

3.2 Simulazione termodinamica

L'applicativo scelto per lo studio del progetto (ProCAST) si compone di tre diversi ambienti di lavoro:

- *Mesh* contiene tutti gli strumenti per importare il modello tridimensionale dell'oggetto da studiare, allestire la stazione di colata e suddividere le geometrie in un numero congruo di piccoli volumi, meglio noti come “elementi finiti”;
- *Cast* è il nome dell'interfaccia che consente, sia di assegnare le condizioni al contorno tipiche dello specifico processo di colata che si vuole valutare, che di avviare la fase di calcolo;
- *Viewer* infine è il visualizzatore dei risultati delle simulazioni che, al contrario di quel che si può pensare, risulta essere relativamente sofisticato in quanto deve permettere all'utente di poter esplorare a fondo sia gli aspetti termici che quelli fluidodinamici del problema.

Per lo studio di un nuovo progetto, serve procurarsi un modello 3D del grappolo di fusione in formato compatibile (.igs), tuttavia, prima di eseguirne il caricamento, occorre verificare che la sua geometria sia il più possibile semplificata di dettagli non necessari e che non presenti punti critici come possono essere le cuspidi. Una tale accortezza è necessaria per evitare che nel dominio di calcolo vengano a trovarsi punti di discontinuità i quali possono compromettere la convergenza dell'algoritmo risolutore, nel caso in questione si sono quindi

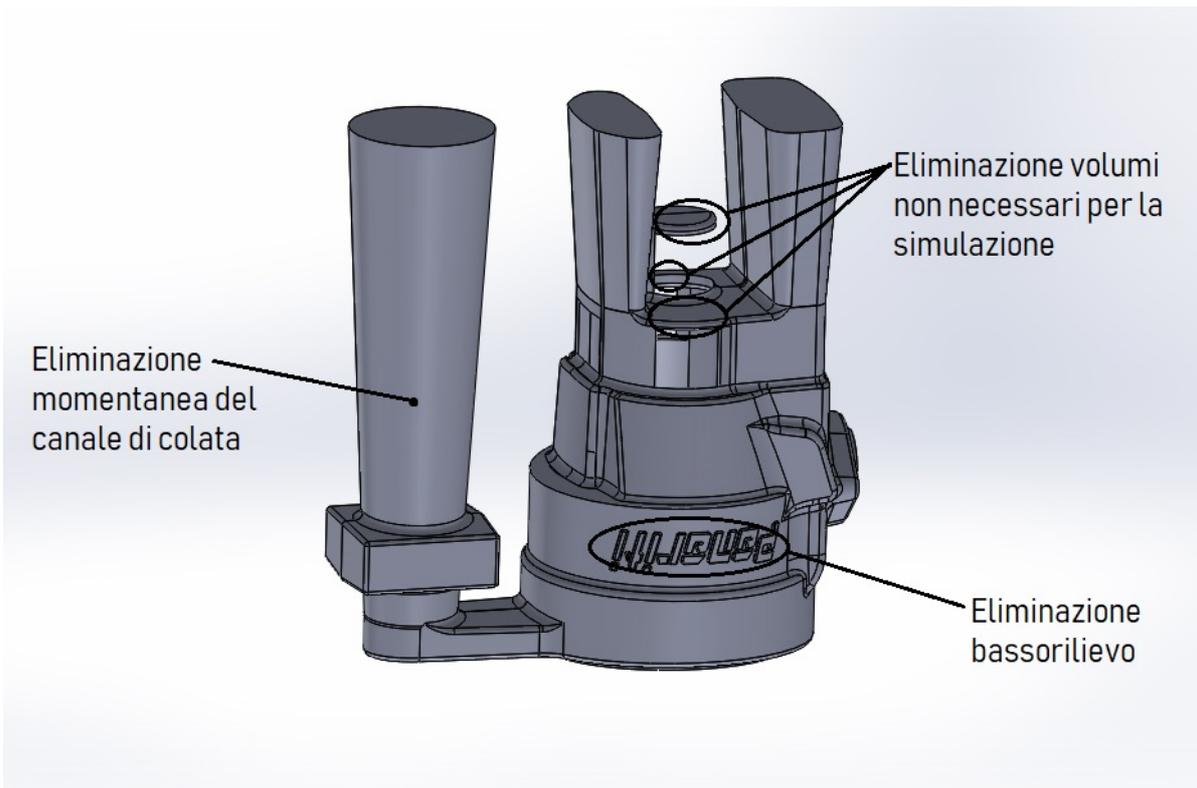


Figura 31: modello del grappolo di fusione prima delle modifiche per la semplificazione della geometria

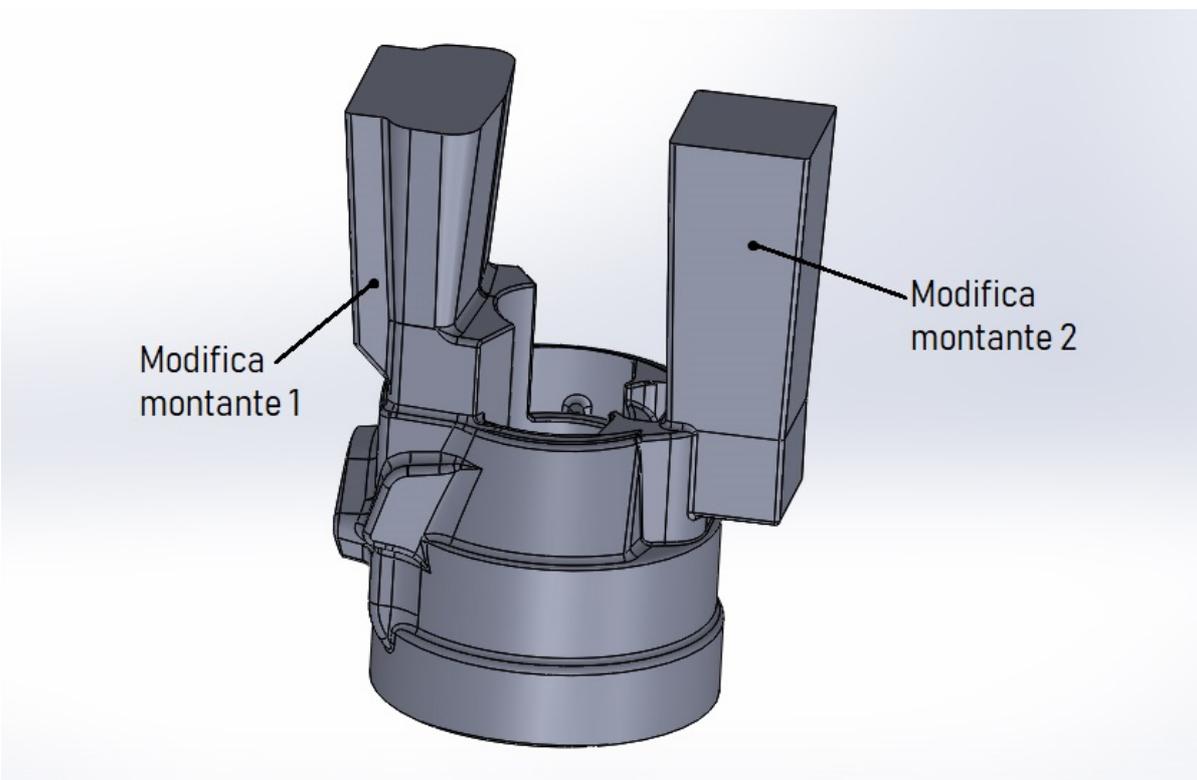


Figura 32: modello del grappolo di fusione dopo la semplificazione della geometria, si notano anche la momentanea soppressione del canale di colata e la diversa conformazione dei montati

eliminate le scritte in bassorilievo, alcuni volumi non necessari e, momentaneamente, il canale di colata. Poiché però queste prime modifiche avevano anche messo in luce evidenti pecche nella conformazione delle materozze, anche ad esse è stato apportato qualche cambiamento ancor prima di approcciare le simulazioni numeriche (Figure 31 e 32).

A questo punto il disegno può essere importato su ProCAST nell'ambiente “Mesh” e, prima ancora di provare ad eseguire qualsiasi altra operazione, è opportuno verificare l'integrità delle superfici con il comando “Check” nella scheda “Repair” (Figura33), dovessero risultare problemi usualmente la funzione di “Auto Correct” riesce a risolverli, in alternativa è necessario eseguire le correzioni una ad una manualmente modificando le aree danneggiate. Il passo seguente consiste nel racchiudere il getto in un solido che sarà rappresentativo dello stampo, dunque per mezzo dello strumento “Box” si traccia un parallelepipedo (Figura 34) che vada a circondare il modello e che mantenga una faccia coincidente con la sommità dei montanti, indi si assemblano i due volumi (“Check” e poi “Assemble All” nella scheda “Assembly”) e dopo un secondo “Check” ci si può addentrare nelle operazioni di mesh.

Il termine in questione letteralmente significa “magliatura” e si riferisce al reticolo che ha il compito di sancire la suddivisione in volumi elementari della geometria del problema, essa

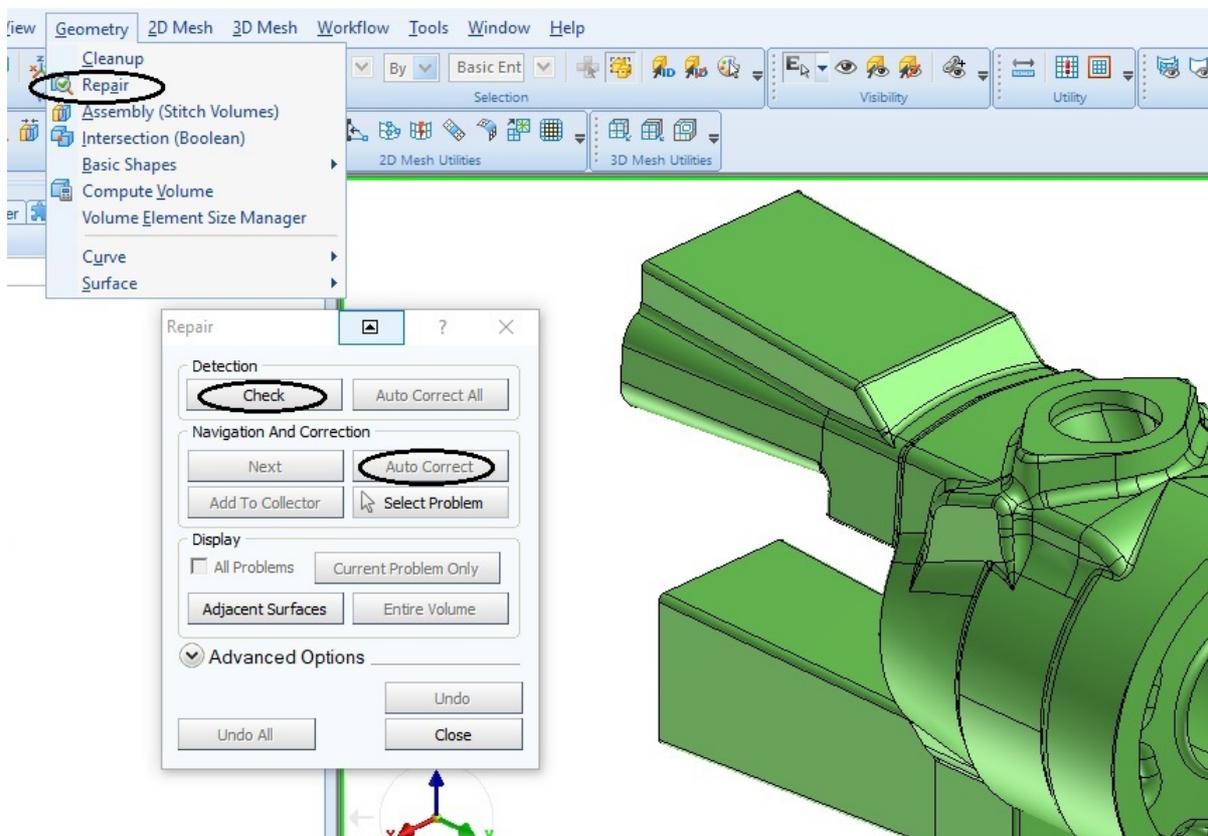


Figura 33: verifica dell'integrità delle superfici

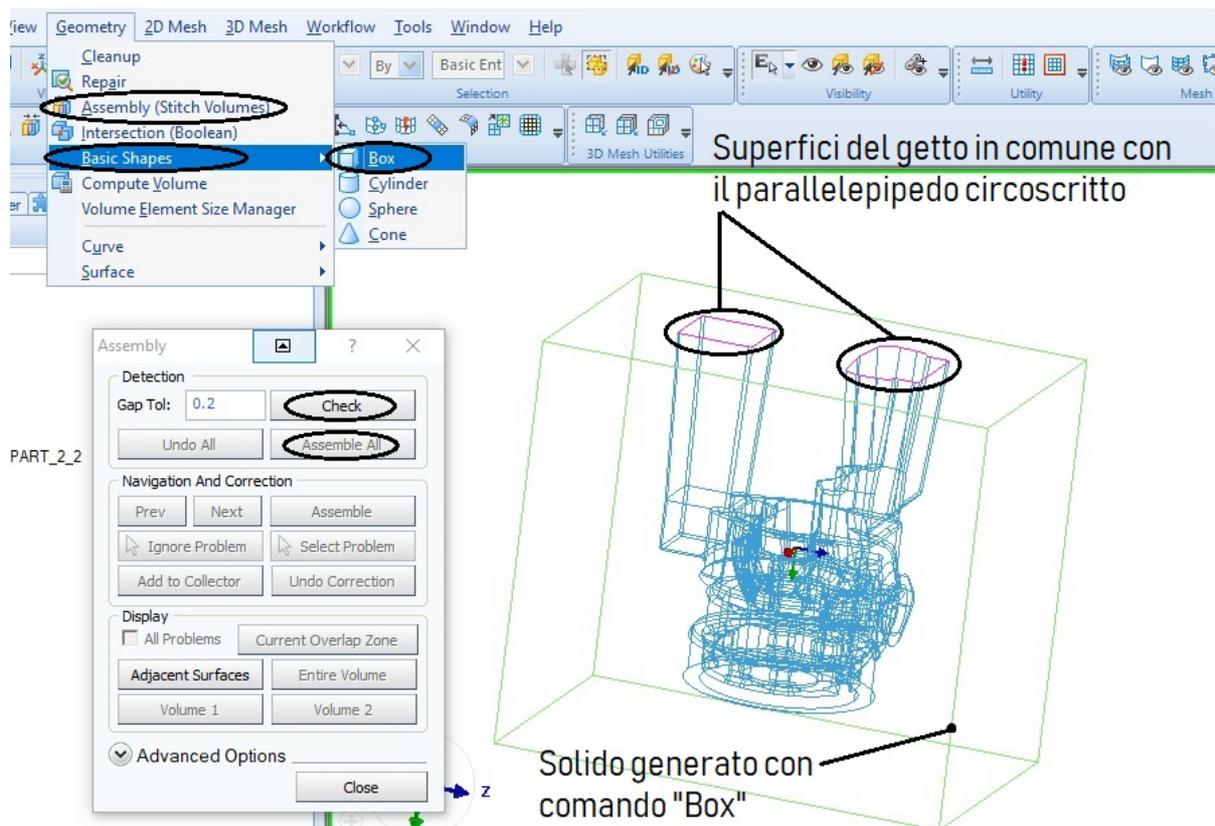


Figura 34: generazione del solido rappresentativo dello stampo e suo accoppiamento con il modello costituente il getto

viene costruita prima sulle superfici e poi propagata anche all'interno dei solidi da esse delimitati. L'entità del passo della griglia in questione va chiaramente a determinare la quantità di elementi finiti che risulteranno dopo il processo di frammentazione e, di conseguenza, anche il grado di dettaglio della soluzione e il relativo costo computazionale (ad un passo di lunghezza ridotta rispetto alle dimensioni del dominio corrisponderà un grande numero di elementi, quindi una soluzione con un buon livello di dettaglio ed un altrettanto elevato costo computazionale; viceversa accadrà per una costante reticolare di estensione più ingente).

Per avere risultati sufficientemente accurati nelle regioni di maggior interesse e, allo stesso tempo, evitare di appesantire inutilmente i calcoli ove non è necessario, si sceglie di impostare una finezza della mesh variabile a seconda delle specifiche necessità: una dimensione di 1-3mm viene attribuita a tutto ciò che costituisce il pezzo, si passa invece a 5mm fino ad arrivare a 10-20mm per le zone nella periferia della forma (Figura 35).

Dopo aver portato a termine la prima fase ed aver eseguito un comando di "check", si passa ad effettuare anche la scomposizione anche dei volumi, generalmente in questa fase il

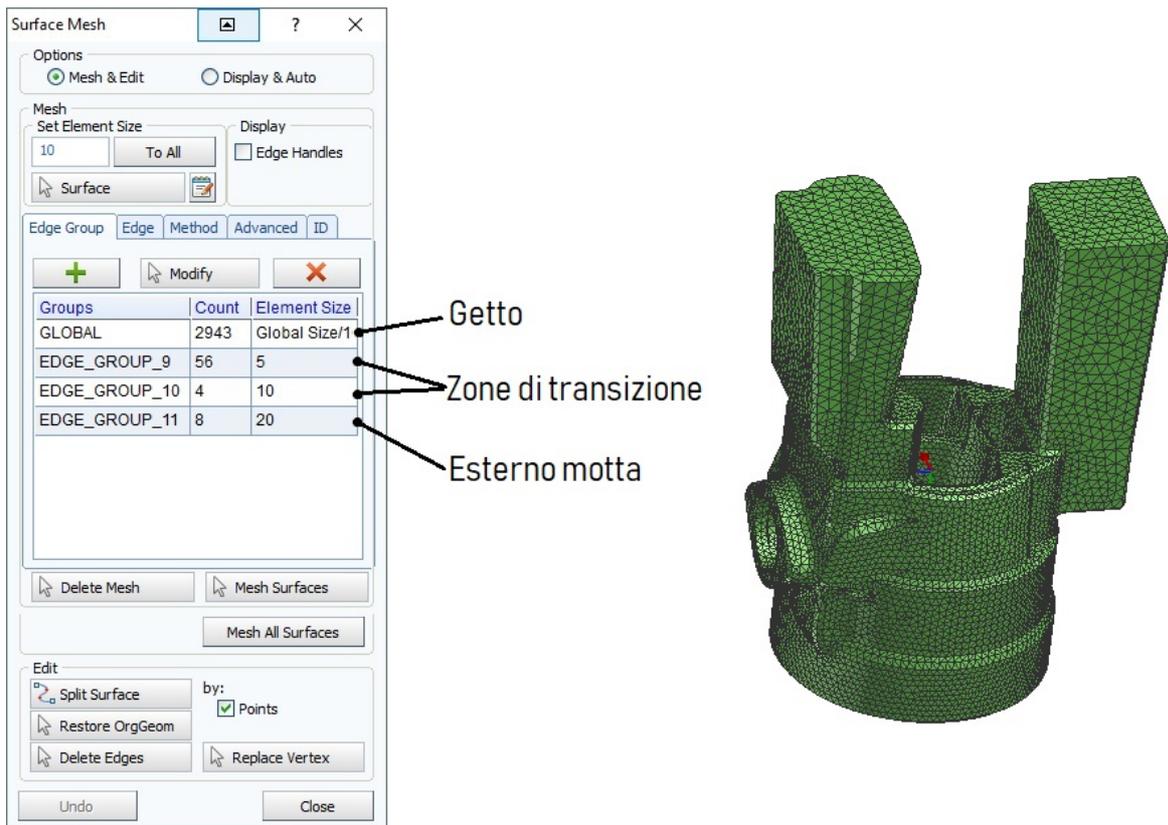


Figura 35: scheda di settaggio dei parametri di mesh, per ognuna delle regioni si imposta la dimensione della trama della magliatura, i montanti in questo caso sono zone di transizione.

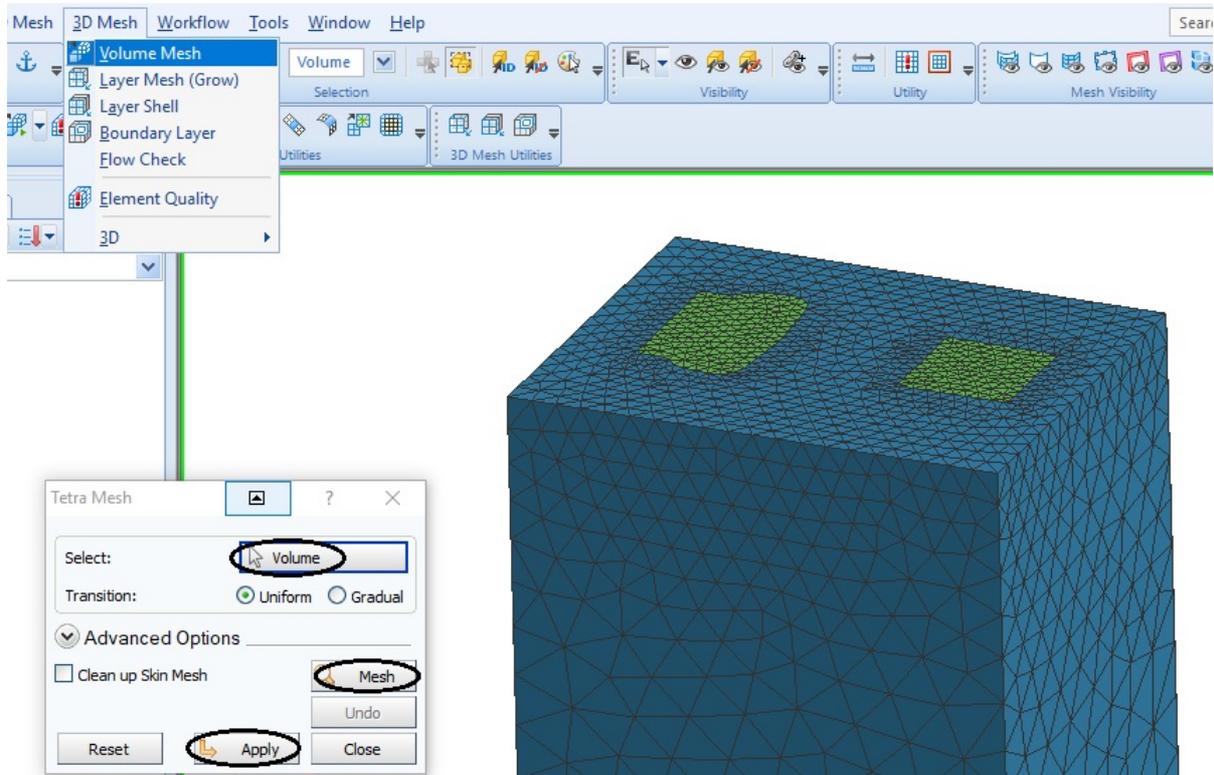


Figura 36: settaggio della mesh tridimensionale, a fianco il solido formato dalla motta (blu) e contenente il volume rappresentativo del getto (in verde il pelo libero dei montanti).

software procede in autonomia sulla base delle informazioni che ha già ricevuto per le superfici, infatti, quel che accade, è una propagazione nel solido di una trama analoga a quella visibile sulla frontiera del dominio e, quello che si ottiene, è il modello pronto per il processo di simulazione (Figura 36).

Per avviare il processo di calcolo, oltre ad una opportuna scomposizione del dominio in elementi finiti, è necessario anche assegnare una serie di condizioni matematiche e proprietà termofisiche, per fare ciò bisogna passare all'ambiente “Cast” e, dal menù “Workflow”, scegliere “Generic” (Figura 37). In questo modo si apre un percorso guidato che porta all'elencazione di tutti i parametri necessari senza incorrere nel rischio di dimenticare alcunché, come prima cosa si sceglie il tipo di processo fusorio (*Gravity Sand Casting*) e di lega metallica (*Aluminium*), in più viene richiesto di indicare che genere di simulazione effettuare e, in questo caso, si decide di fare previsioni solo sulla fase di raffreddamento (*Solidification*) calcolando, tra le altre, l'evoluzione di eventuali porosità da ritiro (*Shrinkage Porosity*) spuntando le relative caselle. Trattandosi solo di una prima grezza analisi (in cui, peraltro, è stato momentaneamente eliminato il canale di colata), non ci si cura del

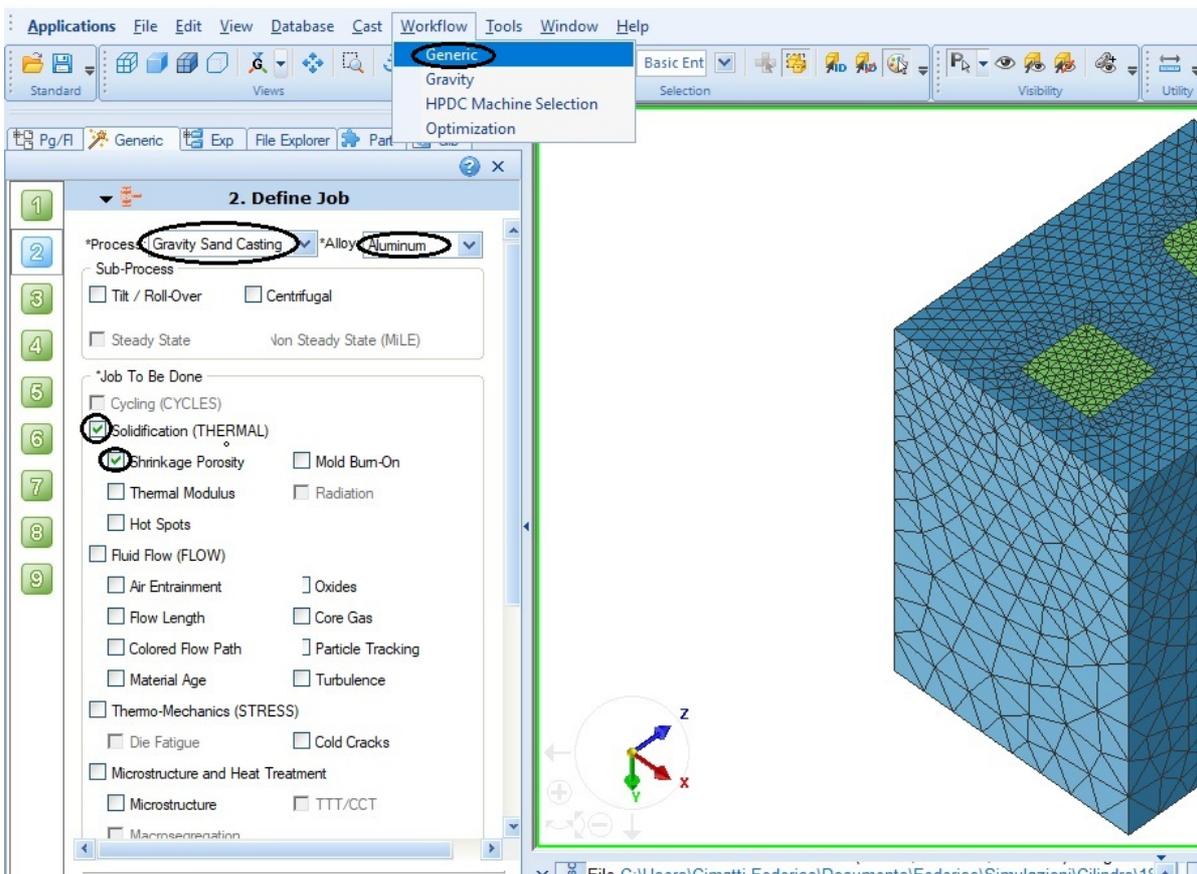


Figura 37: primo passo nella designazione delle condizioni al contorno, si sceglie il tipo di processo fusorio, di lega metallica e di simulazione da effettuare

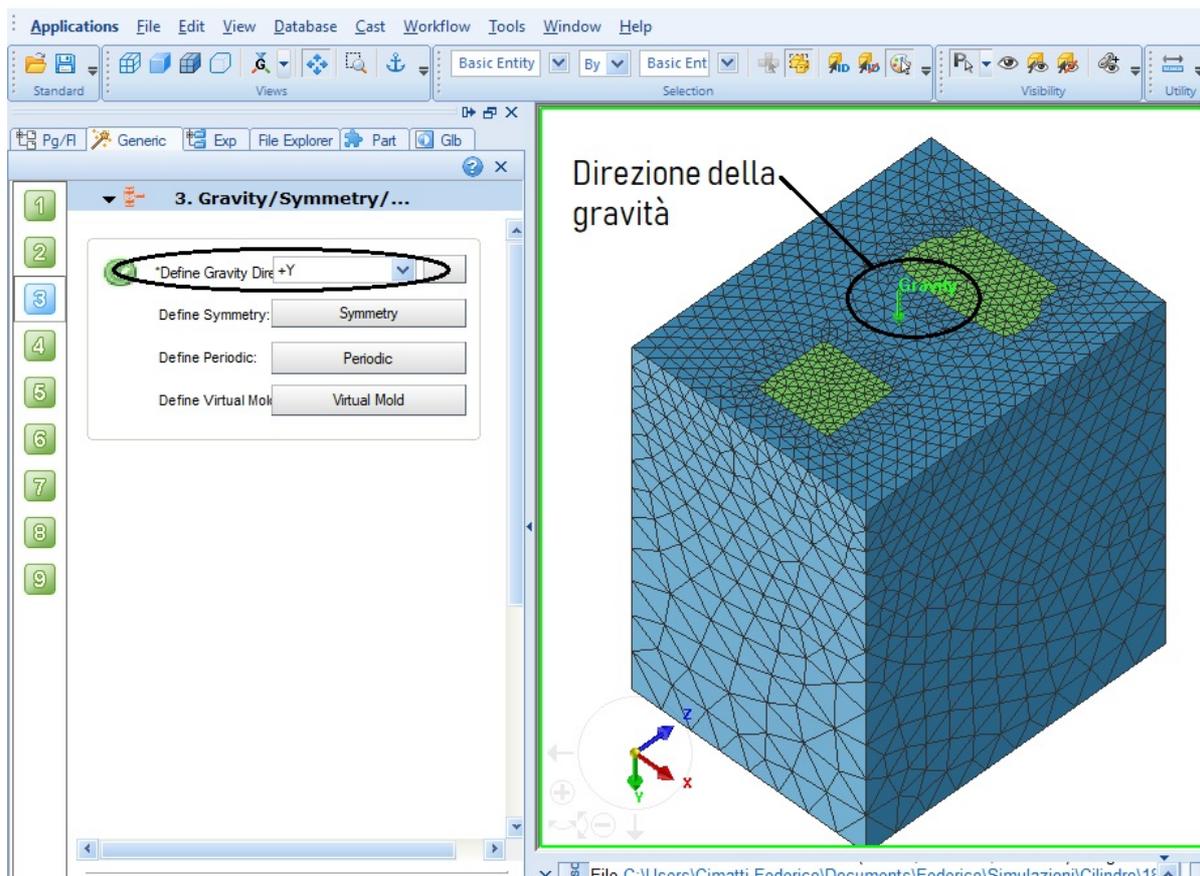


Figura 38: designazione della direzione dell'accelerazione di gravità

comportamento fluidodinamico durante il riempimento (*Fluid Flow*), questo perché gli eventuali risultati sarebbero molto poco significativi per la geometria corrente e, in più, ciò che veramente risulta critico, è il cammino del fronte di solidificazione il quale, invece, si rivela quasi sempre la causa della maggior parte dei difetti. A questo punto si imposta la direzione dell'accelerazione di gravità (Figura 38) e si passa a designare le proprietà dei

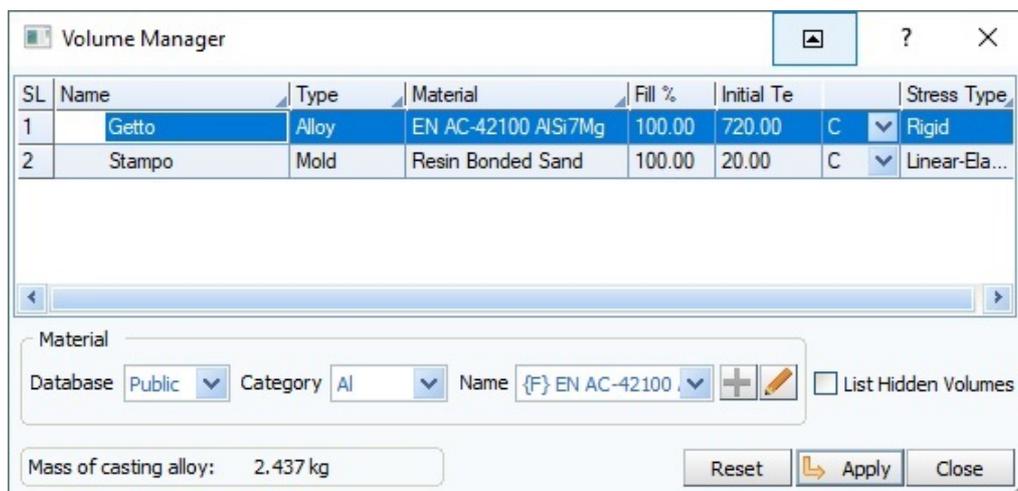


Figura 39: scheda per l'impostazione delle proprietà del getto e dello stampo

volumi costituenti il fuso e lo stampo (Figura 39): per il primo si sceglie di eseguire la simulazione con una lega EN AC- AlSi7Mg0,6 , una condizione iniziale di riempimento al 100% (stampo già pieno) e una temperatura di 720°C significativa di quella di colata; la motta invece si indica realizzata in sabbia legata con resina e con condizioni iniziali di riempimento al 100% e temperatura pari a quella ambiente, ovvero 20°C .

L'attribuzione dei materiali ai due solidi viene fatta scegliendo i più appropriati in apposite librerie e serve per indicare al calcolatore le proprietà termofisiche. La proprietà dello stato del riempimento diviene cruciale più che altro per valutazioni fluidodinamiche ma è comunque richiesto di inserirla anche per il solo studio di solidificazione, infine la temperatura iniziale costituisce una delle condizioni al contorno per la soluzione del problema termodinamico.

Il lettore più attento noterà che la composizione EN AC- AlSi7Mg0,6 non costituiva la scelta ottimale del tipo di materiale, tuttavia si tratta di una lega molto comune per la quale probabilmente si dovrà propendere per ragioni di economia, dunque si decide di utilizzare le sue proprietà per l'esecuzione dei calcoli, oltre a ciò la realizzazione dello stampo in sabbia legata a CO_2 non è esattamente attinente con l'attributo "Resin Bonded Sand", tuttavia, sulle librerie questo è il tipo di materiale che come tipologia si avvicina di più a quello reale e, non potendosi permettere di eseguire prove di caratterizzazione per il caso specifico, ci si accontenta di un compromesso.

Un'altra informazione di cui il software necessita per lo studio di solidificazione è la condizione all'interfaccia tra getto e stampo: in questo caso si ha il contatto di metallo fuso

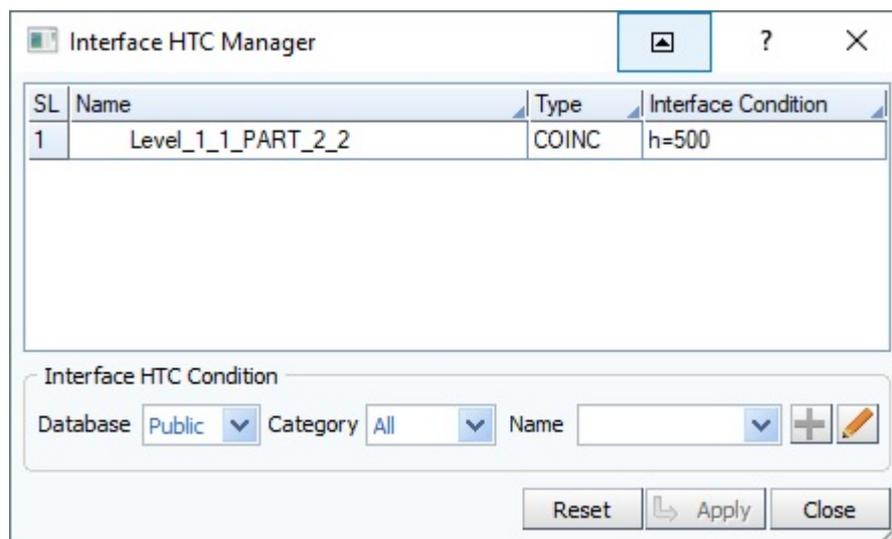


Figura 40: scheda per l'impostazione delle condizioni all'interfaccia

(liquido) con la parete della forma, trattandosi di una tipica situazione di scambio convettivo, si impone la coincidenza delle temperature di solido e liquido sulla superficie del solido, in

più si designa il coefficiente di scambio termico $h=500 \frac{W}{m^2 K}$ (Figura 40).

L'ultima categoria di condizioni matematiche da passare in rassegna è quella delle condizioni al contorno (Figura 41) che in questo caso riguardano le superfici del modello a contatto con l'esterno, precisamente si pone il caso di un raffreddamento in aria calma con scambio termico convettivo, per la computazione dei risultati viene utilizzata una temperatura del

fluido indisturbato di 20°C e un coefficiente di film pari a $h=10 \frac{W}{m^2 K}$.

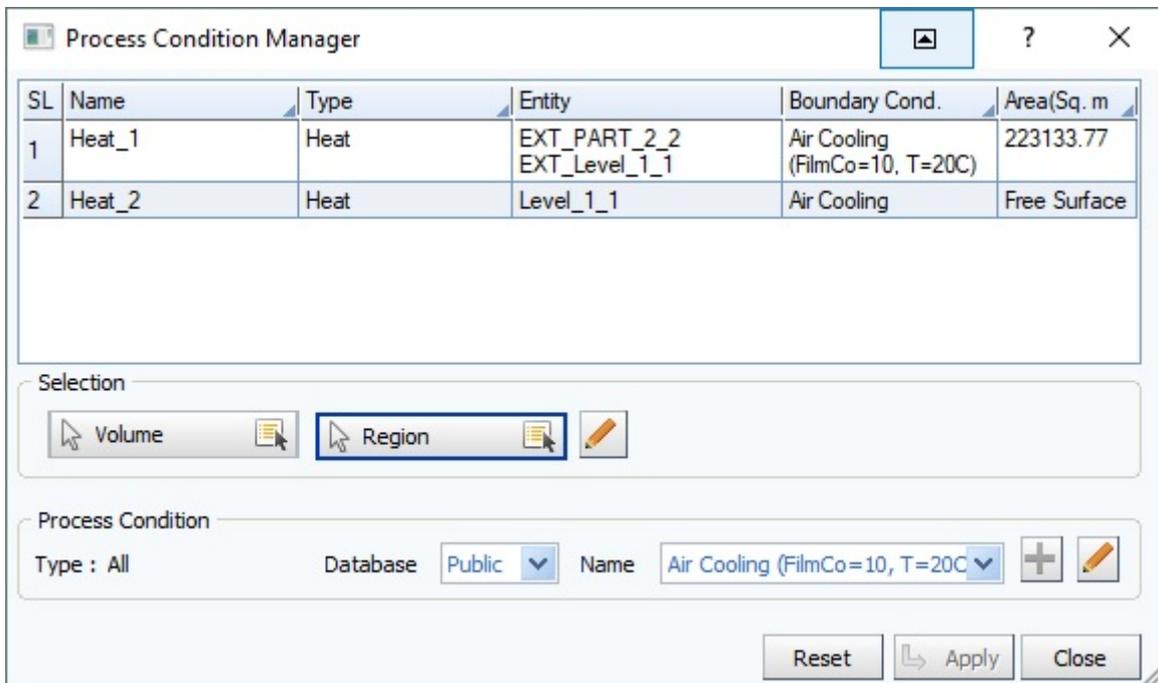


Figura 41: scheda per l'impostazione delle condizioni al contorno

Infine si completa la definizione dei parametri di simulazione indicando i criteri di arresto (Figura 42): il primo è relativo al raggiungimento in ogni punto della geometria di una temperatura 10°C al di sotto di quella di solidificazione della lega metallica selezionata (548-10=538°C), il secondo riguarda il raggiungimento di un numero massimo di iterazioni arbitrariamente stabilito. Quest'ultima non è una condizione che vuole avere valenza prettamente matematica bensì serve, qualora l'algoritmo per motivi diversi non dovesse arrivare a convergenza, ad arrestare la sua esecuzione dopo numero di iterazioni ritenuto come eccessivo; si fa ciò perché, nella maggior parte dei casi, il problema ha origine da un

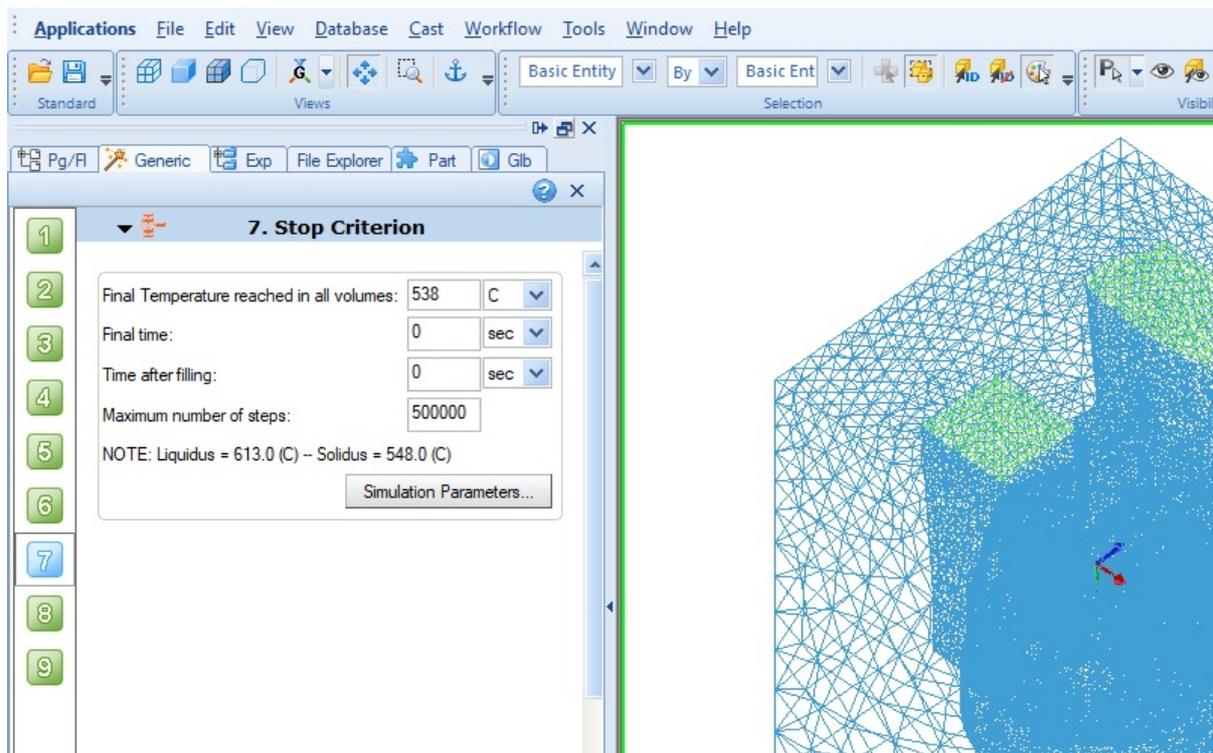


Figura 42: impostazione dei criteri di arresto

errore nel set up redatto dall'utente, quindi, vale la pena fare subito le dovute correzioni anziché attendere un qualche tipo di messaggio di errore.

A questo punto è possibile dare avvio alla computazione, e dopo alcuni minuti, sarà possibile visualizzarne i risultati passando all'ambiente “Viewer”; si ricorda che in questo caso la simulazione riguarda solo l'aspetto termico, dunque si potranno vagliare solo i dati appartenenti a questa categoria. Accedendo al menù a fianco dell'area di lavoro, nella sezione “Thermal” (Figura 43), si focalizza l'attenzione sui tre strumenti principali:

- *Temperature* permette di osservare il campo di temperatura istante per istante su tutto il volume del getto, è lo strumento più comodo per visualizzare eventuali punti caldi;
- *Fraction Solid* consente di mettere in luce il cammino del fronte di solidificazione durante il cambiamento di fase, risulta indispensabile per capire dove, eventualmente, la geometria del pezzo possa dare origine a difetti quali le porosità da ritiro, il caso più eclatante si ha quando dal fronte di solidificazione principale si vede il distacco di uno secondario;
- *Total Shrinkage Porosity* mostra le zone a rischio porosità da ritiro colorandole in viola, è utile per identificare i potenziali difetti soprattutto all'osservatore meno

attento che potrebbe trascurare alcune delle situazioni critiche identificate da “*Fraction Solid*”

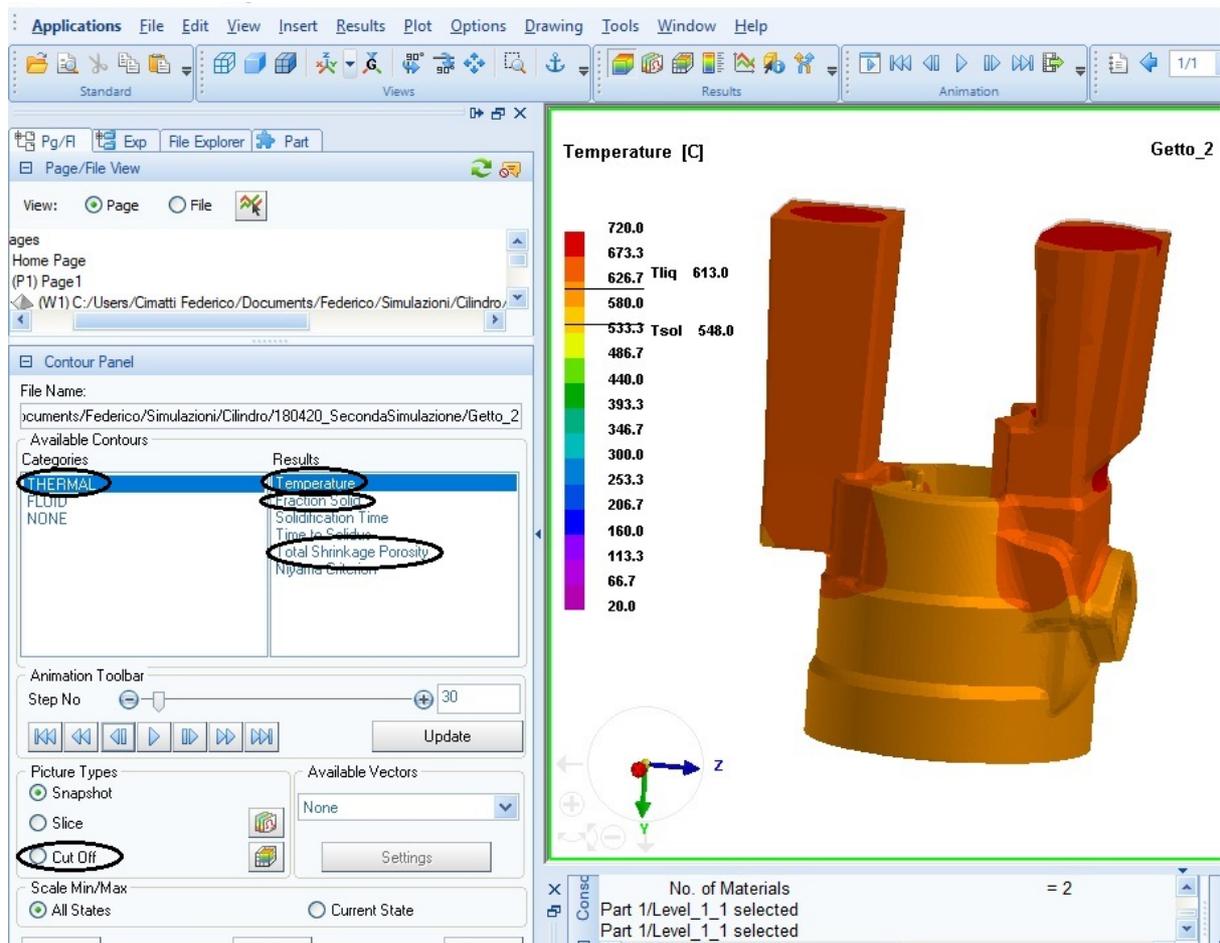


Figura 43: ambiente viewer per la visualizzazione dei risultati, a sinistra i principali strumenti di analisi

Per consentire una più efficace interpretazione inoltre si introduce il tool “*Cut Off*” (Figura 44), il quale altro non è che un tipo di visualizzazione in cui vengono eliminati i volumi caratterizzati da proprietà sopra/sotto una certa soglia o all'interno di un certo intervallo. L'uso più ricorrente viene fatto congiuntamente a “*Fraction Solid*” scegliendo di nascondere tutta la porzione del getto che abbia una frazione di solido maggiore di 0,7, questo perché il materiale in questione può già ritenersi cambiato di fase e la superficie che risulta è identificabile come il fronte di solidificazione. Precisiamo inoltre che, il software sì, permette di prendere coscienza dell'evoluzione dello stato termodinamico nel tempo, tuttavia i risultati vengono mostrati solo relativamente ad intervalli temporali discreti, dunque, passando dalla rappresentazione della situazione attuale a quella della successiva è ricorrente accorgersi di discontinuità dei risultati che parrebbero fisicamente prive di senso, essendo comunque il

tempo suddiviso in periodi di breve estensione, questo non ha influenza sulle conclusioni che si possono trarre.



Figura 44: finestra di gestione dello strumento "Cut Off"

Come conclusione di questa prima grezza simulazione si riportano una immagine del fronte di solidificazione in una delle fasi più critiche (Figura 45) e una relativa alla presenza di eventuali porosità da ritiro (Figura 46). Fortunatamente, già in questa prima fase, i risultati fanno ben sperare, ovvero si nota solo un piccolissimo potenziale difetto nella zona centrale del pezzo e pure la propagazione del cambiamento di fase non sembra così critica. Occorre però ricordare che è ancora mancante il canale di colata il quale, con la sua inerzia termica, potrebbe diventare esso stesso causa di problemi, in più le forme dei montati sono state modificate con totale noncuranza del fatto che debbano essere parte di un modello estraibile, ergo, anch'esse saranno passibili di ulteriori aggiustamenti. Nel seguito si provvederà ad aggiustare il modello 3D nonché ad eseguire altre simulazioni in modo iterativo fino a che non si otterrà un risultato soddisfacente in termini di assenza di difetti, l'impostazione di tutti i parametri e gli strumenti per l'analisi dei dati presentati poc'anzi rimarranno sostanzialmente i medesimi in tutte le prossime casistiche e, per questo motivo, le spiegazioni non verranno più riproposte limitandosi solo alle considerazioni ritenute di volta in volta degne di nota.

Per quel che riguarda la simulazione fluidodinamica, come già accennato, è intenzione eseguirla solo nel momento in cui l'aspetto termico risulterà sufficientemente perfezionato in quanto, proprio quest'ultimo, è generalmente quello che porta al nascere dei maggiori problemi, dunque si rimanda una illustrazione particolareggiata ai prossimi paragrafi.

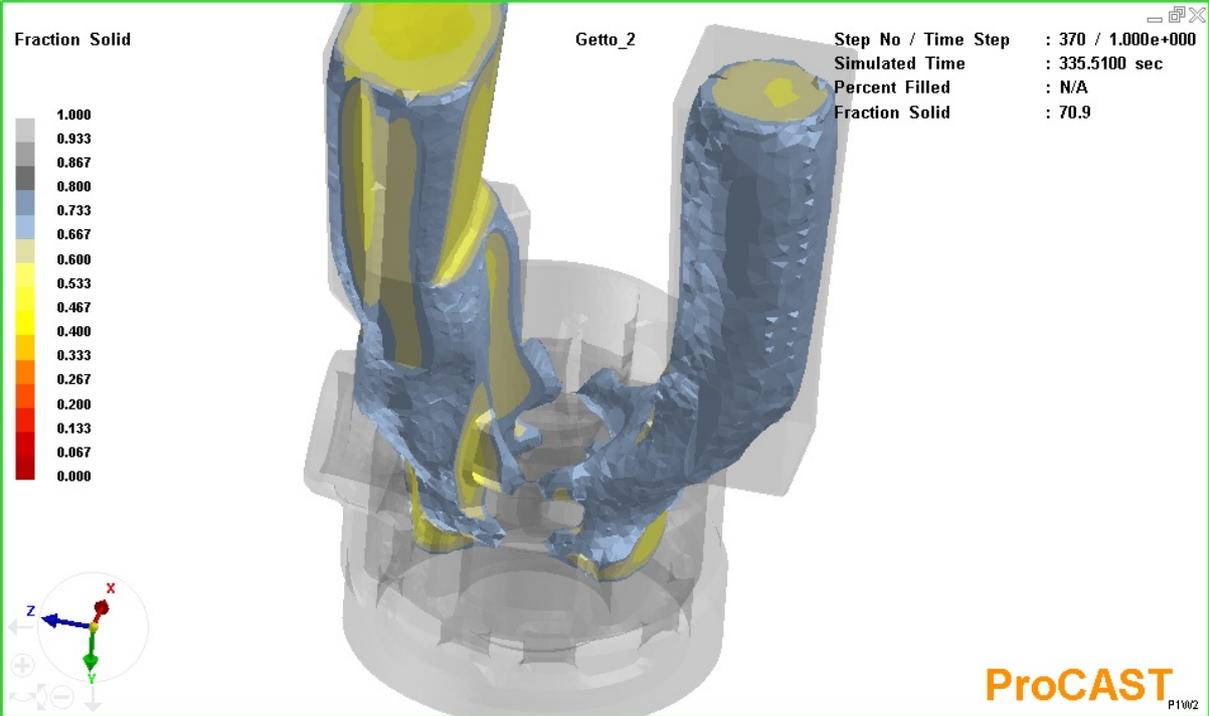


Figura 45: fronte di solidificazione

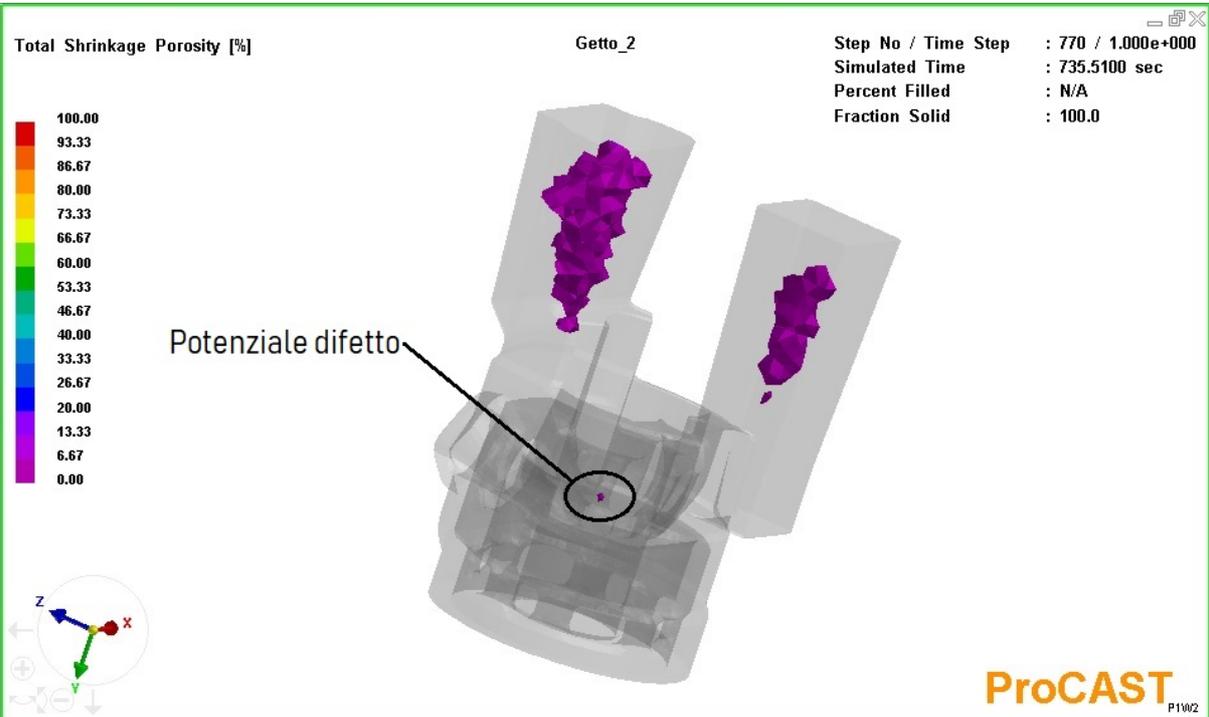


Figura 46: porosità da ritiro localizzata nei montanti

3.3 Iterazioni delle simulazioni termodinamiche e modifiche al grappolo di fusione volte all'eliminazione di cause di difettosità

Prima iterazione

La prima simulazione è stata eseguita su di un disegno in cui la geometria risultava estremamente poco curata ai fini dell'estraibilità dei modelli dai gusci, per tale motivo si è provveduto a migliorare notevolmente questo aspetto inserendo, dove necessario, angoli di sforno e transizioni più graduali dei cambi di sezione. Oltre a ciò è stato ripristinato il canale di colata con piccole modifiche dovute a una nuova conformazione del montante n°1 e sono stati rimossi i volumi critici per le computazioni (es. bassorilievi) utilizzando tecniche il più possibile accurate sul CAD (Figura 47).

I parametri caratteristici della simulazione degli aspetti termici sono rimasti sostanzialmente immutati, con l'unica differenza del fatto che, per maggior semplicità e, visto l'esiguo aumento di costo computazionale, la dimensione della mesh sul getto è stata tenuta ovunque pari a 3mm (in prima battuta si erano inserite zone di transizione che si sono rivelate più una complicazione che di effettiva utilità).

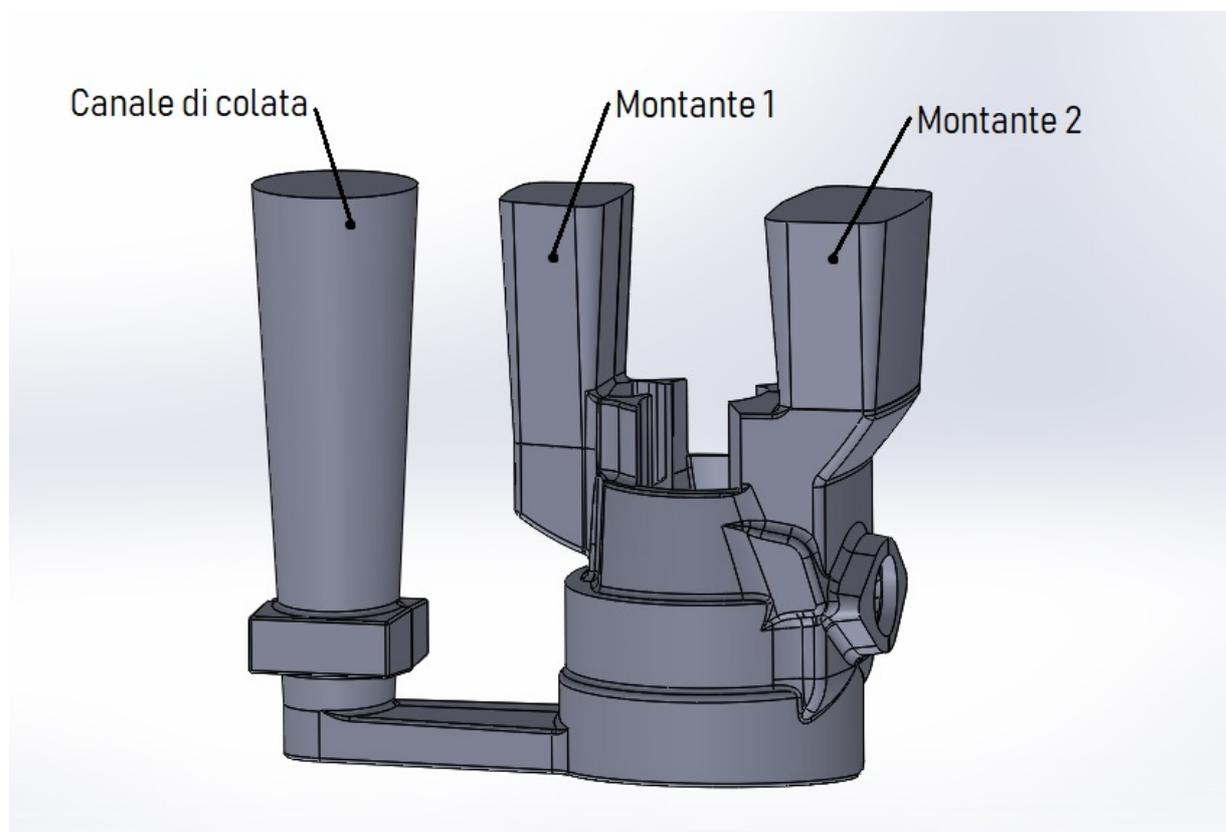


Figura 47: grappolo di fusione, versione modificata per la prima iterazione

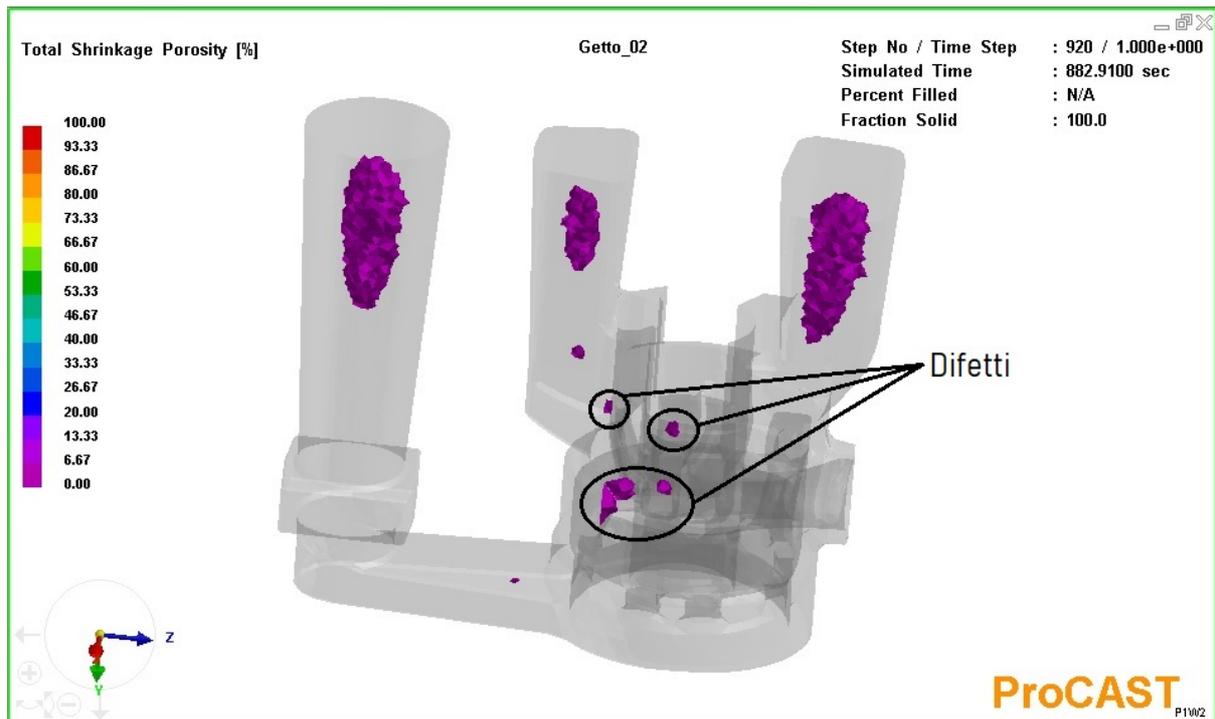


Figura 48: vista delle porosità da ritiro a fine solidificazione

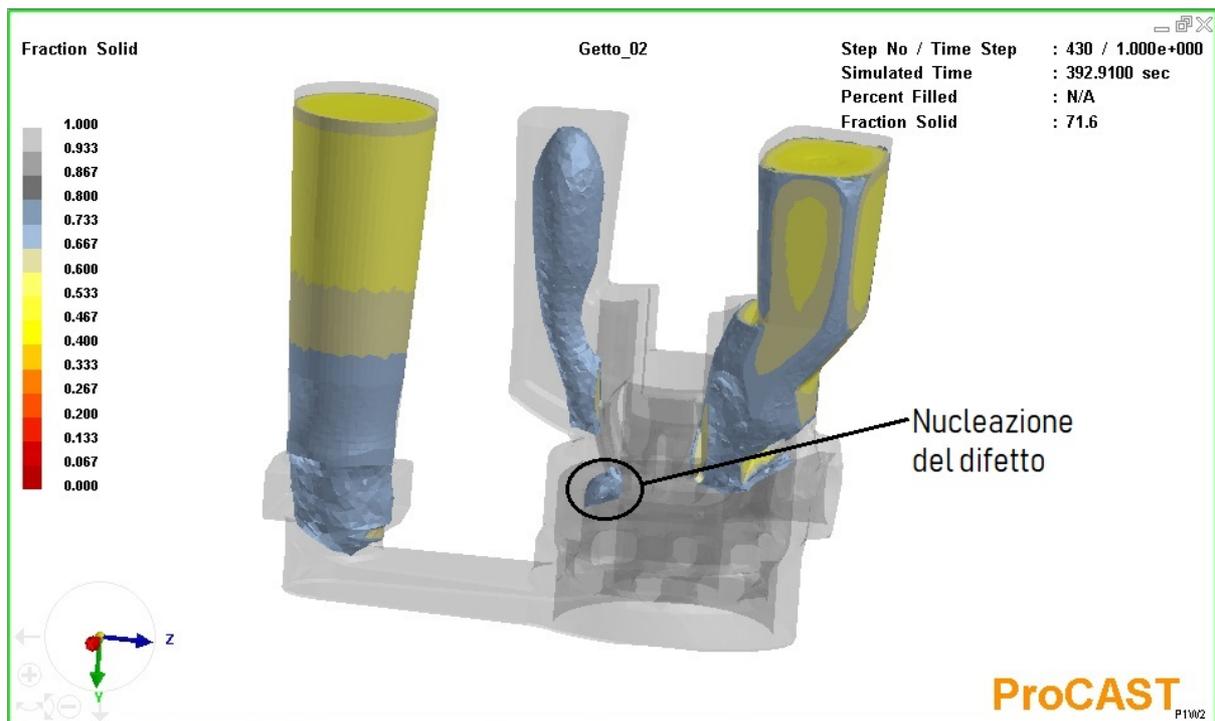


Figura 49: propagazione del fronte di solidificazione e nucleazione del maggior difetto

Il risultato delle modifiche apportate è stato un tragico fiorire di criticità (Figura 48) le quali derivano sostanzialmente dalla reintroduzione del canale di colata, esso infatti, ove localizzato, con la sua inerzia termica funge da riscaldatore per il volume del getto sottostante al montante 1 ed accade che il fronte di solidificazione ora si trova due punti caldi verso cui

propagarsi. Naturalmente non essendo un percorso preferibile rispetto all'altro, si ha la nascita di un fronte secondario relativo al canale di colata il quale non sarebbe in sé problematico, tuttavia lo diventa quando la sua diffusione avviene in modo disordinato generando una serie di sacche di alluminio fuso immerse nel solido circostante che condurranno poi alle porosità da ritiro (Figura 49). Una possibile soluzione a questo inconveniente è aumentare il volume del montante 1 così da accrescerne la capacità termica e sperando di riuscire a richiamare maggiormente la solidificazione verso l'alto, o in altre parole cercando di far divenire trascurabile la presenza del canale di colata. Per quel che invece riguarda la zona sotto l'influenza del montante 2, fortunatamente tutto pare funzionare a dovere dunque non vi si apporteranno cambiamenti.

Seconda iterazione

Come già accennato, la seconda iterazione viene eseguita per valutare eventuali benefici derivanti dall'aumento del volume del montante 1, dunque, una volta modificato il disegno 3D (Figura 50), si imposta una nuova simulazione analoga alla precedente. Osservando il risultato, ci si accorge che la situazione è per certi versi peggiorata perché ora uno dei difetti è

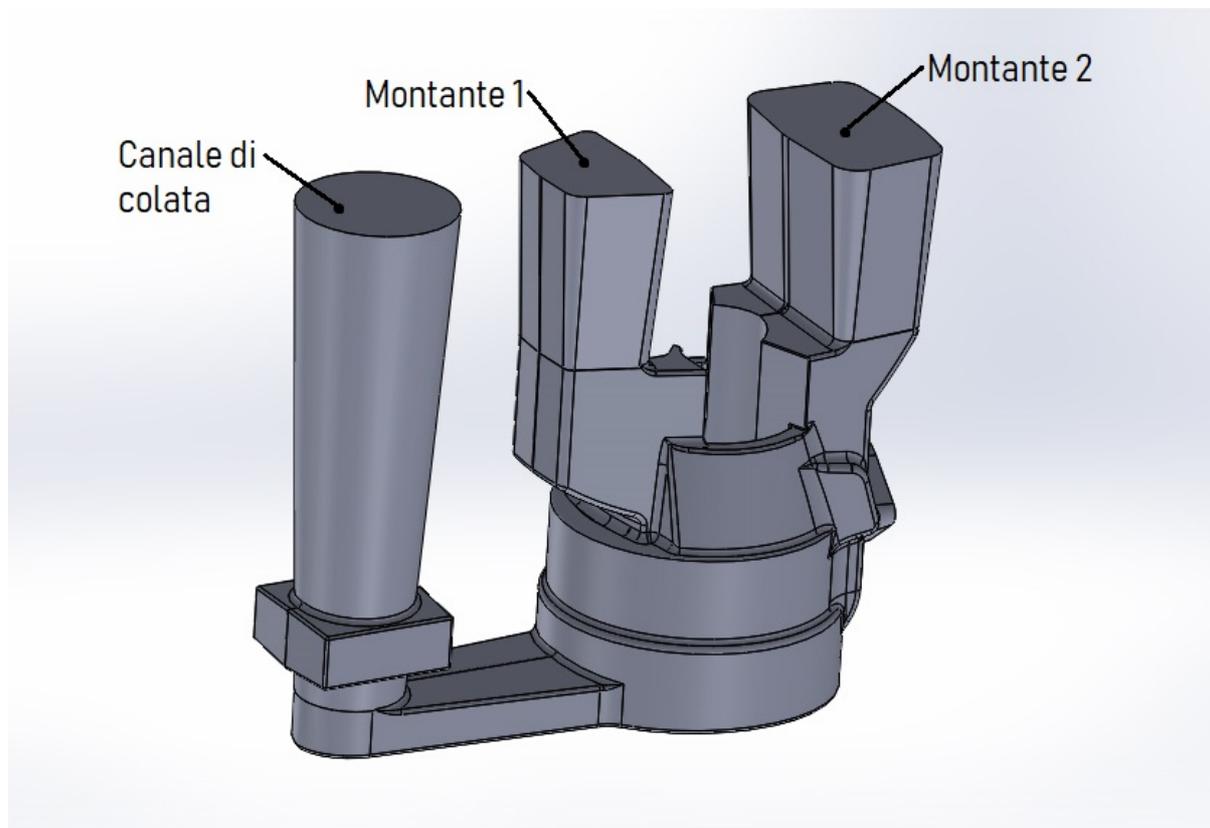


Figura 50: grappolo di fusione, versione modificata per la seconda iterazione, aumentato il volume del montante 1

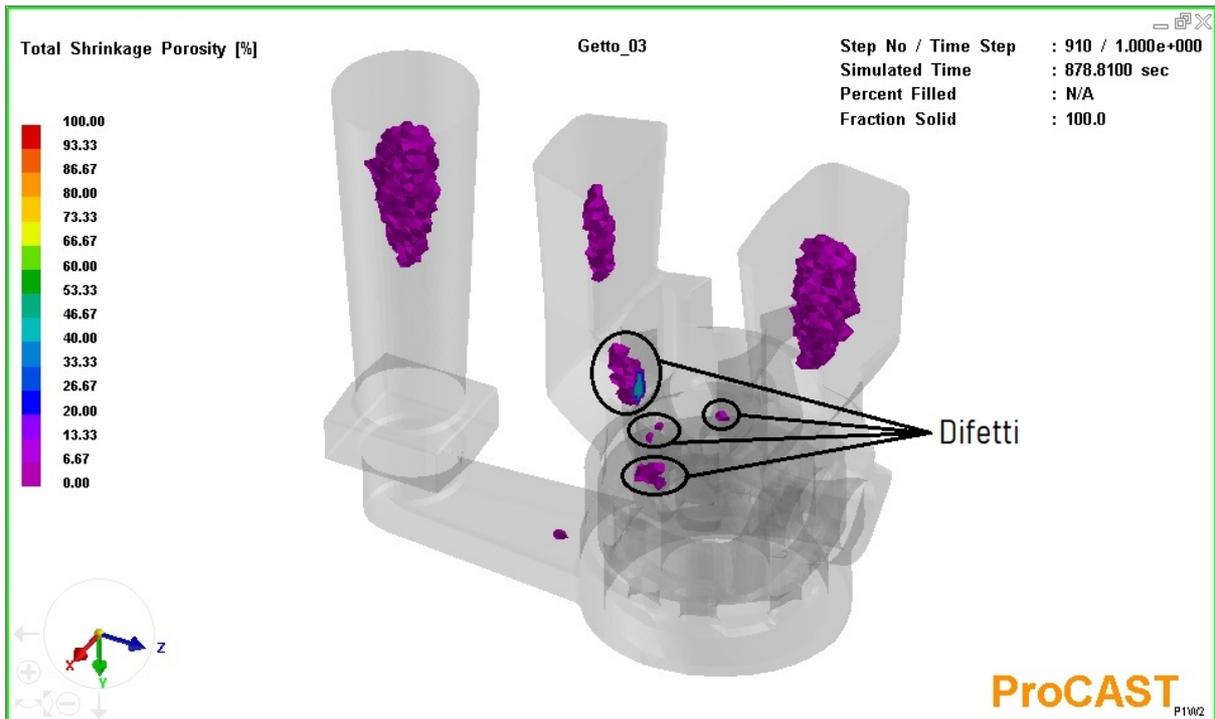


Figura 51: vista delle porosità da ritiro a fine solidificazione

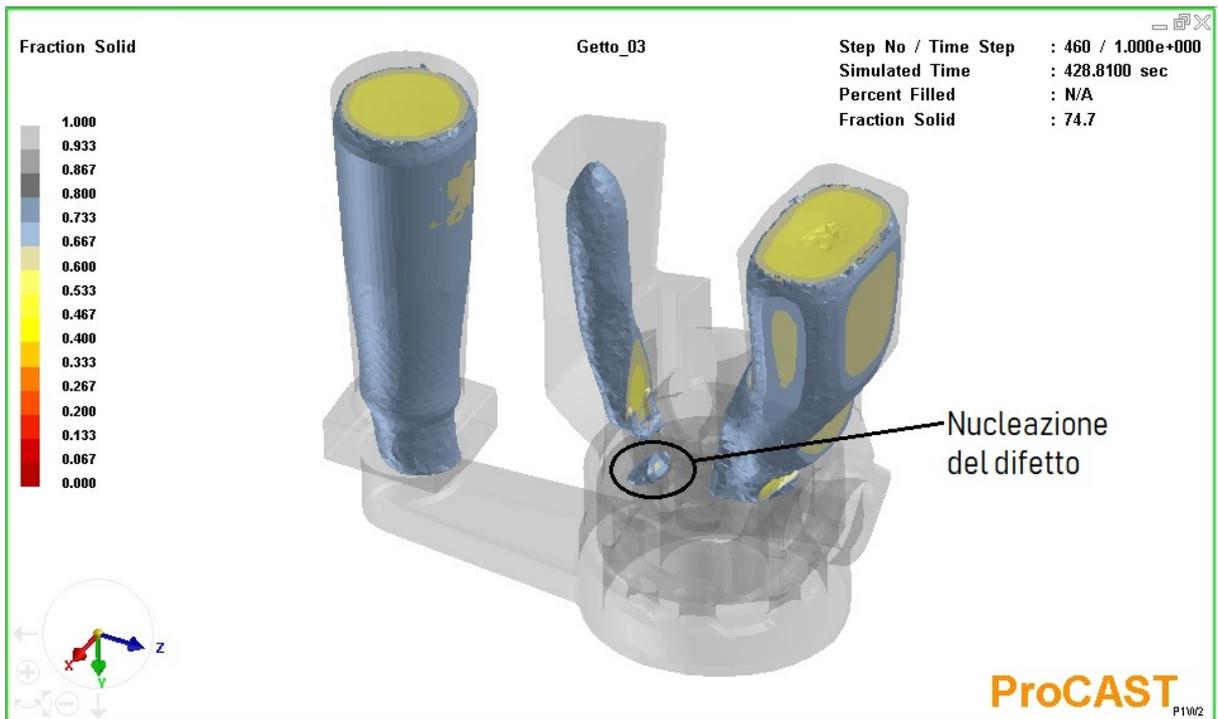


Figura 52: propagazione del fronte di solidificazione e nucleazione del primo difetto

cresciuto in estensione e gli altri non hanno avuto sostanziali riduzioni di volume (Figura 51), si riportano inoltre due ulteriori immagini dove si può apprezzare il momento della nucleazione delle due maggiori porosità in due diversi istanti di tempo (Figure 52 e 53).

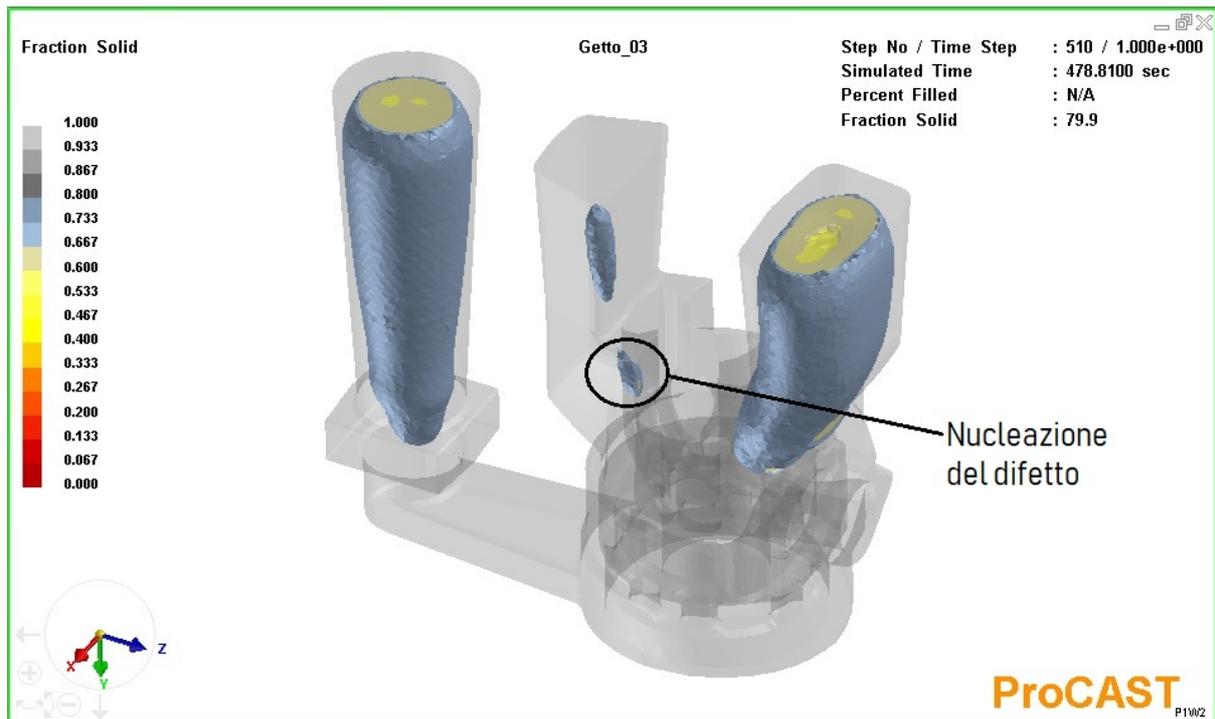


Figura 53: propagazione del fronte di solidificazione e nucleazione del secondo difetto

A questo punto, oltre ad accrescere ulteriormente il montante 1 così che la sua influenza diventi ancora maggiore rispetto al canale di colata, si può pensare di ridurre il volume della sezione terminale di quest'ultimo, senza però eccedere per non rischiare un suo intasamento durante il riempimento per solidificazione prematura.

Terza iterazione

Dopo una ulteriore modifica del modello che ha comportato un aumento di volume del montate 1 e una riduzione dello spessore del tratto orizzontale del canale di colata (da 20mm a 17mm circa, Figura 54), si è eseguita una simulazione sulla nuova geometria tenendo tutto il set up (proprietà termofisiche, condizioni al contorno, condizioni iniziali, ecc...) invariato rispetto al caso precedente.

Fortunatamente in questo caso le migliorie si sono rivelate relativamente efficaci e si è avuta una netta riduzione delle estensioni interessate da potenziali problematiche di ritiro, si può infatti notare che ora le difettosità sono localizzate in due soli punti in prossimità dei condotti di travaso e della parete della canna (Figura 55). Purtroppo, tra le varie posizioni possibili all'interno del getto, quelle occupate in questo caso dalle “macchie viola” sono tra le più pericolose che si possa ipotizzare, una porosità nella zona del sovrametallo della camicia infatti potrebbe portare ad avere una superficie tormentata da piccoli crateri dopo l'esecuzione delle lavorazioni di finitura. Siccome questo condizionerebbe gravemente la capacità di

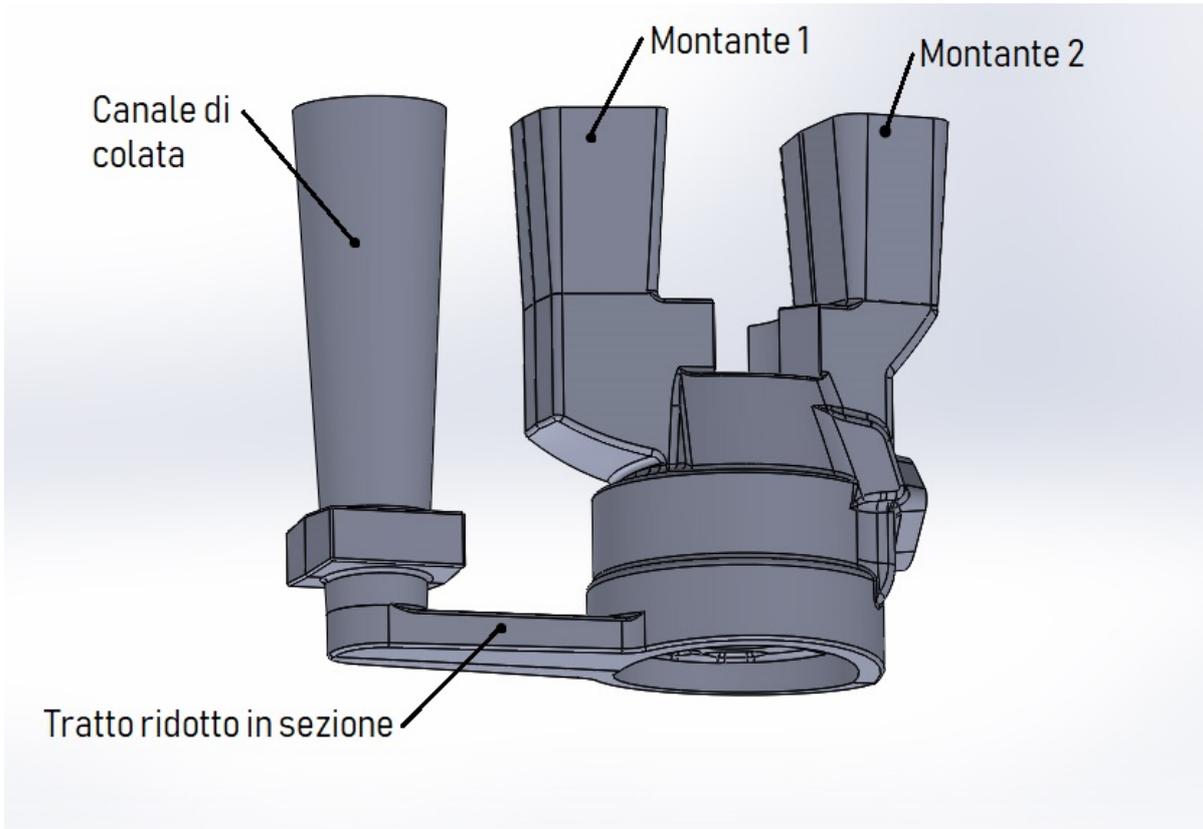


Figura 54: grappolo di fusione, versione modificata per la terza iterazione, aumentato il volume del montante 1 e riduzione della sezione del tratto terminale del canale di colata

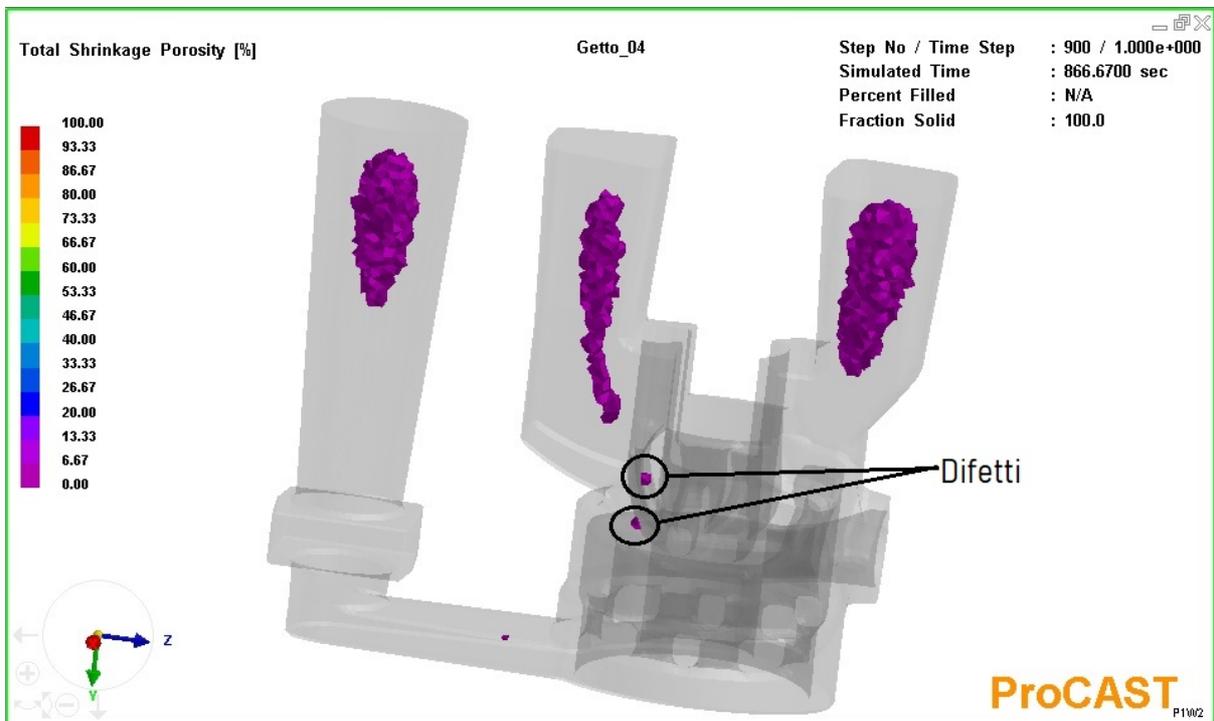


Figura 55: vista delle porosità da ritiro a fine solidificazione

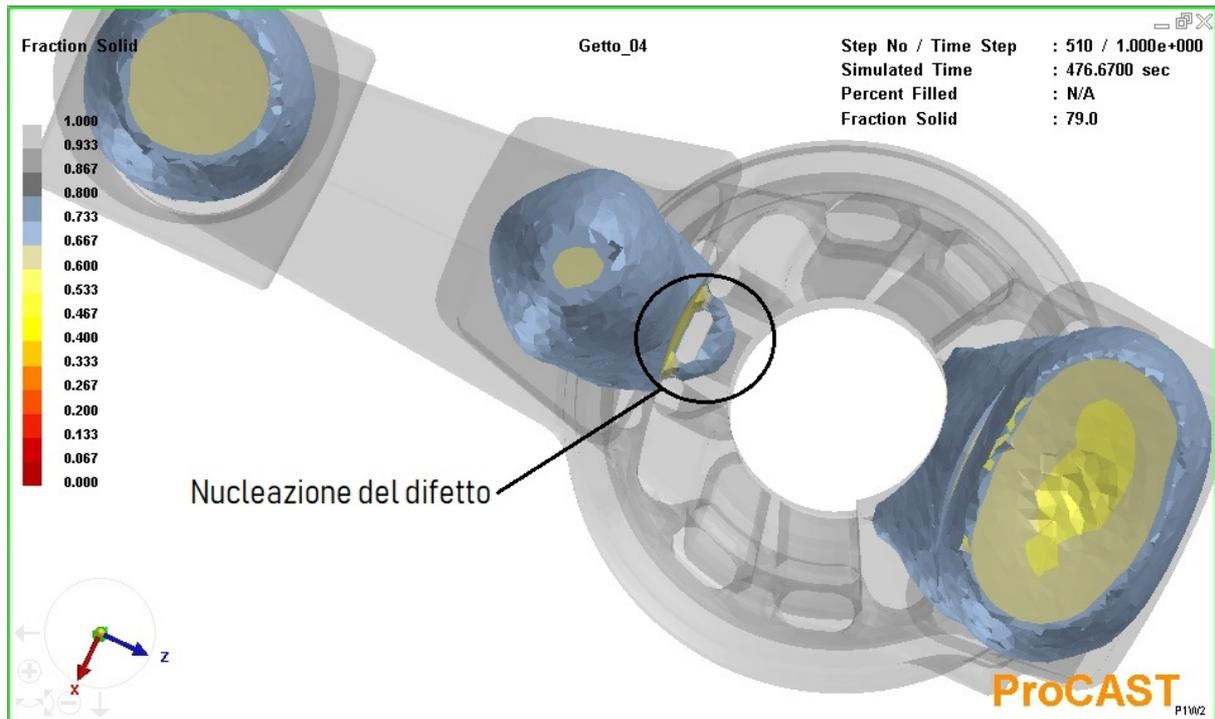


Figura 56: propagazione del fronte di solidificazione e nucleazione di uno dei due difetti

ritenuta dei gas da parte del pistone, per evitare il più possibile di dover scartare un certo quantitativo di pezzi, è necessario curare quanto più possibile la progettazione del processo fusorio per renderlo intrinsecamente più sicuro sul piano della qualità.

In tal proposito, è possibile aumentare ulteriormente il volume del montante 1 così da ridurre ancor di più l'eventualità del distacco di un fronte di solidificazione secondario.

Quarta iterazione

Dopo aver apportato ulteriori correzioni al disegno del grappolo di modo da aumentare ancora una volta il volume del montante 1 (Figura 57), si è eseguita una quarta iterazione delle simulazioni sempre mantenendo costanti tutti i restanti parametri. Il risultato in questo caso è stato la totale scomparsa di uno dei due rimanenti difetti precedentemente identificati e una piccola riduzione dell'estensione dell'altro. Purtroppo la criticità rimasta in essere è anche quella che, delle due, risultava più pericolosa in quanto posizionata tra un condotto di travaso e la canna, per questo motivo ancora non si può chiamare l'attuale risultato soddisfacente e si prosegue con un nuovo tentativo. La strada da intraprendere è senza dubbio quella di un ulteriore (piccolo) accrescimento del montate 1 poiché si è visto che nei passi precedenti ha portato ingenti benefici, purtroppo non si può ritenere prudente ridurre le dimensioni del canale di alimentazione della colata essendo la sua sezione già non particolarmente

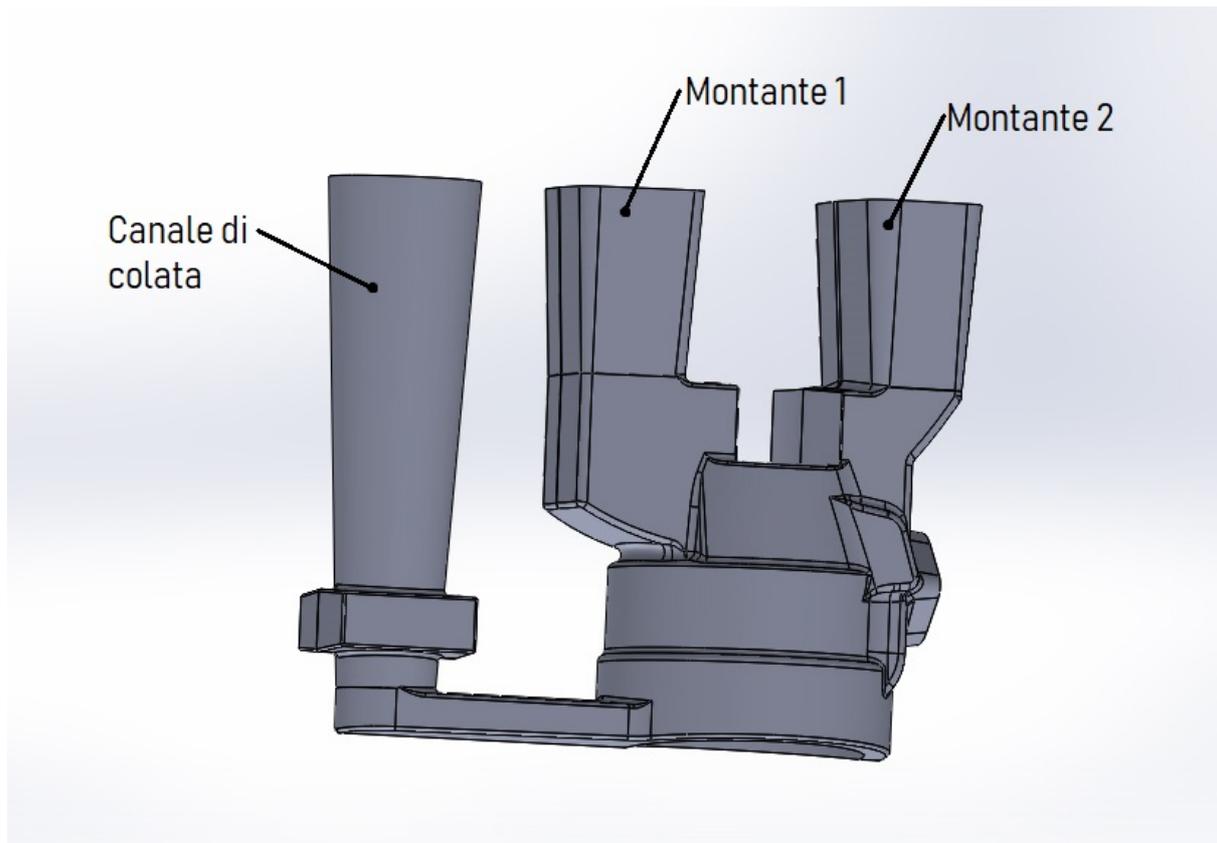


Figura 57: grappolo di fusione, versione modificata per la quarta iterazione, aumentato il volume del montante 1

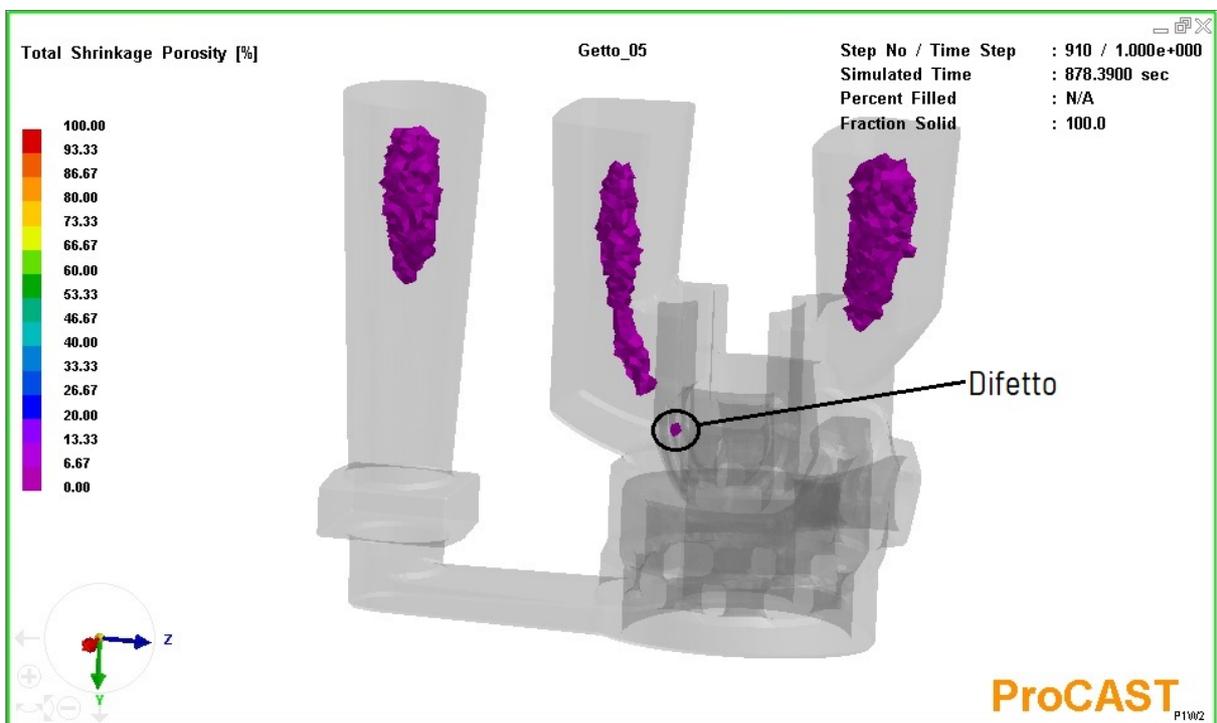


Figura 58: vista delle porosità da ritiro a fine solidificazione

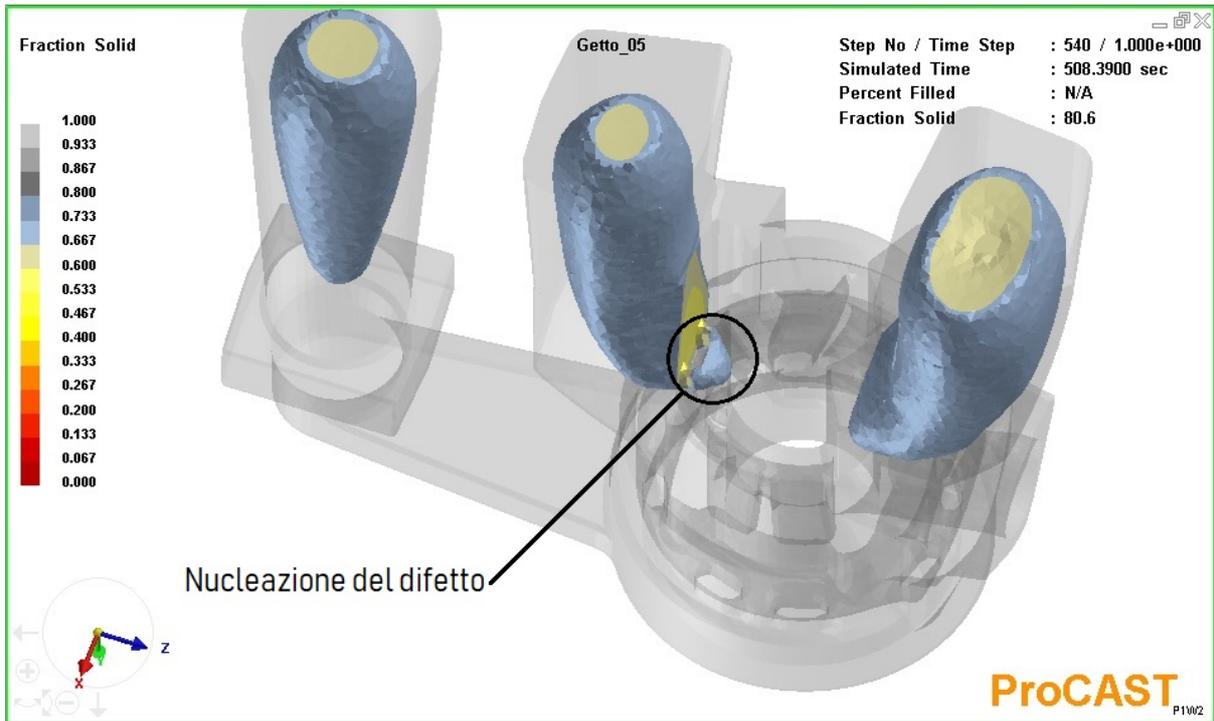


Figura 59: propagazione del fronte di solidificazione e nucleazione del difetto

abbondante, dunque, anche se probabilmente sarebbe stato utile, lo si lascia così come risultava dalla iterazione precedente.

Quinta iterazione

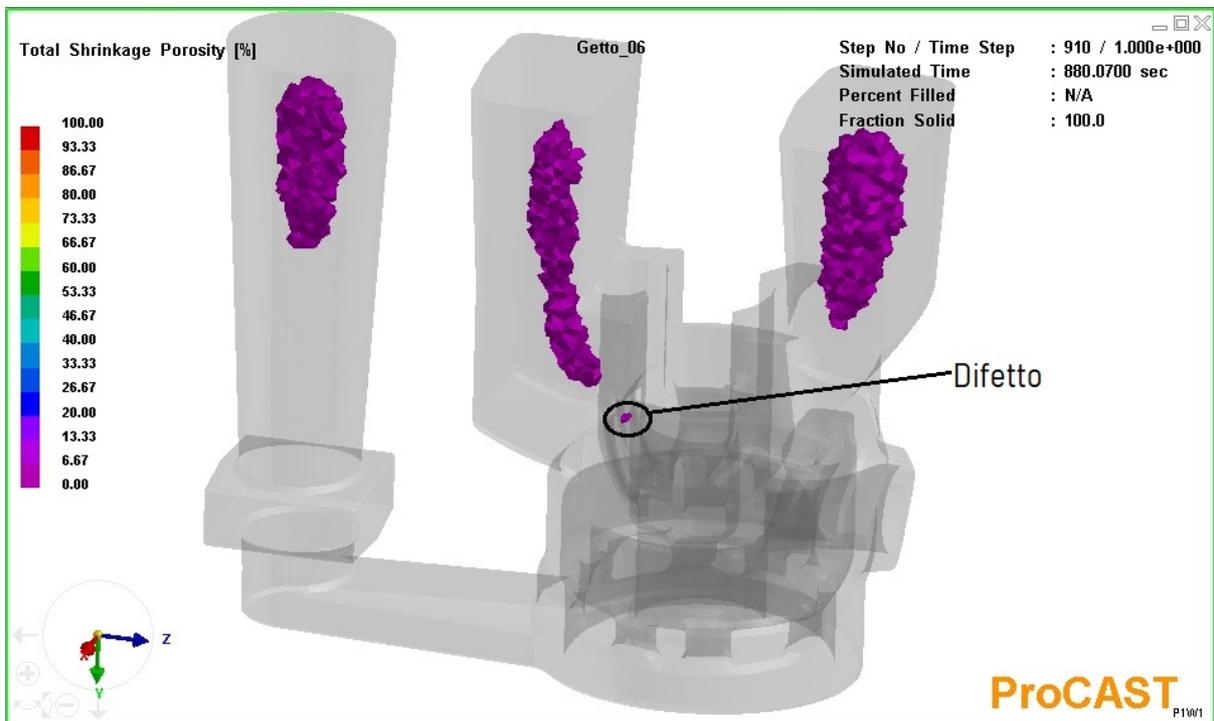


Figura 60: vista delle porosità da ritiro a fine solidificazione

Per tentare di eliminare anche l'ultima criticità si aumenta leggermente il volume del montante 1, poiché però esso è già di dimensioni ragguardevoli, si sceglie di procedere a piccoli passi così da non rischiare una inutile esagerazione. In questo caso le modifiche sono state assolutamente minime e, purtroppo, anche la loro efficacia si è manifestata di conseguenza, per completezza si riporta una immagine dell'analisi di porosità (Figura 60). Confrontandola con la stessa rappresentazione relativa alla simulazione precedente è seriamente complicato trovare differenze tangibili, dunque, senza riproporre considerazioni già note, si passa direttamente ad una nuova versione del modello 3D che possa condurre più vicino al risultato sperato. Le modifiche da apportare dovranno ovviamente essere conformi alla linea guida fino ad ora seguita.

Sesta iterazione

Questo nuovo tentativo è sostanzialmente un ulteriore piccolo passo in direzione dell'aumento delle dimensioni del montante 1, esso, rispetto alla iterazione n°5, è stato più che altro allargato in entrambe le direzioni rappresentative della sua sezione, non si è voluto estenderlo ulteriormente verso la parte bassa del getto così da non interessare zone eccessivamente

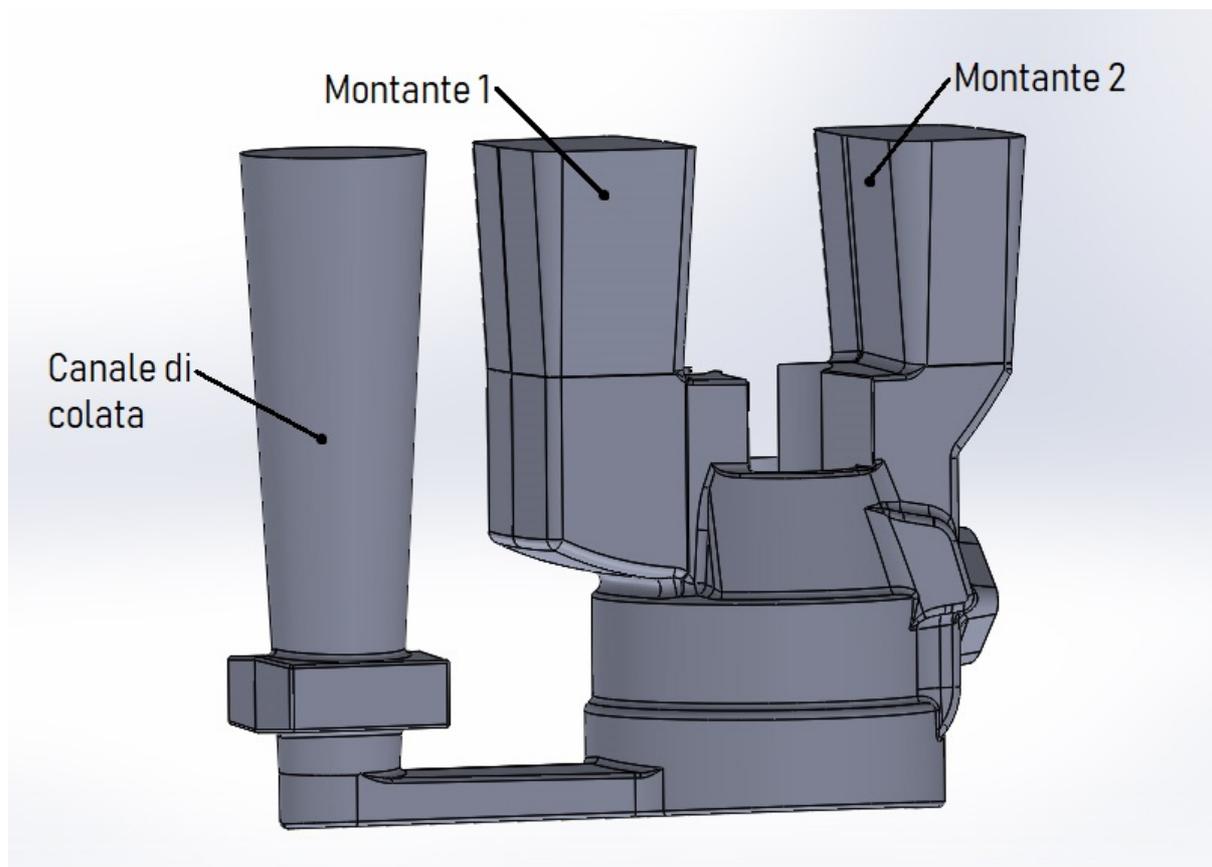


Figura 61: grappolo di fusione, versione modificata per la sesta iterazione, aumentato il volume del montante 1

grandi della superficie del pezzo con la sua presenza (Figura 61). Questo perché, dopo l'estrazione del fuso dalla motta, la segatura delle materozze lascia alla loro radice una superficie di qualità molto mediocre e, anche per motivi estetici, si preferisce avere un'area il

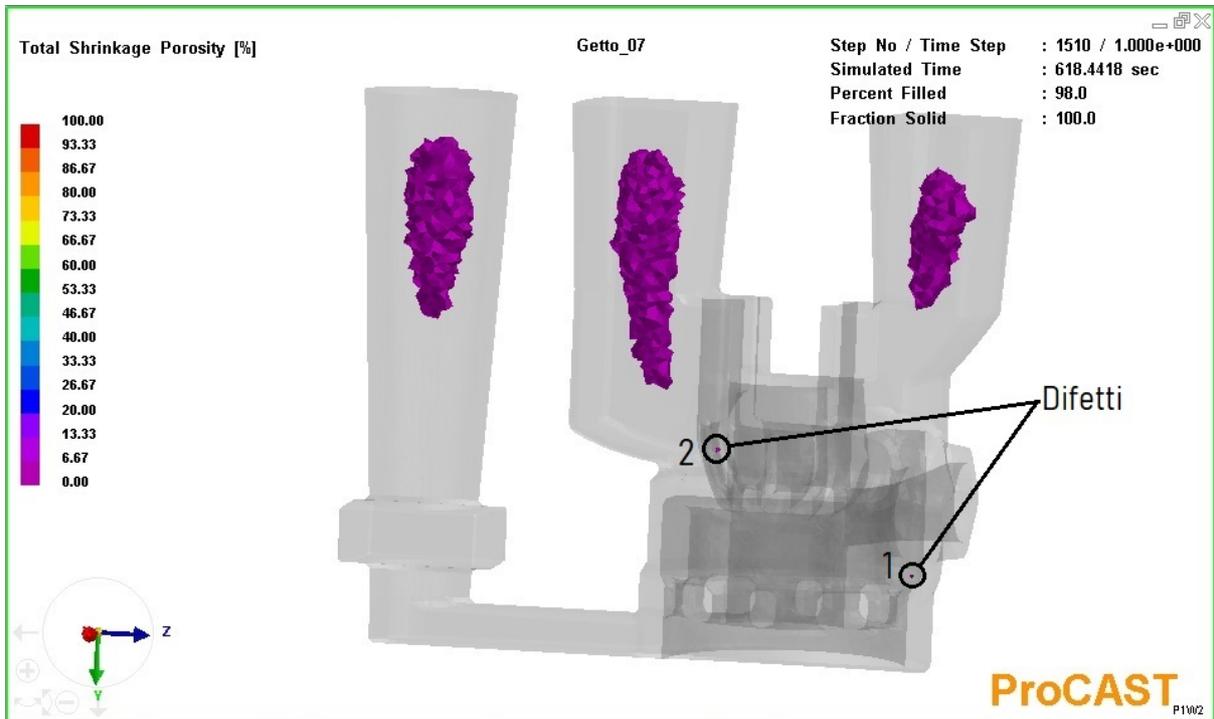


Figura 62: vista delle porosità da ritiro a fine solidificazione

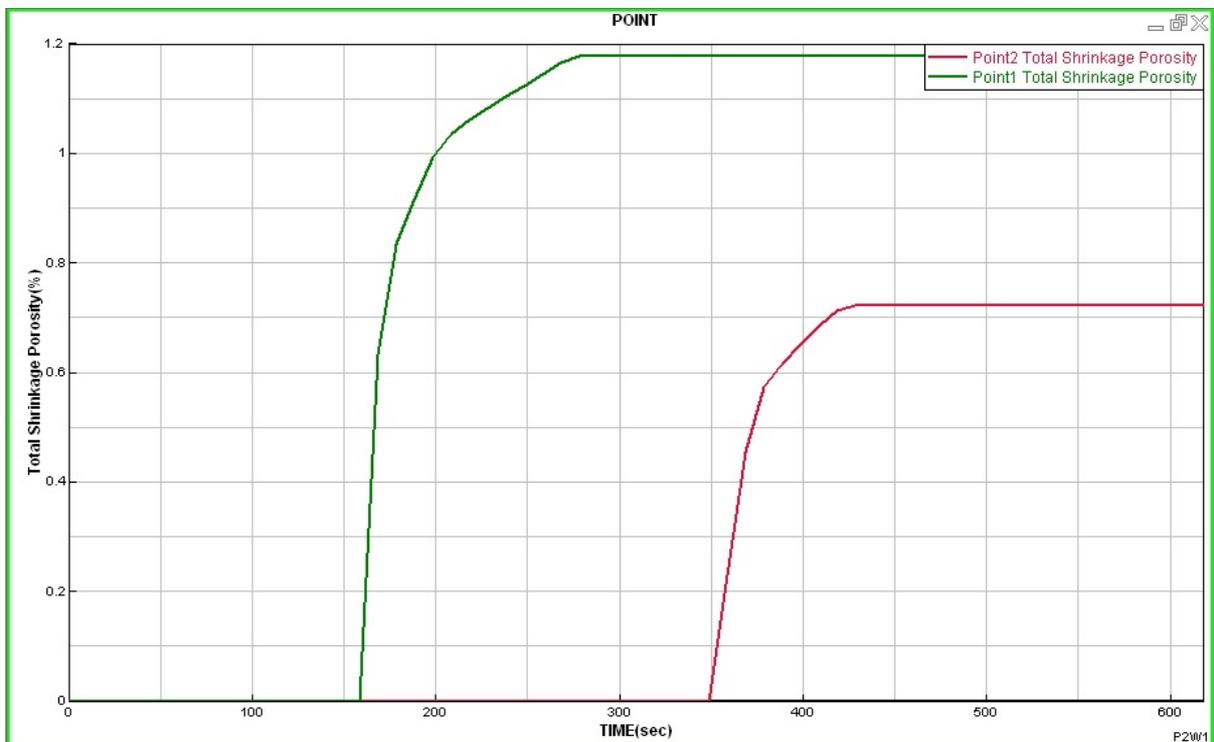


Figura 63: evolvere della porosità da ritiro in funzione del tempo nei punti interessati dai rispettivi difetti (vedi Figura 62)

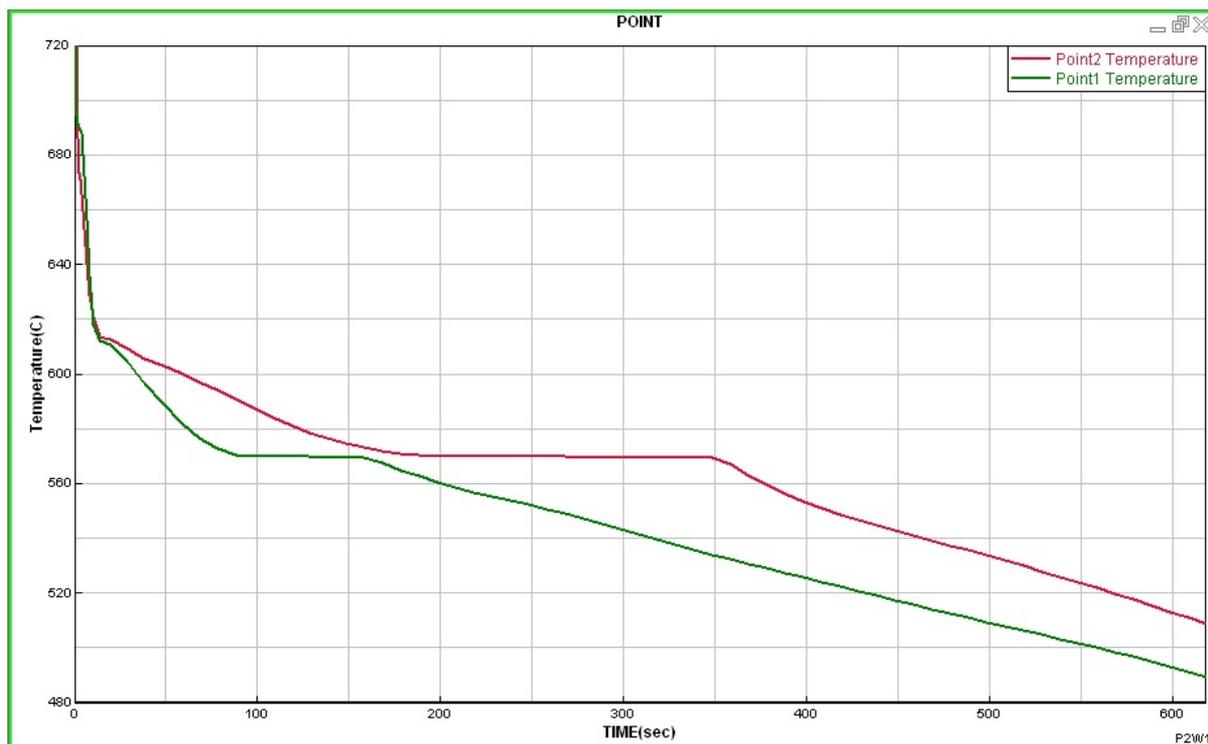


Figura 64: evolvere della temperatura in funzione del tempo nei punti interessati dai rispettivi difetti (vedi Figura 62)

più piccola possibile interessata da una simile scabrezza. Ancora una volta si è eseguito il set up lasciando invariati i dati in input rispetto ai casi precedenti con l'unica eccezione della geometria, i miglioramenti sono stati apprezzabili ma non così entusiasmanti come si poteva pensare: l'imperfezione non ancora eliminata si è ridotta notevolmente tuttavia non risulta completamente assente, in più è apparso, in un altro punto, un altrettanto piccolo volumetto soggetto allo stesso tipo di problematica (Figura 62).

Per quantificare con precisione l'entità dei vizi che potrebbero affliggere il getto si va, a questo punto, a richiedere al software di esplicitare con maggiore dettaglio le analisi nelle due zone incriminate, la risposta viene fornita sotto forma di diagrammi che mostrano l'evolvere nel tempo dell'entità delle porosità da ritiro, della frazione di solido e della temperatura (Figure 63, 64 e 67).

Dati alla mano, si può concludere che il difetto 1 si trova in prossimità della parete esterna del circuito di raffreddamento, ovvero in una zona praticamente per nulla sollecitata e dove lo spessore del materiale è tale da non risultare compromesso da una piccolissima cavità. Per quel che invece riguarda la solita anomalia tra canna e condotto di travaso (difetto 2), il simulatore rende noto che, sulla zona colorata in viola, meno del 1,2% in volume è costituito da un vero e proprio ammanco di materiale (Figura 63).

Considerando che la disquisizione riguarda una piccola frazione di una quantità altrettanto minuta rispetto alle dimensioni del pezzo, si può ritenere lo stato attuale della geometria già migliorato in modo sufficiente, si vuole però eseguire anche un ultimo tentativo per verificare

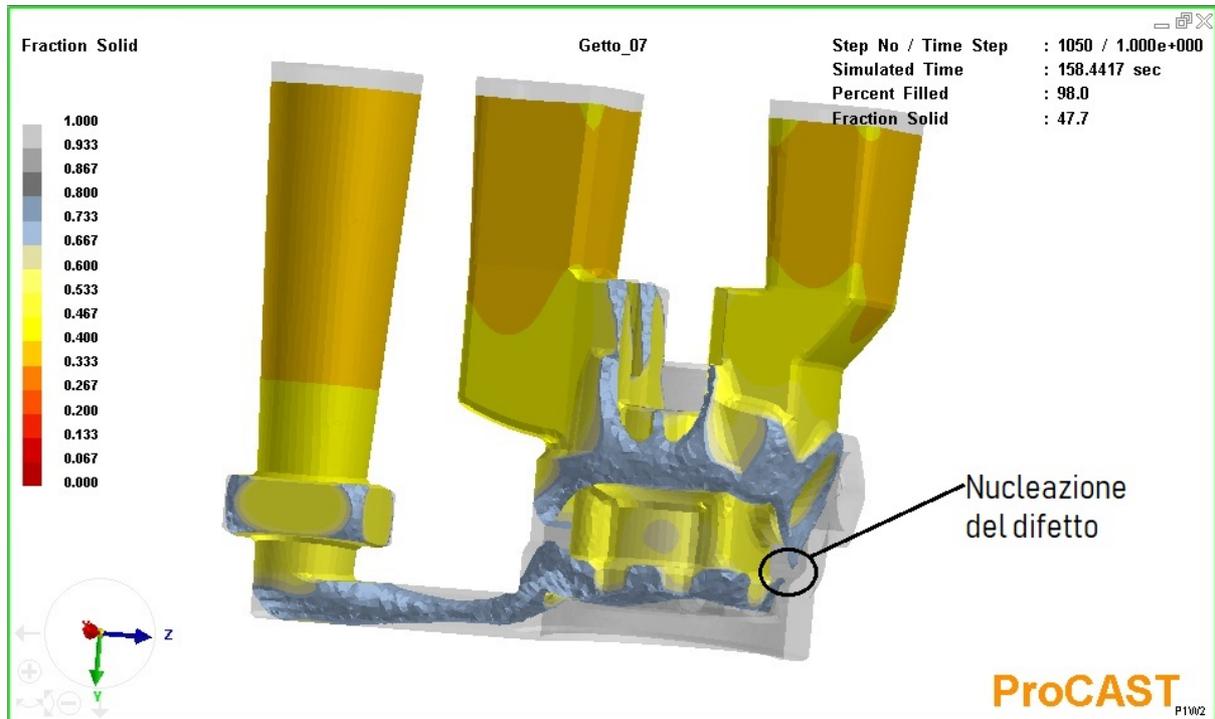


Figura 65: propagazione del fronte di solidificazione e nucleazione del difetto 1

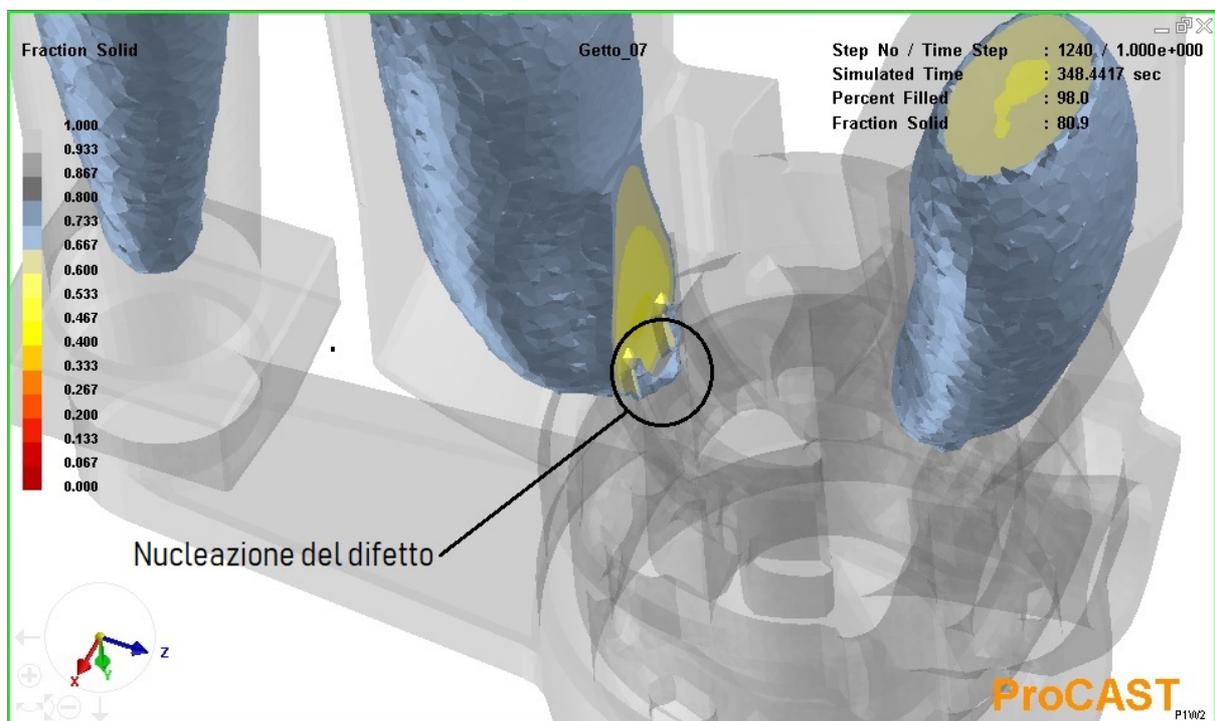


Figura 66: propagazione del fronte di solidificazione e nucleazione del difetto 2

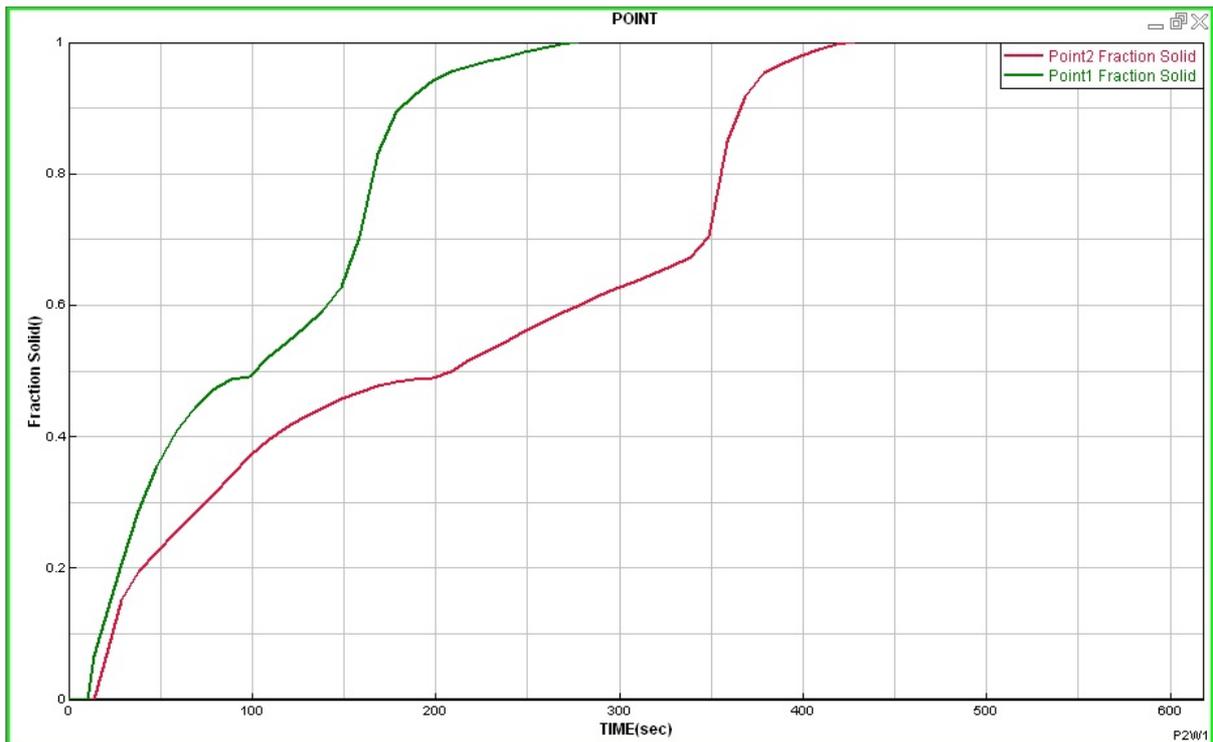


Figura 67: variazione della frazione di solido in funzione del tempo nei punti interessati dai rispettivi difetti (vedi Figura 62)

che il margine di correzione sia effettivamente esaurito, dunque si procede con la settima e ultima iterazione.

Settima iterazione

Anche in quest'ultimo caso il modello tridimensionale ha subito una modifica volta ad un aumento, quasi esasperato, delle dimensioni del montante 1, ovvero lo si è prolungato verso il basso fino ad intersecare la porzione del getto sottostante noncuranti di eventuali inestetismi sul pezzo finito. In questa situazione infatti la rimozione della materozza dovrebbe essere fatta con un taglio parecchio lungo che, oltre a lasciare un evidente “testimone”, è più probabile che venga eseguito in modo poco accurato rischiando di rovinare anche le superfici adiacenti (Figura 68).

Come di rito, viene impostata la simulazione inserendo un set di dati analogo alle precedenti sei e si passa all'analisi dei risultati: evidentemente la presenza di porosità non è stata scongiurata anche conferendo ad uno dei montanti una dimensione quasi al limite del buon senso, precisamente il primo difetto collocato in prossimità dei passaggi per la miscela fresca, seppur forse ancor diminuito in estensione, risulta presente, l'altro vicino al circuito di raffreddamento parimenti non ha accennato a scomparire (Figura 69).

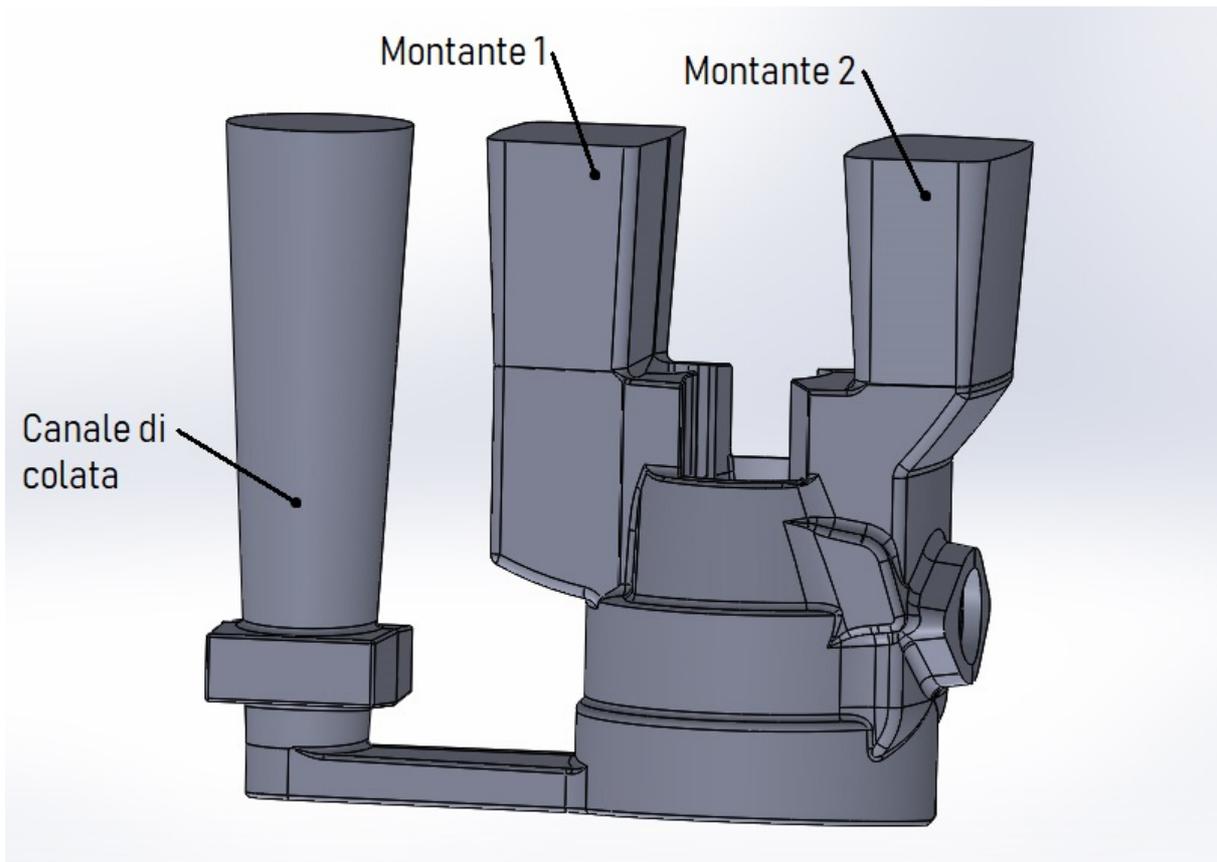


Figura 68: grappolo di fusione, versione modificata per la settima iterazione, aumentato il volume del montante 1

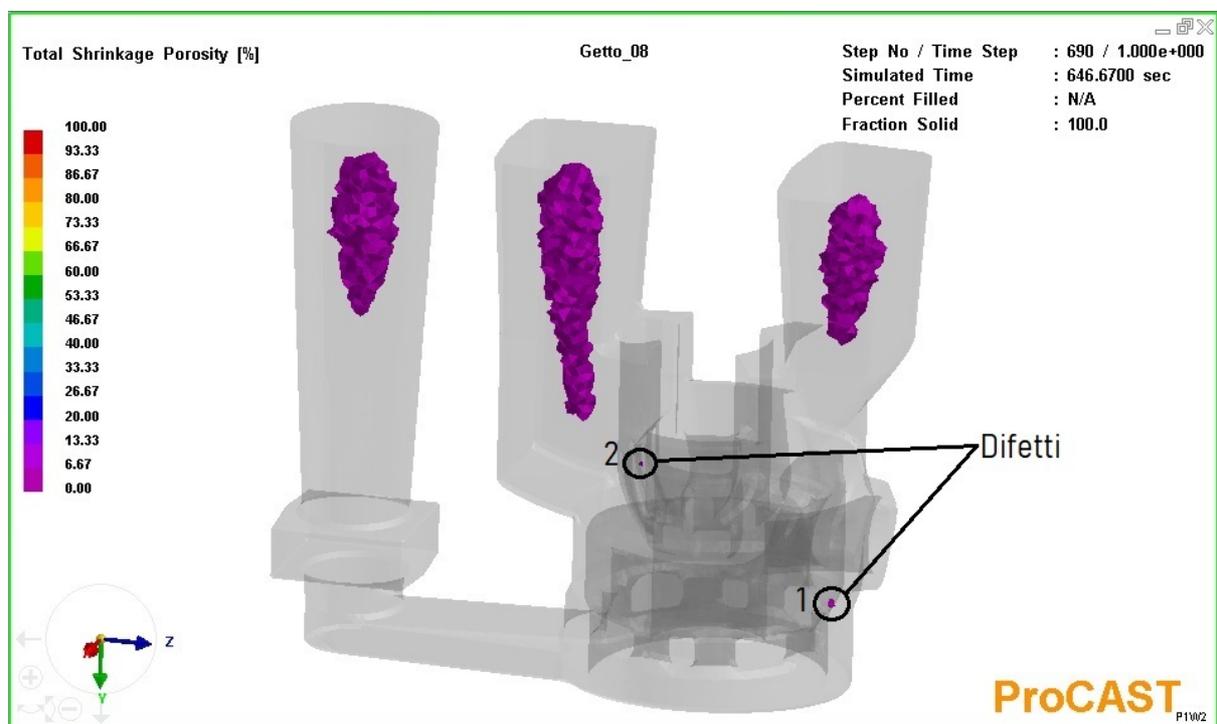


Figura 69: vista delle porosità da ritiro a fine solidificazione

A livello quantitativo, osservando i diagrammi (Figure 70, 71 e 73), il livello di porosità nei punti critici risulta sempre dell'ordine dell'1% e la velocità di raffreddamento non ha subito significative variazioni. Da ciò, è evidente che, nonostante un impatto notevole sul piano estetico, una materozza così ingombrante non porta sostanziali benefici che facciano propendere a scegliere quest'ultima come soluzione, dunque il disegno definitivo secondo i risultati delle simulazioni termodinamiche rimane quello relativo alla sesta iterazione.

Assodata la geometria del grappolo di fusione e preso atto della presenza dei due inevitabili piccoli difetti, si potrebbe comunque pensare di provare a intraprendere altre strade per eliminarli definitivamente: per esempio si potrebbe realizzare per la canna un'anima in cromite che ha una conducibilità termica più elevata della sabbia legata così da promuovere il raffreddamento della parte che, nonostante il montante enorme, non riesce a solidificare in tempo. L'esperienza tuttavia insegna che i costi per l'utilizzo di questi materiali sono piuttosto proibitivi rapportati al valore di un getto in alluminio con massa di circa 1,5kg come quello in studio, dunque si ritiene che, piuttosto che spendere in tecniche molto sofisticate sia conveniente rottamare un eventuale scarto. Un'altra possibilità, molto più economica e che probabilmente sarà messa in atto, è chiedere alla fonderia di gettare sulla sommità del montante 1 una piccola quantità di polvere esotermica, ovvero un granulato solido che, a

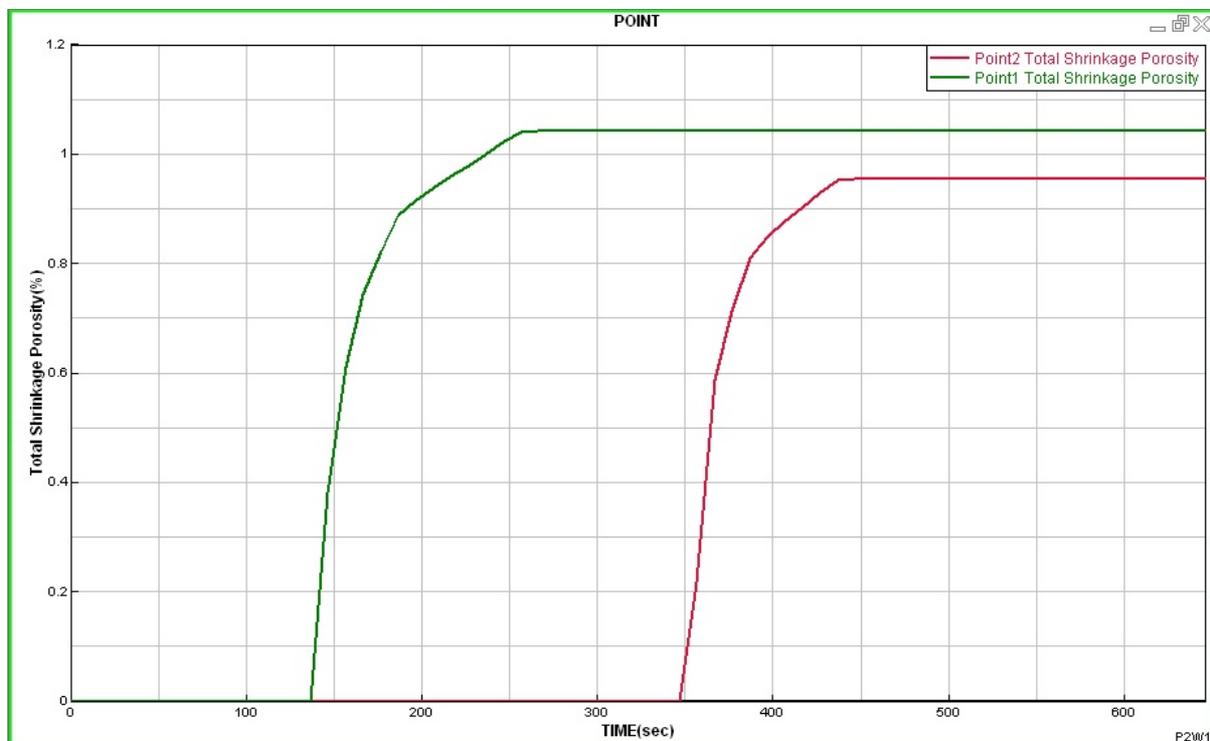


Figura 70: evolvere della porosità da ritiro in funzione del tempo nei punti interessati dai rispettivi difetti (vedi Figura 69)

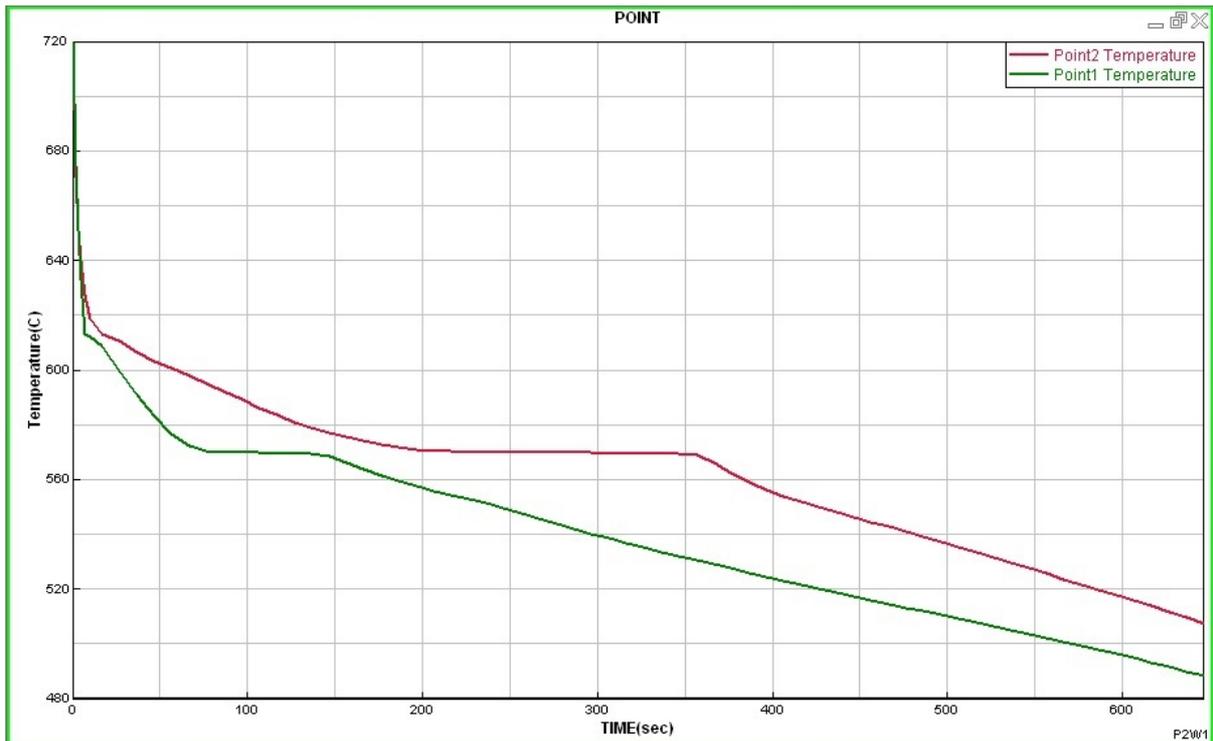


Figura 71: evolvere della temperatura in funzione del tempo nei punti interessati dai rispettivi difetti (vedi Figura 69)

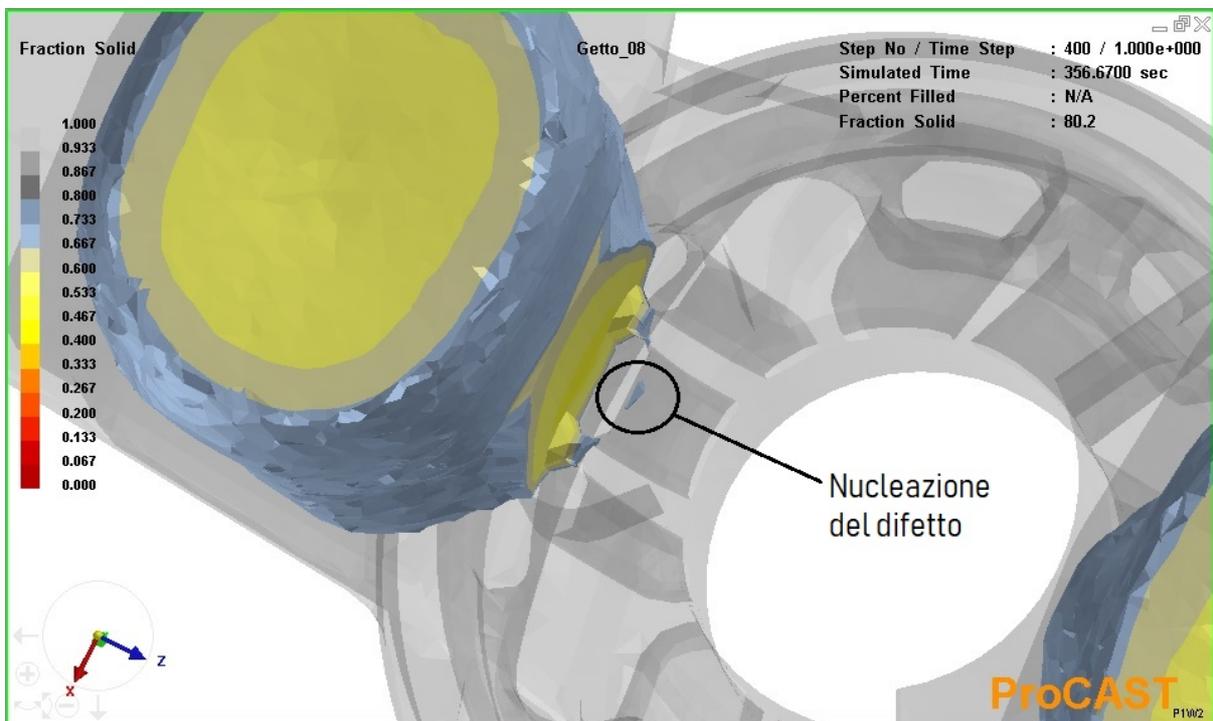


Figura 72: propagazione del fronte di solidificazione e nucleazione del difetto 2

contatto con il metallo rovente ed esposta all'ossigeno dell'aria, spontaneamente si infiamma e, grazie alla sua emissione di calore, impedisce alla materozza di raffreddarsi troppo rapidamente. Oltre a ciò, bisogna considerare che comunque il simulatore numerico ha un suo

marginale di errore e che le condizioni al contorno possono essere anche non esattamente quelle che si avranno nella realtà, quindi sì è vero vengono evidenziati dei potenziali difetti, ma c'è anche la possibilità che non si palesino affatto.

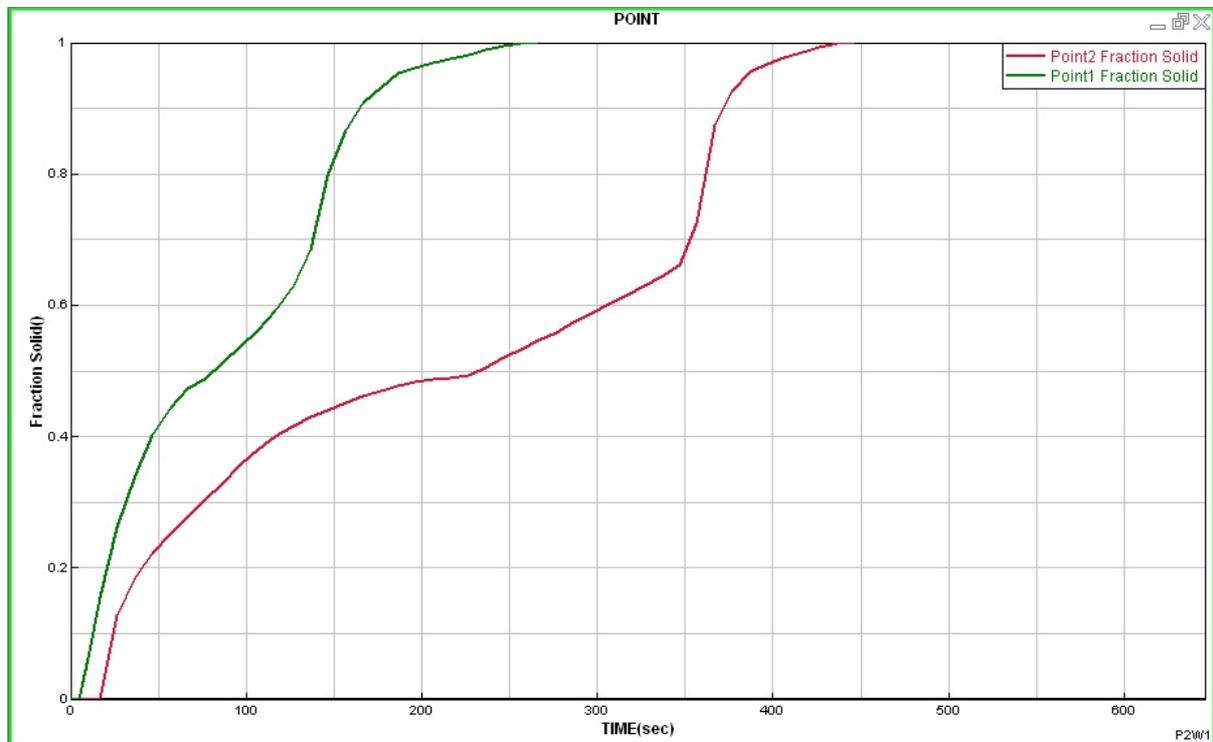


Figura 73: variazione della frazione di solido in funzione del tempo nei punti interessati dai rispettivi difetti (vedi Figura 69)

3.4 Simulazione fluidodinamica

Essendo a questo punto definita una geometria capace di portare a buoni risultati nel suo comportamento termodinamico, è ragionevole preoccuparsi anche di verificare se la fase di riempimento presenti criticità, ovvero se il problema fluidodinamico presenti nella sua soluzione sintomi di inglobamento di aria o di eccessiva turbolenza. Per fare questo, si va ad impostare una apposita simulazione numerica i cui risultati verranno automaticamente uniti dal software ai dati relativi alla parte termica, così da avere un quadro il più possibile completo. In questo caso si sviluppa l'analisi partendo dai file relativi alla sesta iterazione, dunque non è necessario rieseguire la manipolazione dei volumi e delle superfici per ottenere infine i solidi scomposti in volumi elementari, se così non fosse, ovvero si partisse da un disegno mai trattato da ProCAST, il procedimento sarebbe esattamente analogo a quello presentato al capitolo 3.2.

Per richiedere al software di eseguire anche i calcoli per la fluidodinamica si accede all'ambiente “Cast” e si apre il file relativo alla simulazione termica che si desidera approfondire (se non è presente un vecchio file, se ne crea uno nuovo implementando anche la termodinamica come spiegato al capitolo 3.2), quindi si torna ad accedere al menù “Workflow” dal quale si seleziona la voce “Generic”. Così facendo si visualizza il percorso guidato che consente di impostare proprietà termofisiche, condizioni all'interfaccia, condizioni al contorno e tutto quanto altro deve avere il calcolatore in input, si verifica che il processo fusorio, il tipo di lega metallica e il tipo di simulazione termodinamica siano correttamente selezionati, quindi si va a richiedere anche di valutare la fluidodinamica spuntando i riquadri “Fluid Flow”, “Air Entrainment” e “Colored Flow Path” (Figura 74). Sulla scheda successiva è probabilmente sufficiente verificare che la direzione della gravità sia quella corretta (Figura 75), quindi si passa alla modifica delle condizioni iniziali attraverso la scheda “Volume Manager”: per la motta tutto rimane invariato in quanto essa continua ad essere una massa di sabbia a temperatura ambiente, per il volume rappresentante il getto invece si pone un riempimento iniziale pari allo 0% (ovvero si indica che lo stampo è vuoto) lasciando invariato il valore di temperatura (Figura 76).

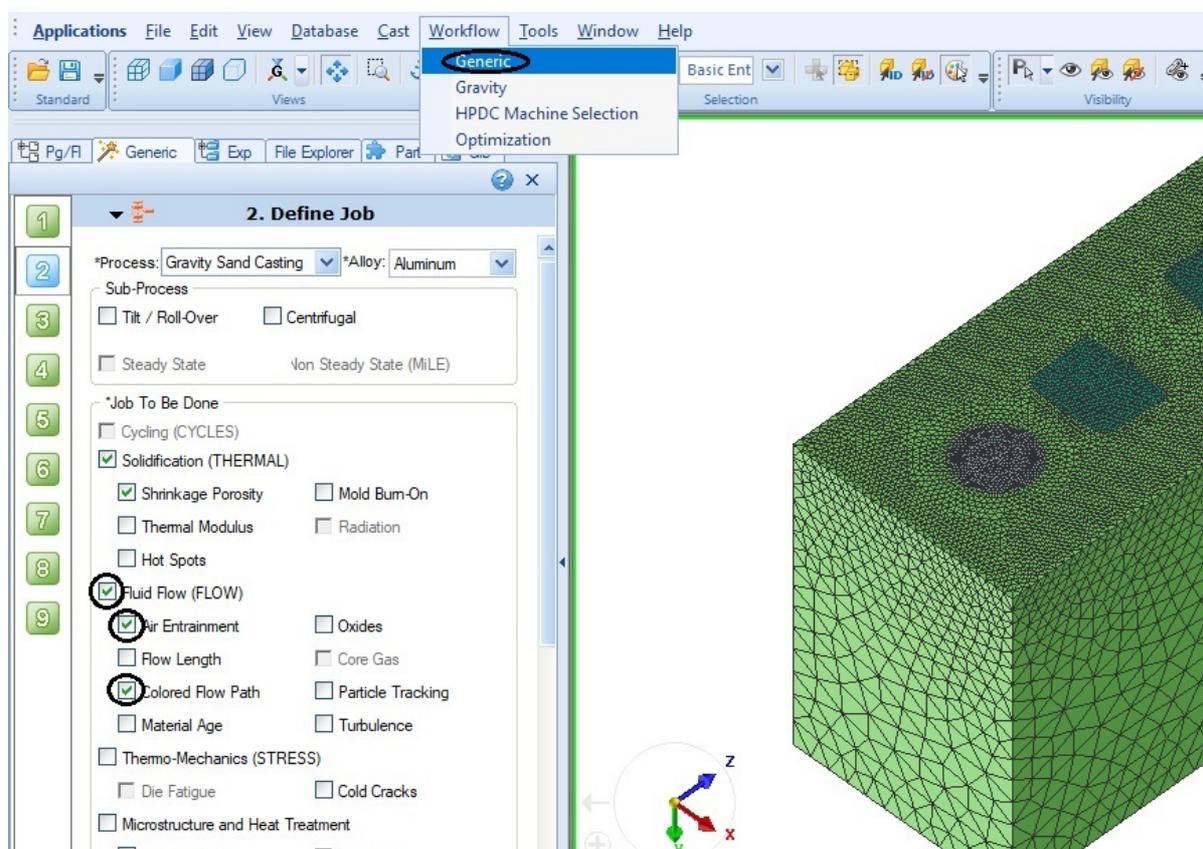


Figura 74: designazione del tipo di simulazione da effettuare

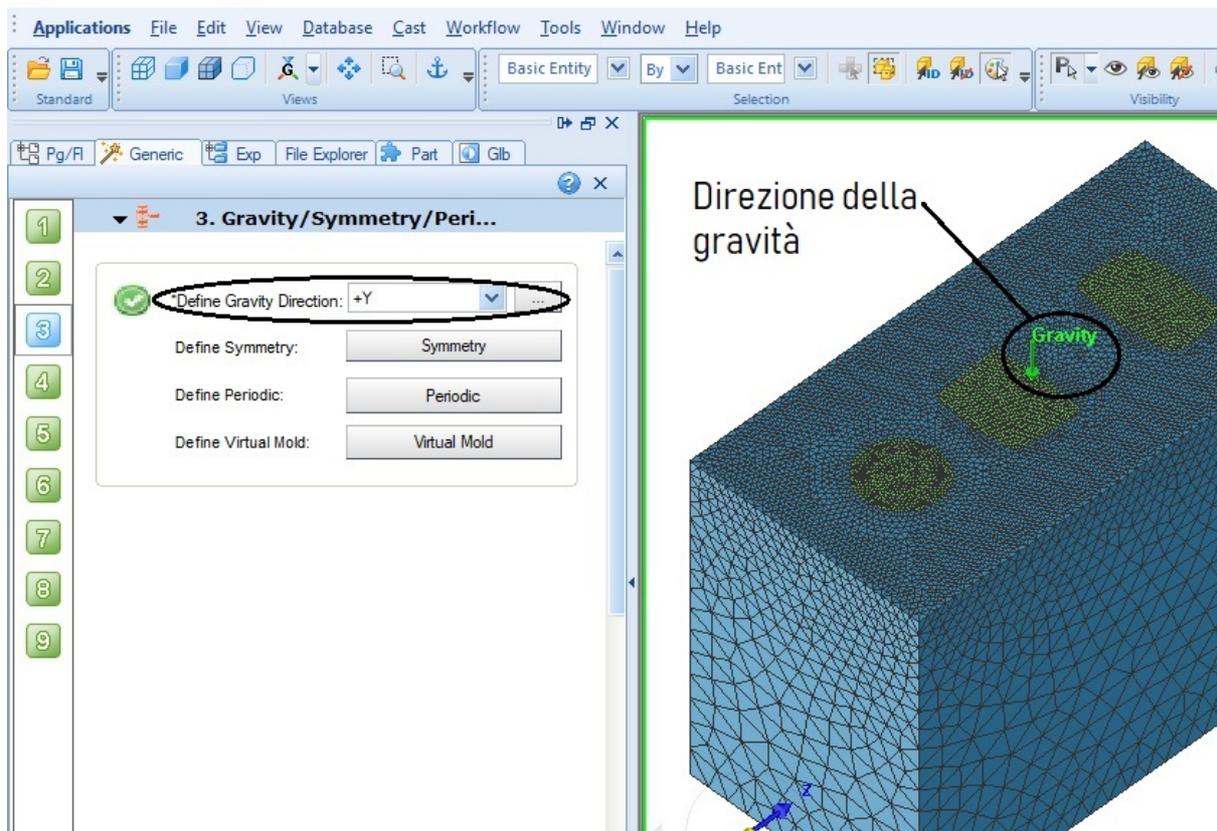


Figura 75: verifica della corretta direzione dell'accelerazione di gravità

Dopo aver passato nuovamente in rassegna anche il resto delle precedenti impostazioni verificando l'assenza di eventuali vizi, si va ad aggiungere tra le condizioni al contorno quelle prettamente attinenti alla meccanica dei fluidi (Figura 77). Precisamente viene richiesto di indicare la porzione di superficie superiore dello stampo corrispondente alla bocca di colata, la temperatura del metallo fuso (700°C) e la sua portata (1kg/s).

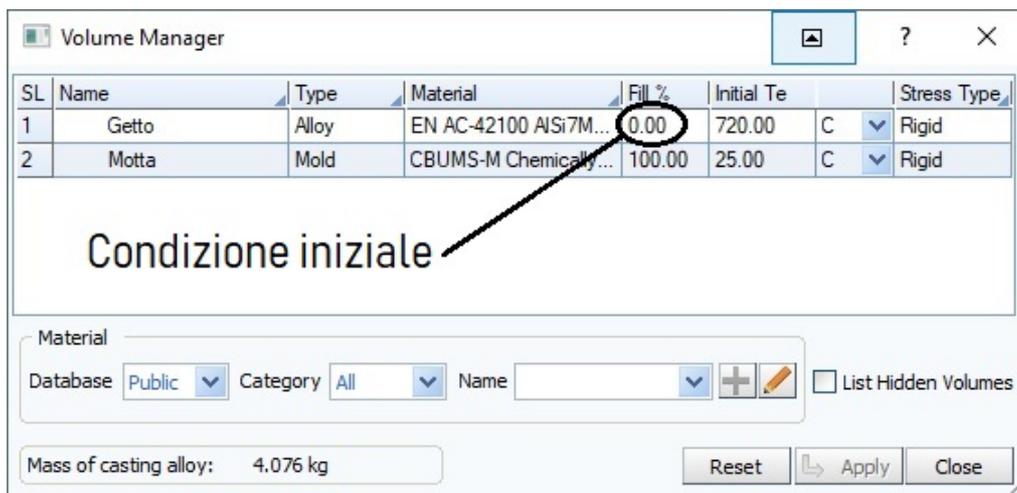


Figura 76: modifica delle condizioni iniziali

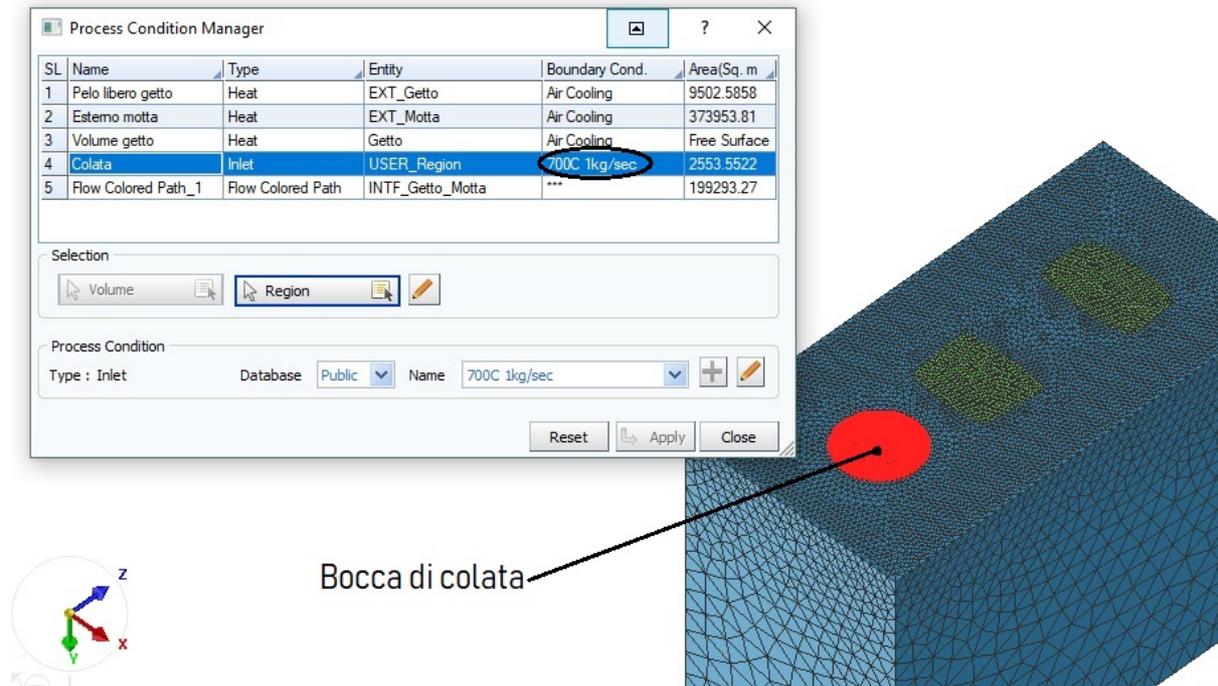


Figura 77: impostazione delle condizioni al contorno per il problema fluidodinamico

I criteri di arresto rimangono i medesimi precedentemente impostati poiché il software finisce di calcolare la soluzione del problema termico solo dopo aver completato la parte di riempimento, dunque, in ogni caso, l'ultima fase della computazione sarà sempre quella inerente il raffreddamento per la quale i dati sono già stati inseriti in precedenza. Certo c'è da considerare che comunque potrebbe persistere il problema di non convergenza, ma si ricorda che per tale genere di inconveniente rimane definito un numero massimo di iterazioni ammissibili.

Il processo di calcolo in questo caso richiede qualche minuto in più rispetto alle iterazioni delle analisi di sola solidificazione, tuttavia giunge comunque alla fine senza intoppi e fornisce una rappresentazione significativa dei possibili inglobamenti di aria (Figura 78). Come si può vedere i punti più critici appartengono alla superficie delle zone di attacco dei montanti al pezzo e all'estremità inferiore del getto, si tratta quindi di volumi che saranno interamente rimossi nella fase di lavorazione a macchina utensile, quindi si ritiene di non dover apportare azioni correttive sulla geometria.

Per quel che invece concerne il flusso del metallo durante il riempimento non risulta nulla di particolarmente grave da segnalare, giusto si vuole notare che durante le prime fasi del versamento del liquido, in fondo al canale di colata pare che vengano a formarsi campi di velocità di entità relativamente sostenuta con un relativo insorgere di turbolenza (Figura 79).

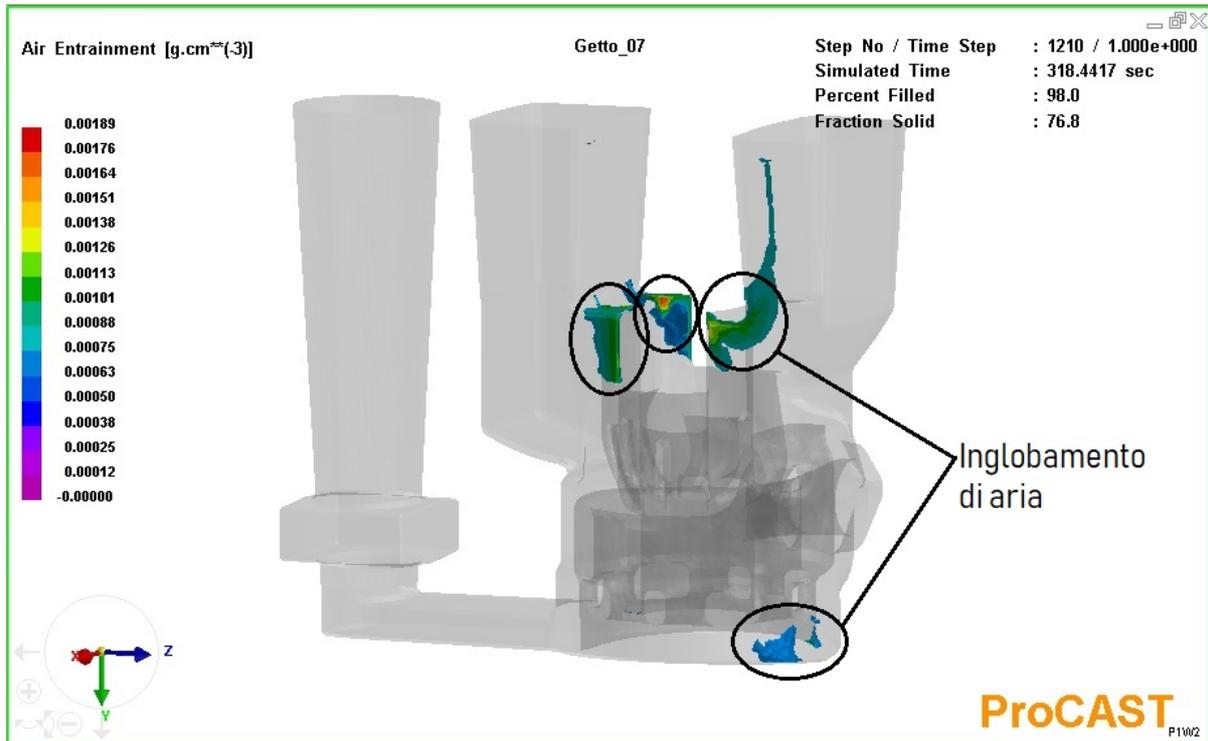


Figura 78: messa in evidenza delle zone a rischio inglobamento di aria

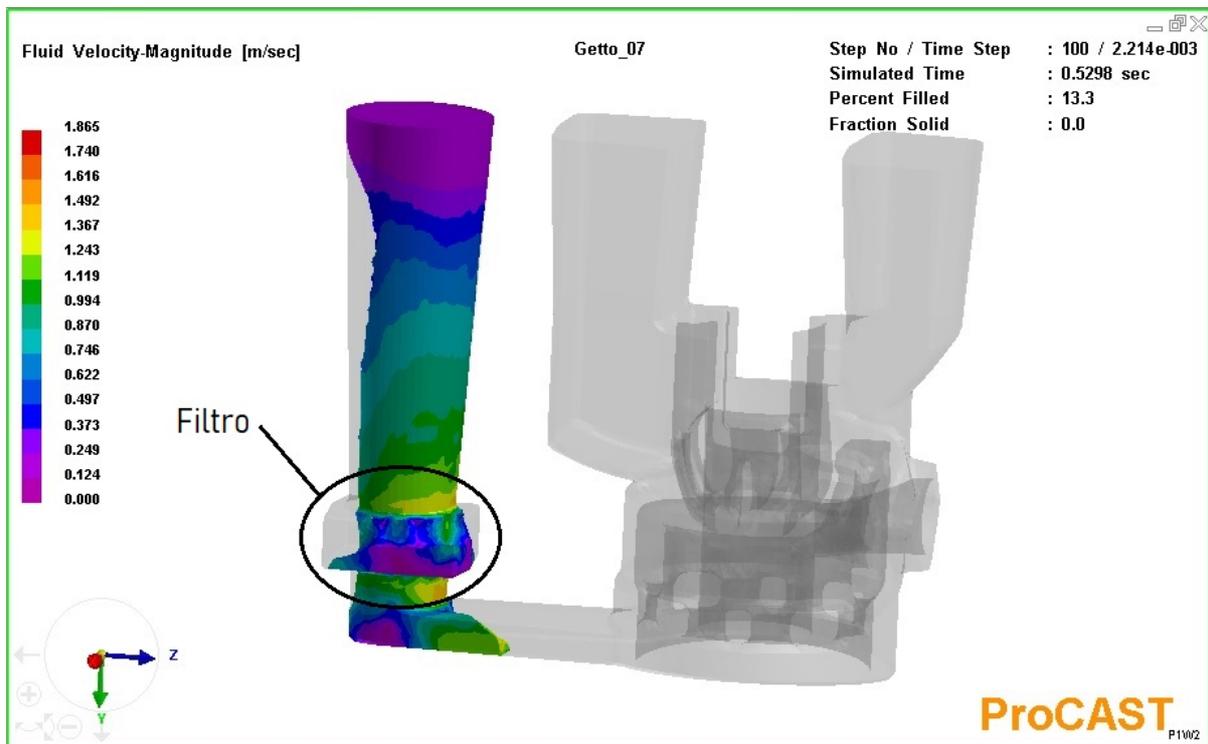


Figura 79: moto del fluido nei primi istanti del riempimento

In realtà c'è da considerare che la zona del filtro ceramico viene vista come una ingente discontinuità sul condotto e come tale viene trattata senza considerare che invece lo stesso

filtro funge da raddrizzatore di flusso e introduce una perdita di carico capace di rallentare la vena fluida, quindi, in sostanza, la situazione già di per sé non pare critica ma nella realtà può solo spostarsi verso una condizione migliore.

Per i motivi descritti si può ritenere soddisfacente anche l'esito dell'analisi fluidodinamica condotta sulla geometria definita nell'ambito della sesta iterazione della simulazione termica.

3.5 Geometria definitiva del grappolo di fusione

Lo studio del processo a livello numerico risulta a questo punto concluso e sufficientemente migliorato, si ricorda che il modello scelto come soluzione definitiva è quello rappresentato in Figura 59 e che esso è stato il più possibile semplificato dei volumi di marginale importanza che, per loro natura, potevano risultare problematici per l'analisi agli elementi finiti.

Si passa a questo punto a reintegrare tali porzioni del getto così da ritrovare un solido che possa essere un punto di partenza per la progettazione delle attrezzature (Figura 80), uno dei cambiamenti in questa fase più rilevanti è la ricomparsa della scritta in bassorilievo presente sia sul lato destro che sinistro del pezzo. Questa non ha mai preso parte all'analisi FEM della colata e quindi non è dato sapere se possa o meno creare problemi di qualche tipo alle zone

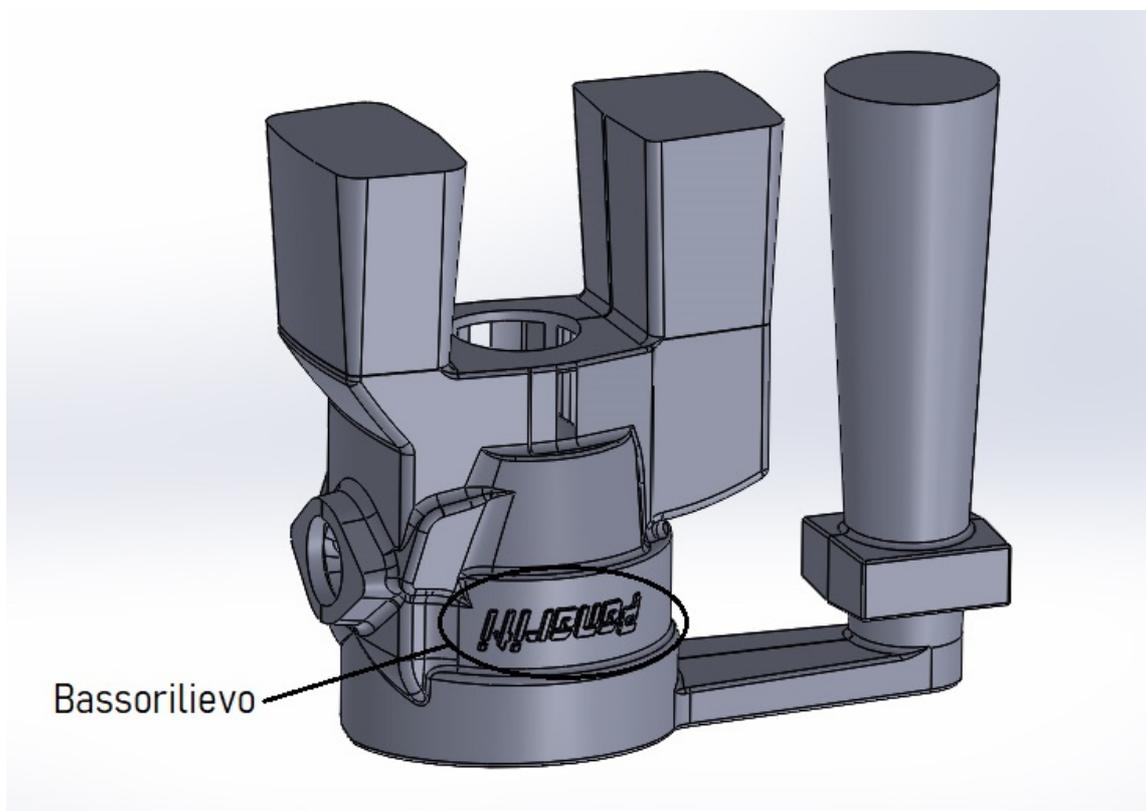


Figura 80: geometria definitiva del grappolo di fusione

adiacenti o risultare essa stessa di qualità scadente; c'è però da tenere in conto che la massa di metallo che la costituisce è di entità trascurabile rispetto alla restante parte del getto, in più risulta posizionata su di una superficie la cui resistenza meccanica non è in alcun modo critica, dunque si può presumere che la sua presenza non introdurrà problematica alcuna. In modo analogo, sulla base dell'esperienza, è lecito supporre che tale dettaglio in bassorilievo assuma le corrette sembianze senza problematiche di difettosità che potrebbero comprometterne non di più che l'aspetto estetico.

Capitolo 4

Definizione delle geometrie finali di anime e modelli

4.1 Progettazione del sistema di anime

Le anime in fase di ramolaggio devono essere composte e alloggiare su appositi riferimenti ricavati nei gusci che servono a tenerle in posizione durante la fase di colata, siccome questi vengono ricavati nelle motte grazie allo stesso modello che imprime nella sabbia la forma del getto, è evidente che esso può essere costruito nella sua completezza solo una volta nota la forma delle portate d'anima. Questa tuttavia si può stabilire solo se è dato conoscere la geometria delle anime le quali, infatti, sono la prima parte dello stampo ad essere progettata. In questo caso le cavità da ricavare nel getto sono identificabili in sei diverse parti (Figure 81 e 82):

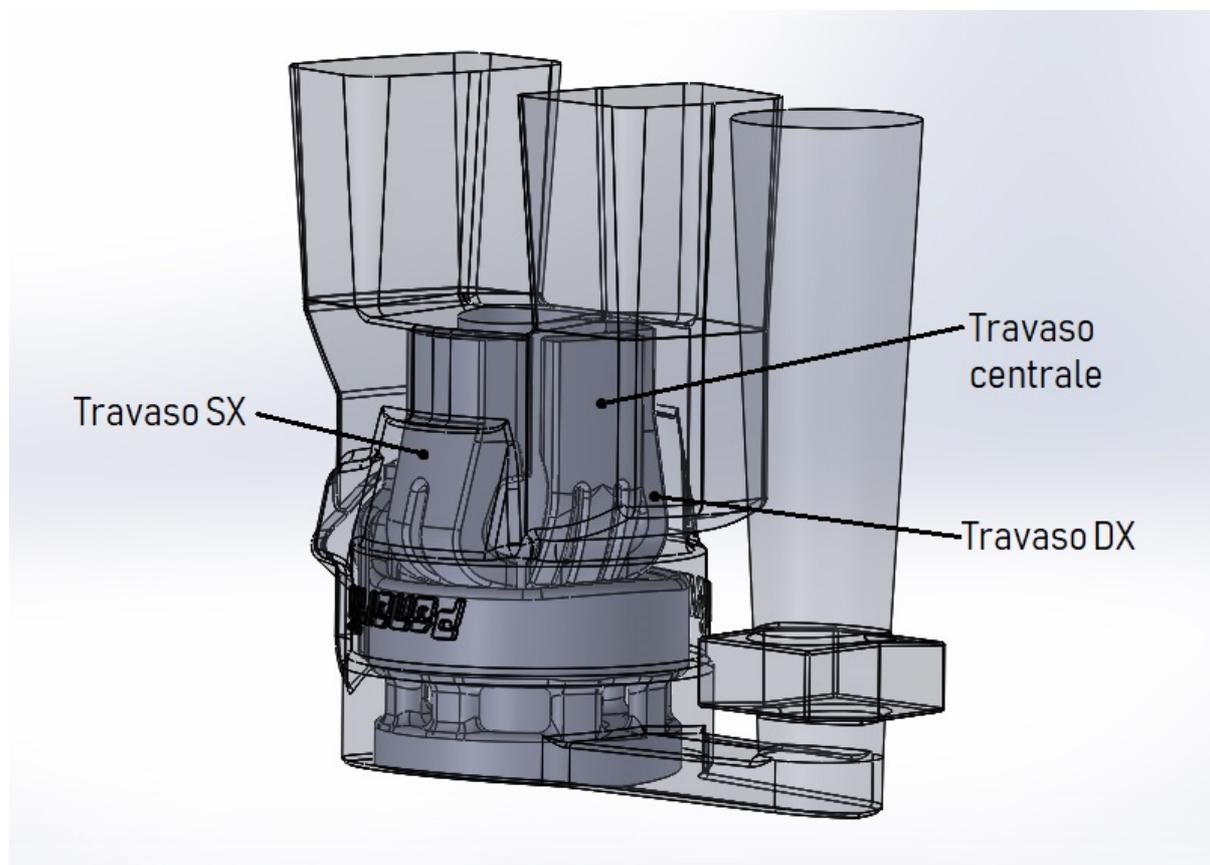


Figura 81: modello del grappolo di fusione in trasparenza, visibili le forme delle cavità

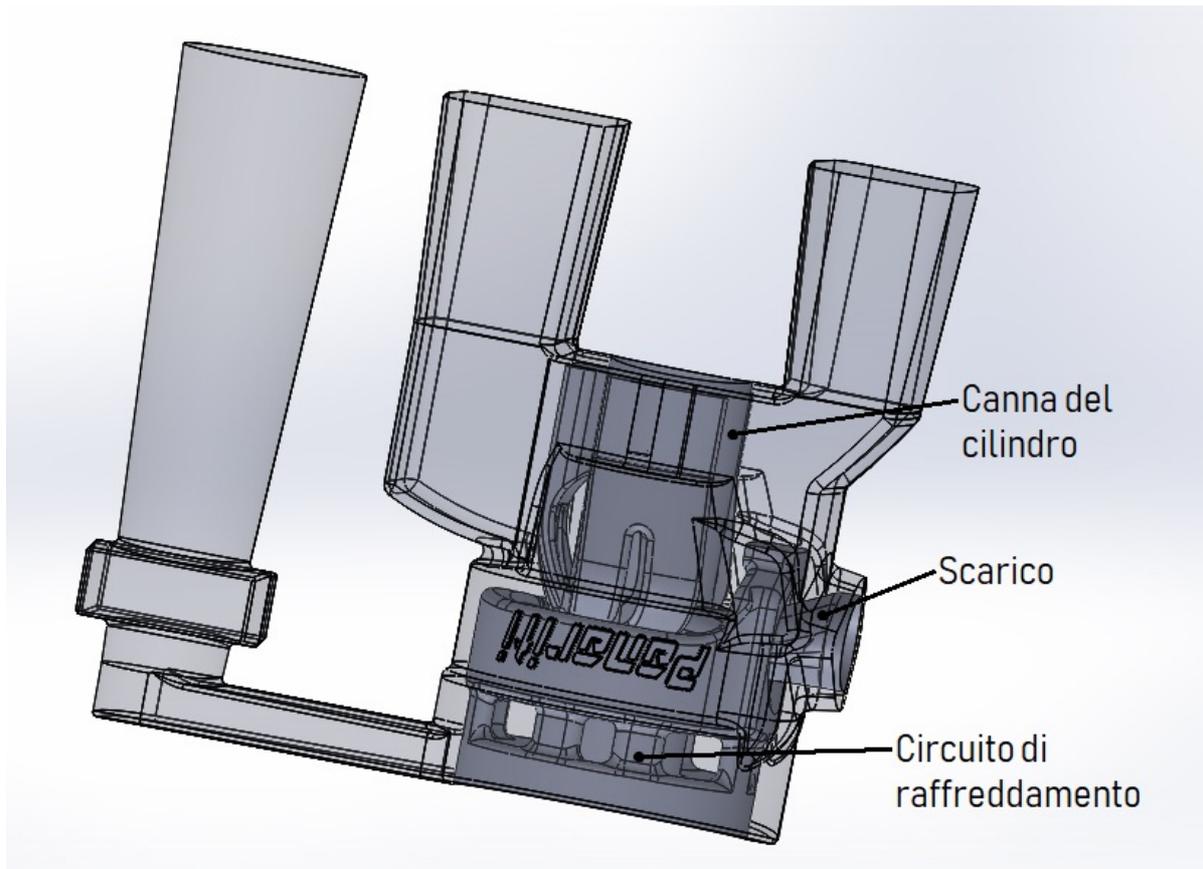


Figura 82: modello del grappolo di fusione in trasparenza, visibili le forme delle cavità

1. gruppo condotti di travaso centrale
2. gruppo condotti di travaso destro (DX)
3. gruppo condotti di travaso sinistro (SX)
4. condotto di scarico
5. canna del cilindro
6. circuito di raffreddamento

Di queste, le prime cinque sono tutte parte di un unico solido, il circuito di raffreddamento invece rimane un volume a sé stante che non deve in nessun modo intersecarsi con gli altri, diviene quindi obbligatorio realizzare queste due geometrie come corpi separati per motivazioni intrinseche del caso in studio.

Focalizzandosi sull'anima costituita delle prime cinque parti (travasi, scarico e anima della canna), salta subito all'occhio l'impossibilità di realizzare tutto in un sol pezzo senza avvalersi di tecniche di stampa 3D. Possiamo dire questo perché, secondo il metodo tradizionale, ogni anima viene formata grazie ad un apposito stampo e, a causa della presenza di un numero raccapricciante di sottosquadri, un oggetto costituito dall'insieme dei volumi 1, 2, 3, 4 e 5 non

potrebbe mai divenire estraibile se non stravolgendone completamente le sembianze (il che non sarebbe accettabile). A questo punto diviene inevitabile la scomposizione del solido in questione in diverse parti da assemblarsi tramite un incollaggio al momento del ramolaggio, in particolare si sceglie di realizzare come corpi a sé stanti proprio le cinque parti citate poc'anzi: il gruppo condotti di travaso centrale, il gruppo condotti di travaso destro, il gruppo condotti di travaso sinistro, il condotto di scarico e l'anima costituente la canna del cilindro (Figura 83). Ognuno di questi cinque solidi è ottenibile mediante l'uso di una cosiddetta cassa d'anima apportando eventualmente solo modifiche di minima entità alla loro forma.

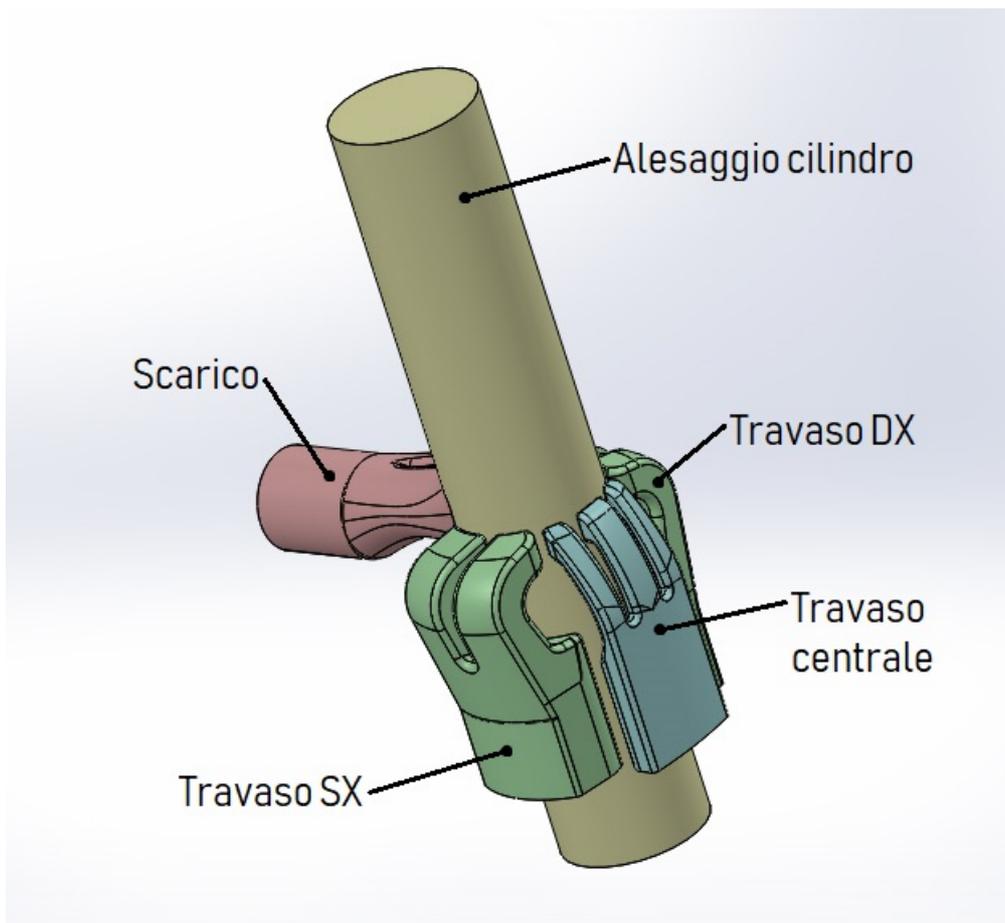


Figura 83: primo gruppo di anime

Per facilitare l'assemblaggio si decide di implementare anche un sistema di incastri ottenuto direttamente con una apposita conformazione della sabbia (Figura 84) curando sia i giochi che le raccordature degli spigoli nelle zone di interfaccia, inoltre si provvede ad estendere le parti terminali delle anime dello scarico (n°4) e della canna (n°5) con tratti cilindrici che dovranno accoppiarsi con le rispettive portate ricavate nelle motte. Trattandosi comunque dell'assemblaggio di parti in sabbia è sensato non aspettarsi tolleranze da macchina utensile,

per questo rimane comunque sempre aperta anche la via di piccoli aggiustaggi a mano e di una stuccatura postuma all'incollaggio.

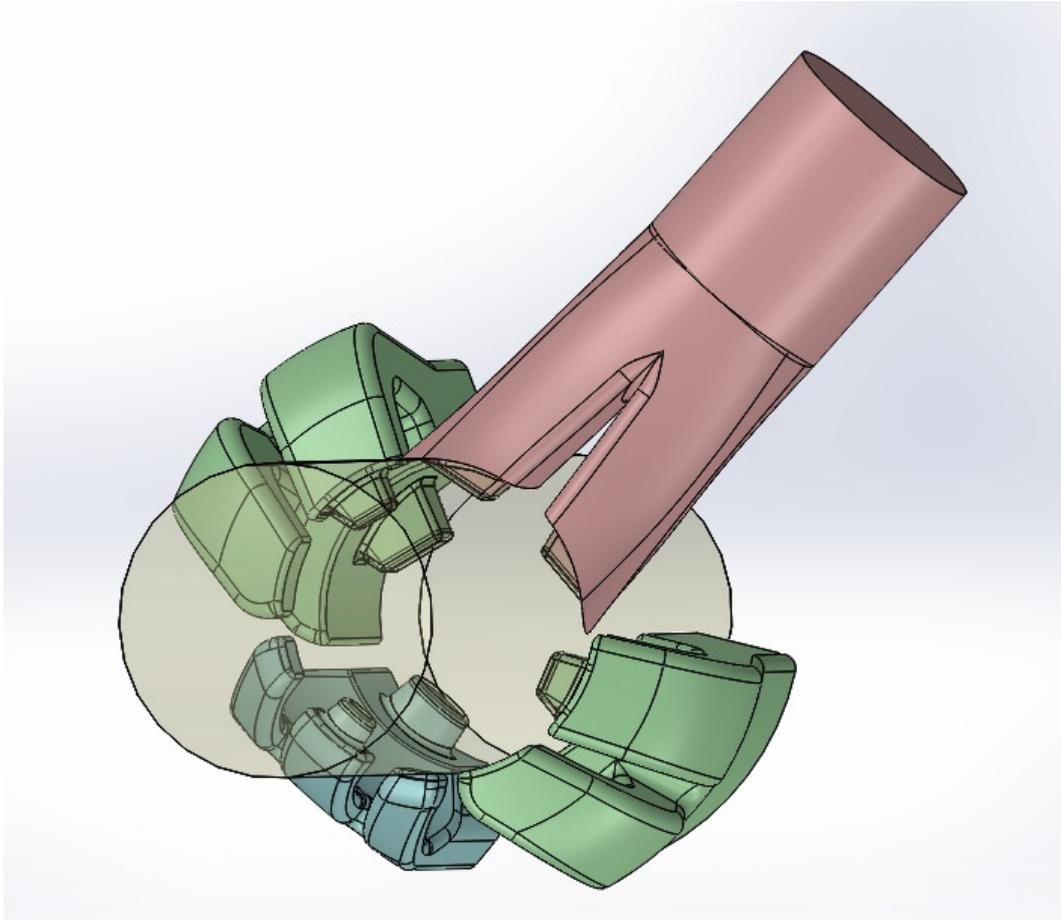


Figura 84: particolare del sistema di incastri per l'assemblaggio delle cinque parti

Si passa ora a verificare l'effettiva sformabilità di ognuna delle parti presenti in questo primo gruppo, per farlo si impiega lo strumento di verifica integrato nel CAD che sostanzialmente, una volta definita la direzione di estrazione, va a evidenziare in verde le superfici ad essa favorevoli, in rosso i sottosquadri (o le superfici sformabili nella stessa direzione ma verso opposto) e in giallo le zone di transizione dove la spoglia è pressoché nulla. In figura si indica con la lettera "A" la superficie piana rispetto a cui la direzione di estrazione risulta ortogonale, evidentemente il gruppo travasi centrale non presenta alcun inconveniente (Figura 85) così come anche accade per i travasi destro e sinistro (in Figura 86 e dei quali si riporta una sola rappresentazione in quanto simmetrici). Lo stesso tuttavia non si può dire per l'anima della camicia (Figure 87 e 88), essa infatti risulta intaccata da alcuni scavi costituenti gli incastri per l'assemblaggio delle altre parti e, purtroppo, i fori di riferimento per il gruppo di travasi centrale, scegliendo come piano di divisione quello indicato in figura, danno luogo a

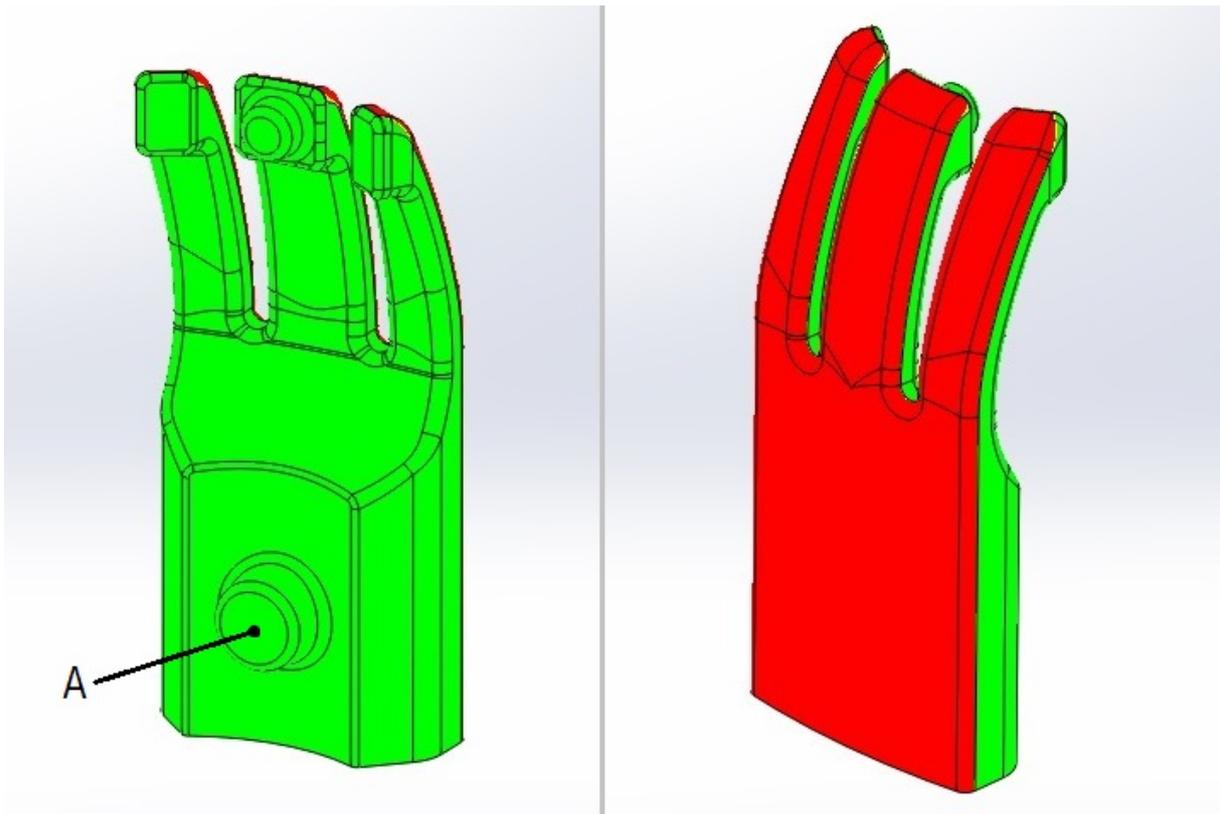


Figura 85: analisi di sformo per il gruppo condotti di travaso centrale

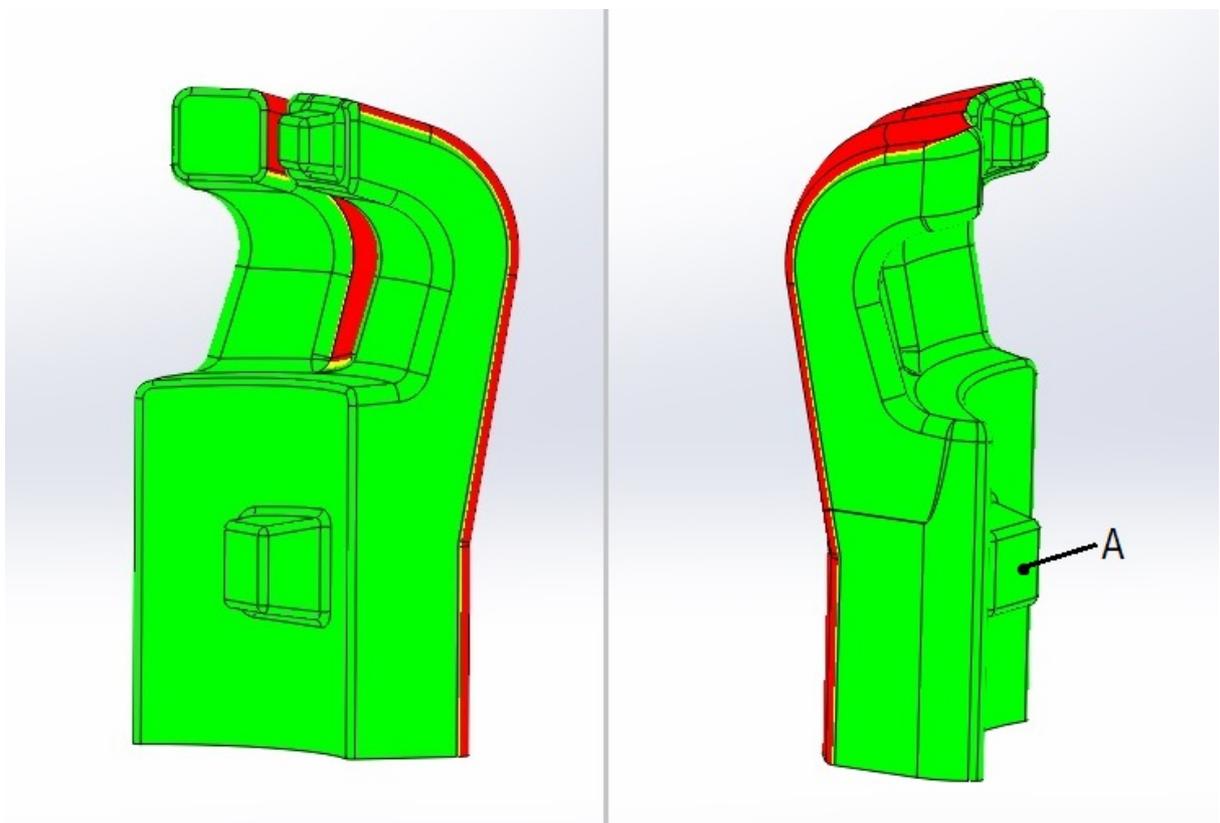


Figura 86: analisi di sformo per il gruppo condotti di travaso laterale

sottosquadri. Designare un diverso piano di divisione è assolutamente una strada non praticabile perché si finirebbe con far emergere più problematiche di quante se ne risolverebbero, quindi non c'è altro da fare che prevedere due tasselli nella cassa d'anima. Per rendere la loro forma il più semplice possibile infatti i fori che danno origine al problema sono perlomeno stati realizzati di forma circolare così che praticamente i tasselli divengono due spine coniche realizzabili molto agevolmente con un qualsiasi tornio tradizionale. Le due estremità dell'anima risultano evidenziate in giallo in quanto non necessitano di alcun tipo di sformo siccome proprio da queste aree si accederà per riempire di sabbia lo stampo.

L'ultima del primo gruppo di cinque anime è quella con il compito di lasciare nel getto la cavità per il condotto di scarico, purtroppo questo solido può essere estratto da uno stampo solo in direzione perpendicolare al piano "A" (Figura 89) e così facendo le superfici "B" dovrebbero essere adeguatamente sformate divenendo non più combacianti con la corrispettiva sull'anima della canna. Certo è vero che comunque è presente un incastro e che è possibile stuccare gli interstizi, ma si preferisce mantenere una perfetta corrispondenza così da avere la massima precisione in fase di incollaggio. Per consentire di ottenere un'anima come da disegno sarà quindi necessario costruire una cassa fatta non di due ma di tre parti una delle quali sarà dedicata ad imprimere nella sabbia la forma della zona di incastro.

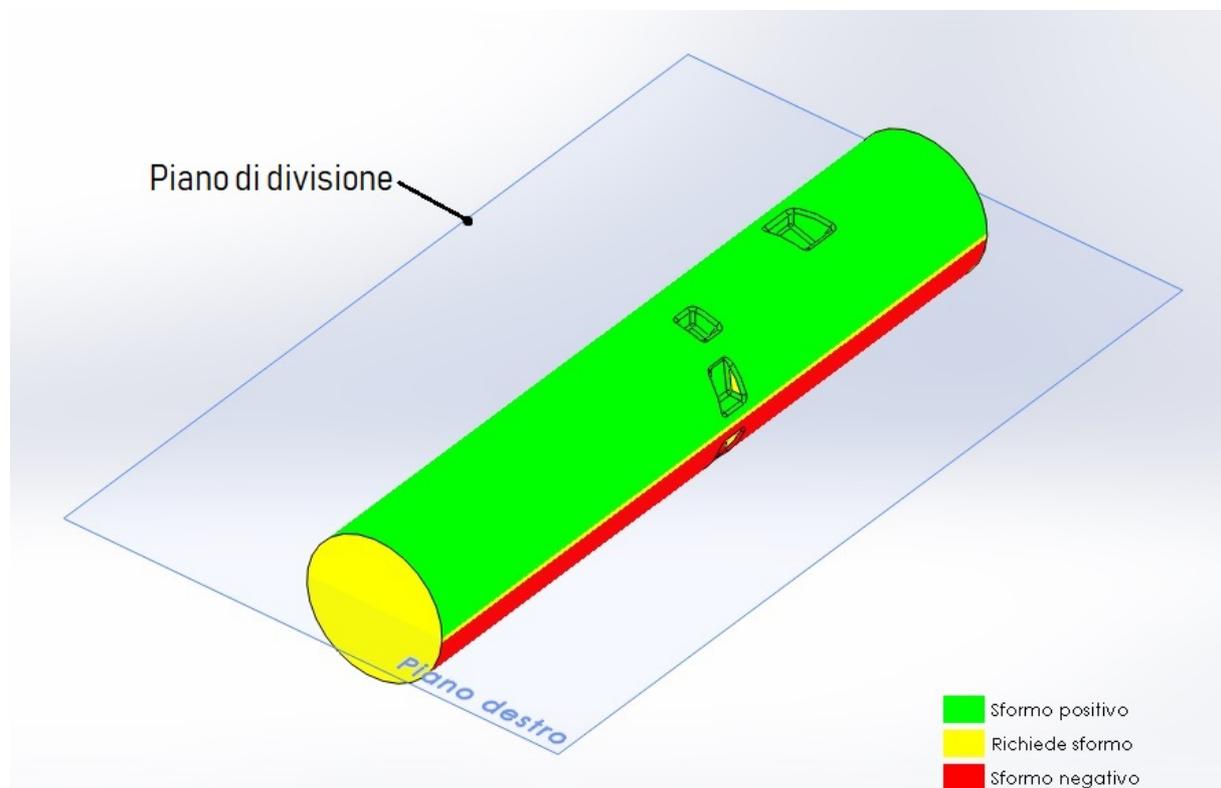


Figura 87: analisi di sformo dell'anima per la canna del cilindro, prima vista

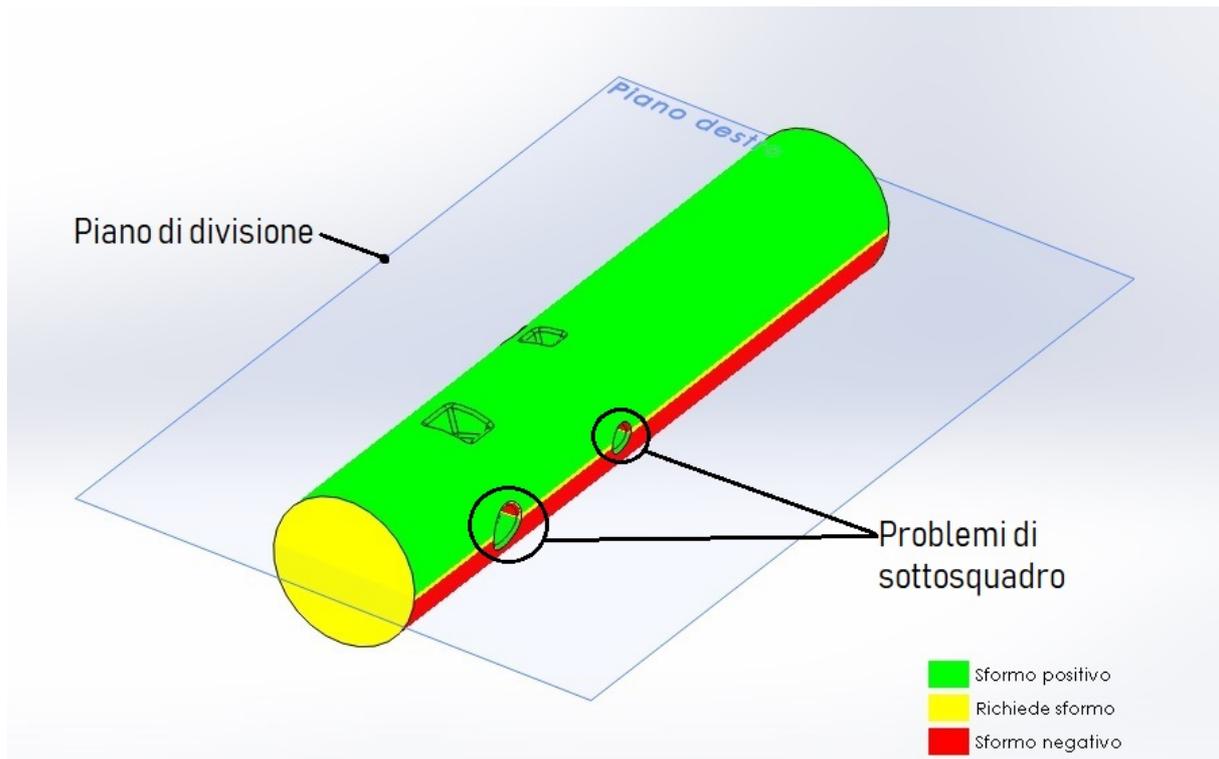


Figura 88: analisi di sforno dell'anima per la canna del cilindro, seconda vista

Attraverso la superficie "C" invece si accederà allo stampo per eseguire il riempimento con la sabbia, dunque essa non necessita di sforno poiché verrà definita semplicemente "rasando" l'eccedenza rispetto al piano dei gusci.

Riguardo al circuito di raffreddamento, esso necessita di un accurato posizionamento all'interno delle motte per far sì che il metallo liquido vi fluisca intorno andandone a costituire le pareti, la sua forma è tale per cui si trova a dover praticamente avvolgere il primo gruppo di anime, dunque la cosa più sensata è vincolarlo rispetto ad esse.

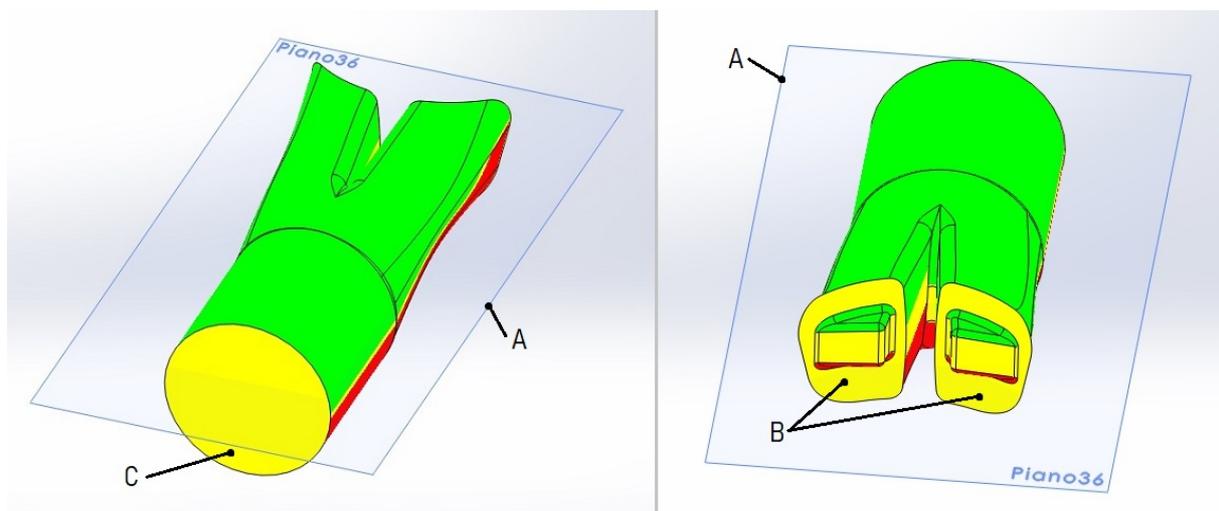


Figura 89: analisi di sforno per il condotto di scarico

Per fare questo, dalle otto colonnette rappresentative dei condotti per il passaggio dell'acqua presenti sulla parte superiore del volume principale, si sviluppa una porzione cilindrica recante un foro al centro studiato proprio per sposarsi sia con l'anima della canna che con una sede riportata nella forma (Figura 90). Un ulteriore incastro viene previsto per dare un riferimento in senso assiale e angolare rispetto al gruppo formato dalle prime cinque anime ma questo costringe a dividere il solido in due metà così da poter rendere fattibile il montaggio.

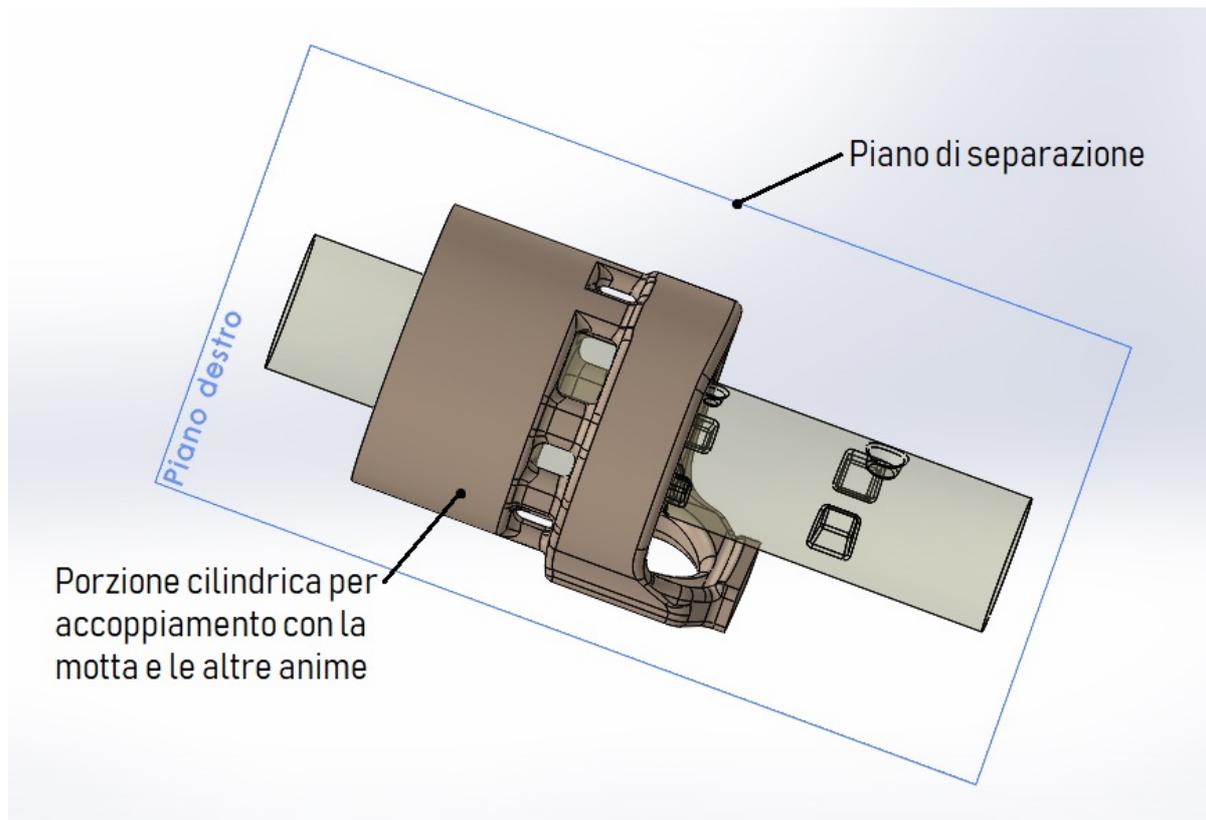


Figura 90: circuito di raffreddamento posizionato sull'anima della canna

La separazione viene fatta sul piano longitudinale così da ritrovarsi con anche porzione anulare circostante il condotto di scarico non più fatta in un unico pezzo, il che consente di assemblare l'ultima anima accostando due parti attorno a tutto il resto. Non serve molto per rendersi conto che in questo modo il procedimento risulta molto più agevole rispetto a dover incollare in posizione il condotto di scarico facendo i conti con l'ingombro della sezione di raffreddamento.

Sulla superficie risultante dalla divisione del circuito di raffreddamento vengono, ricavati direttamente nella forma della sabbia, fori e spine di riferimento (Figura 91), quindi si procede a verificare l'effettiva estraibilità da un ipotetico stampo delle due parti. Sempre tramite il

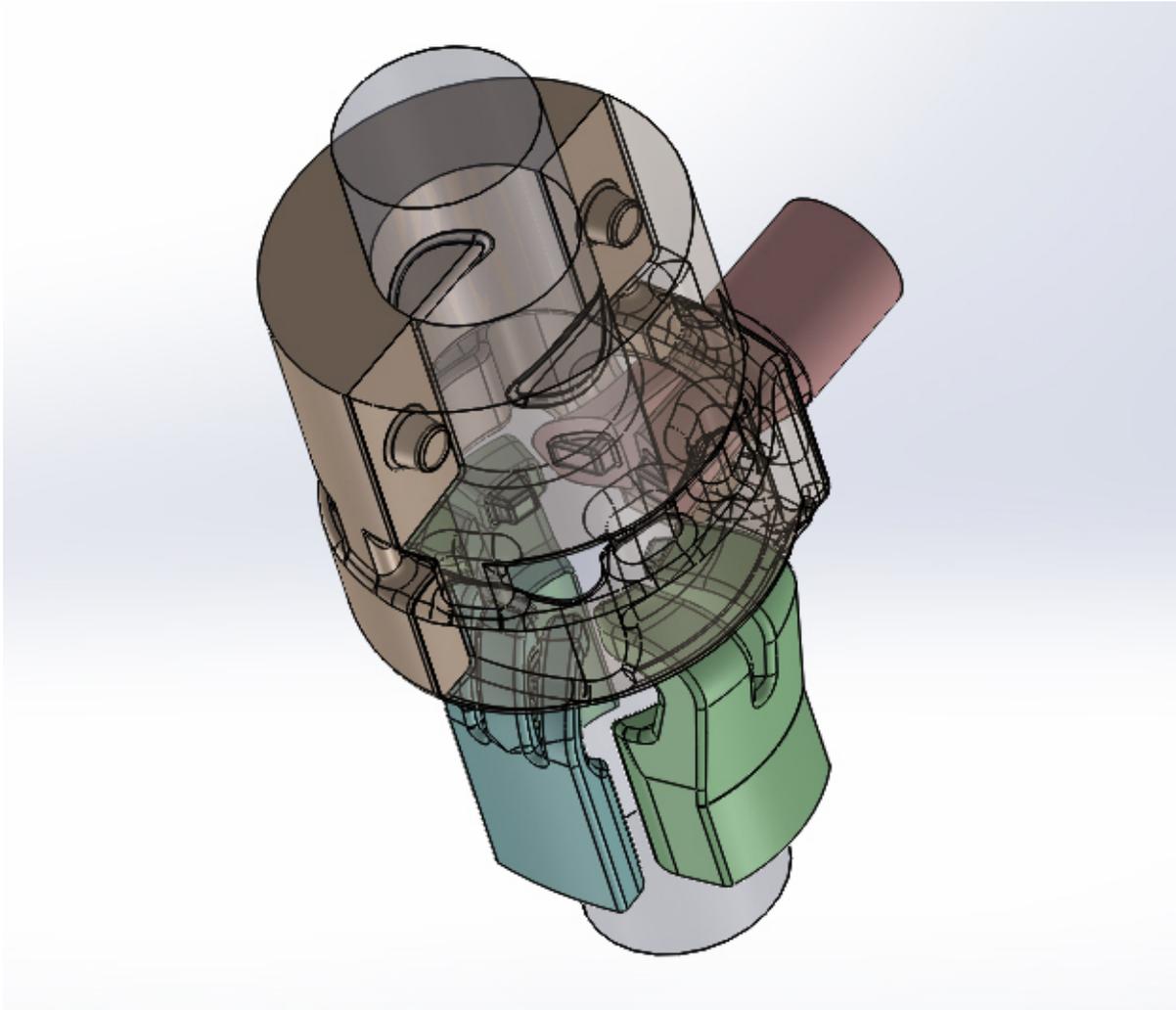


Figura 91: il circuito di raffreddamento diviso in due metà e assemblato con le altre anime, visibile il sistema di incastri tra le varie parti

CAD si controlla l'eventuale presenza di sottosquadri ed eventuali altre problematiche ma, fortunatamente, il disegno risulta molto ben realizzato sotto questo punto di vista e non è necessario apportarvi ulteriori modifiche (Figure 92 e 93). Poiché le due metà sono perfettamente simmetriche con l'unica eccezione del fatto che, sul lato destro si ha la presenza di spine e sul sinistro di fori di riferimento, si riportano le immagini solamente per uno dei due casi essendo l'altro automaticamente verificato.

Con lo studio delle parti del circuito di raffreddamento si conclude la progettazione delle anime, vale la pena menzionare il fatto che già in questa fase si è deciso come realizzare le portate d'anima predisponendo le sezioni di accoppiamento con la motta e di cui si tratterà più diffusamente nei prossimi paragrafi.

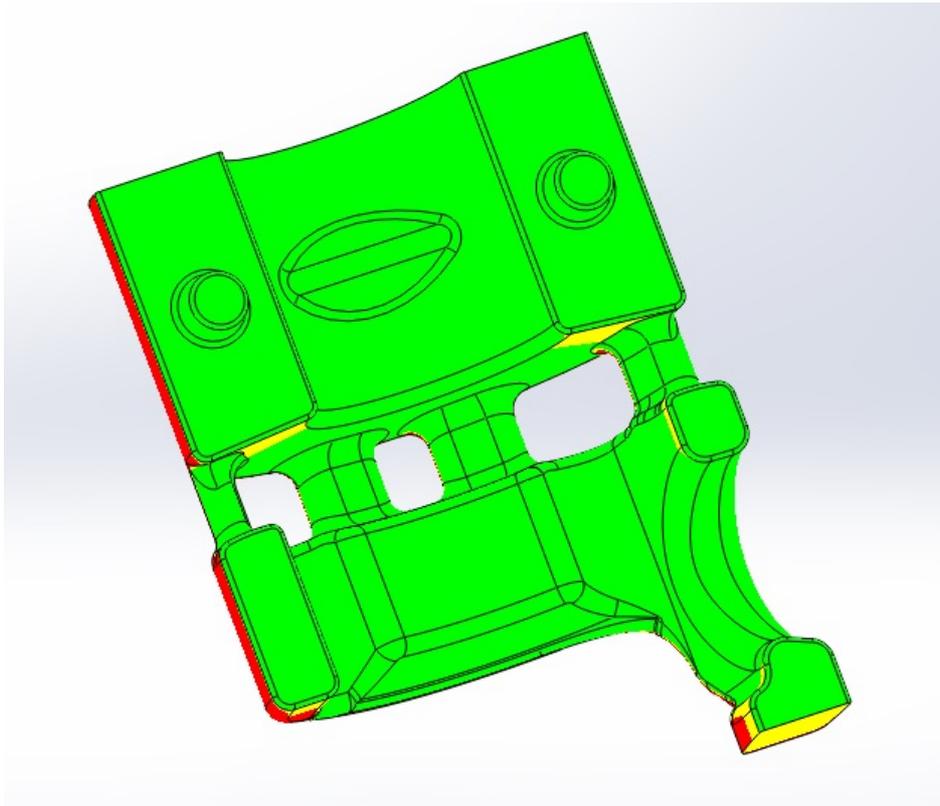


Figura 92: analisi di sforno per il circuito di raffreddamento, parte destra, prima vista

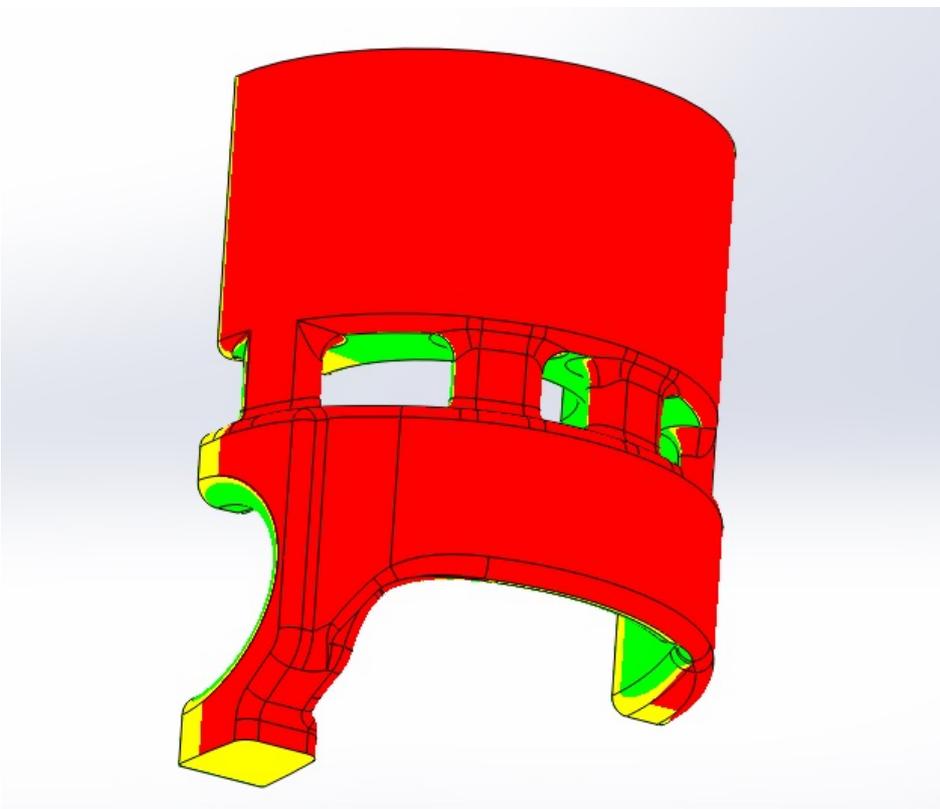


Figura 93: analisi di sforno per il circuito di raffreddamento, parte destra, seconda vista

4.2 Progettazione dei modelli

La definizione della forma dei modelli, in realtà, non lascia molte libertà perché, quel che bisogna fare, è sostanzialmente unire in un'unica geometria più volumi dalle fattezze già note. Si parte ovviamente dal disegno tridimensionale del getto e se ne verifica la sformabilità correggendo le eventuali pecche, si ricorda che già al capitolo 2.5 era già stato abbozzato qualcosa in questo senso per evitare di ritrovarsi a questo punto con i disegni completamente da stravolgere (Figure 29 e 30). All'atto pratico, le modifiche apportate alla geometria nelle varie fasi dello studio hanno coinvolto praticamente solo il bocchame, quindi, siccome già la situazione era più che buona per quel che riguarda l' estraibilità, è lecito non aspettarsi la nascita di particolari situazioni spiacevoli. Si passa quindi direttamente all'integrazione delle portate d'anima rimandando solo alla fine la verifica generale dello sforno.

Sovrapponendo il complessivo progettato al capitolo 4.1 al disegno del getto, è facile rendersi conto dove le appendici pensate per accoppiarsi con le portate d'anima devono andare a

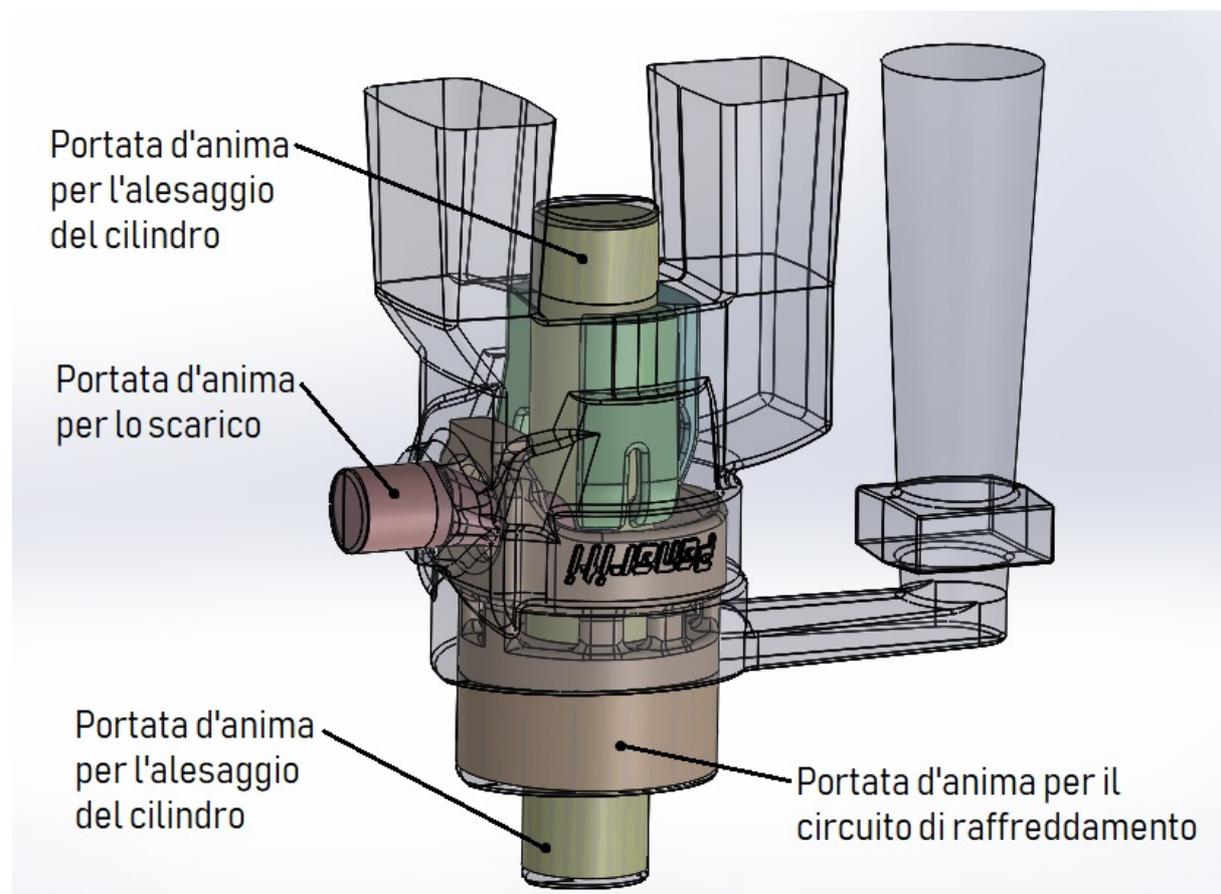


Figura 94: in trasparenza la geometria del getto a cui sono stati aggiunti i volumi relativi alle portate d'anima

trovare una sede, quindi si modifica la forma del fuso inserendovi i volumi necessari a completare il modello vero e proprio (Figura 94).

Scegliendo come piano di divisione quello che fraziona la geometria in due metà perfettamente simmetriche (Figura 95) si può individuare anche la direzione di estrazione dalla sabbia, quindi si procede con le rifiniture aggiungendo, ove dovuto, una adeguata spoglia e raggi di raccordo. Si fa inoltre notare la presenza di giochi in senso assiale tra le anime e relative portate, questo serve per fare in modo che, in fase di ramolaggio, i riferimenti per il posizionamento siano esclusivamente quelli preposti, ossia i tratti cilindrici; se così non fosse sarebbe possibile trovarsi in certi casi con delle interferenze che porterebbero ad un non corretto assemblaggio dello stampo quindi ad un pezzo mal riuscito.

L'ultimo passo da compiere è la suddivisione del modello, così come si presenta ora, in due semimodelli i quali possono essere direttamente realizzati e impiegati dalla fonderia per la

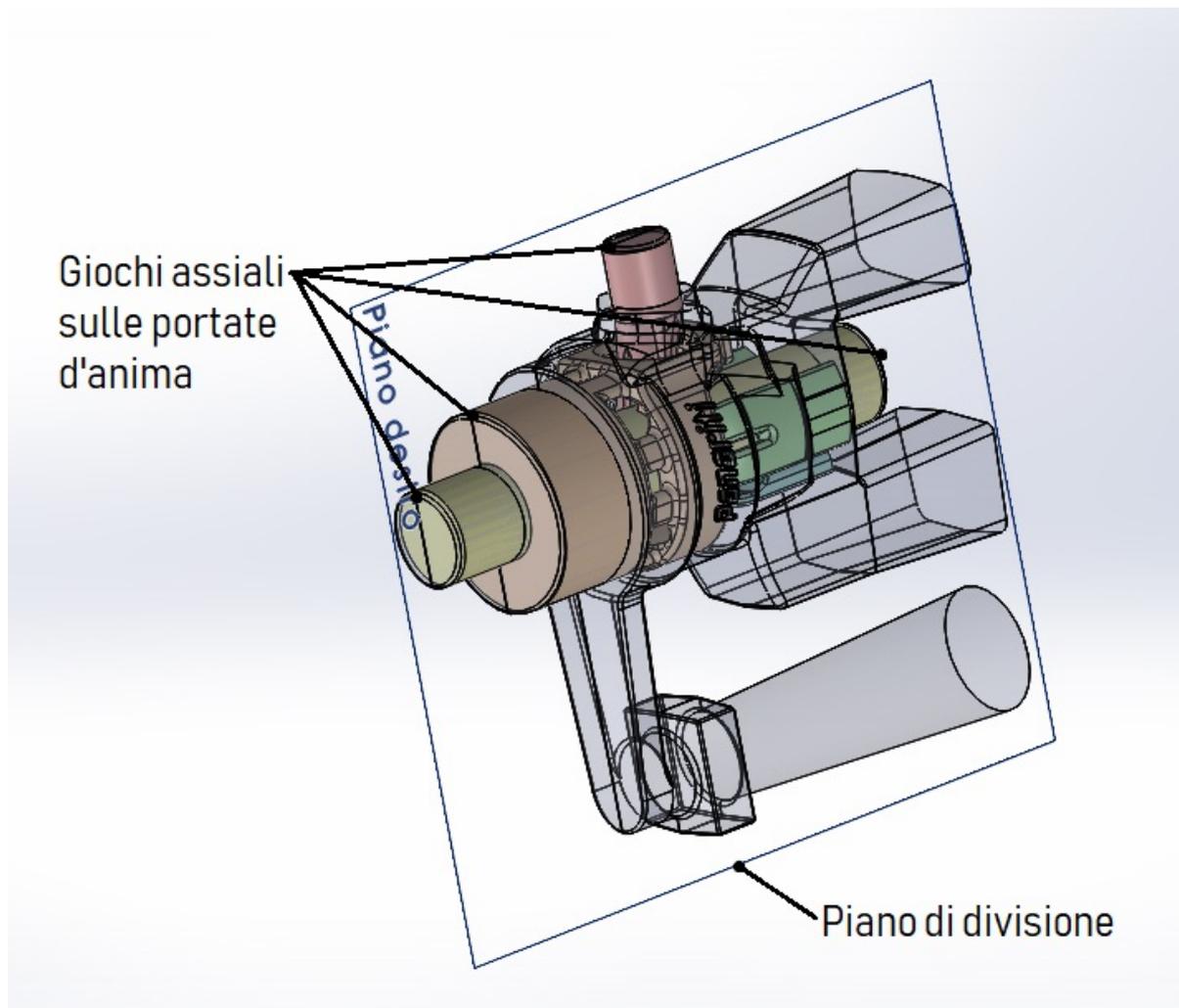


Figura 95: rappresentazione del modello, evidenziato il piano di divisione

costruzione delle casseforme, non prima però di un'ultima verifica dello sforno. Come di consueto, essendo il particolare destro l'esatta copia speculare del sinistro, si riporta la rappresentazione di uno solo dei due, il quale, come ci si poteva aspettare, risulta assolutamente privo di qualsiasi sottosquadro e perfettamente estraibile dalla motta senza particolari precauzioni (Figure 96 e 97).

La sommità dei montanti e del canale di colata, non dovendo essere posta a contatto con la sabbia, non risulta spogliata (colorata in giallo), infatti si suppone di farla poggiare su un lato della staffa così da imprimere nell'impasto un'impronta che esponga verso l'esterno le tre aperture rappresentative del bocchame.

Con quest'ultima verifica si pone la fine alla fase di progettazione dei modelli, nel seguito si faranno ulteriori considerazioni anche sull'eventuale realizzazione di una cassa, apposita attrezzatura indubbiamente più comoda del solo modello, dedicata alla formatura delle motte.

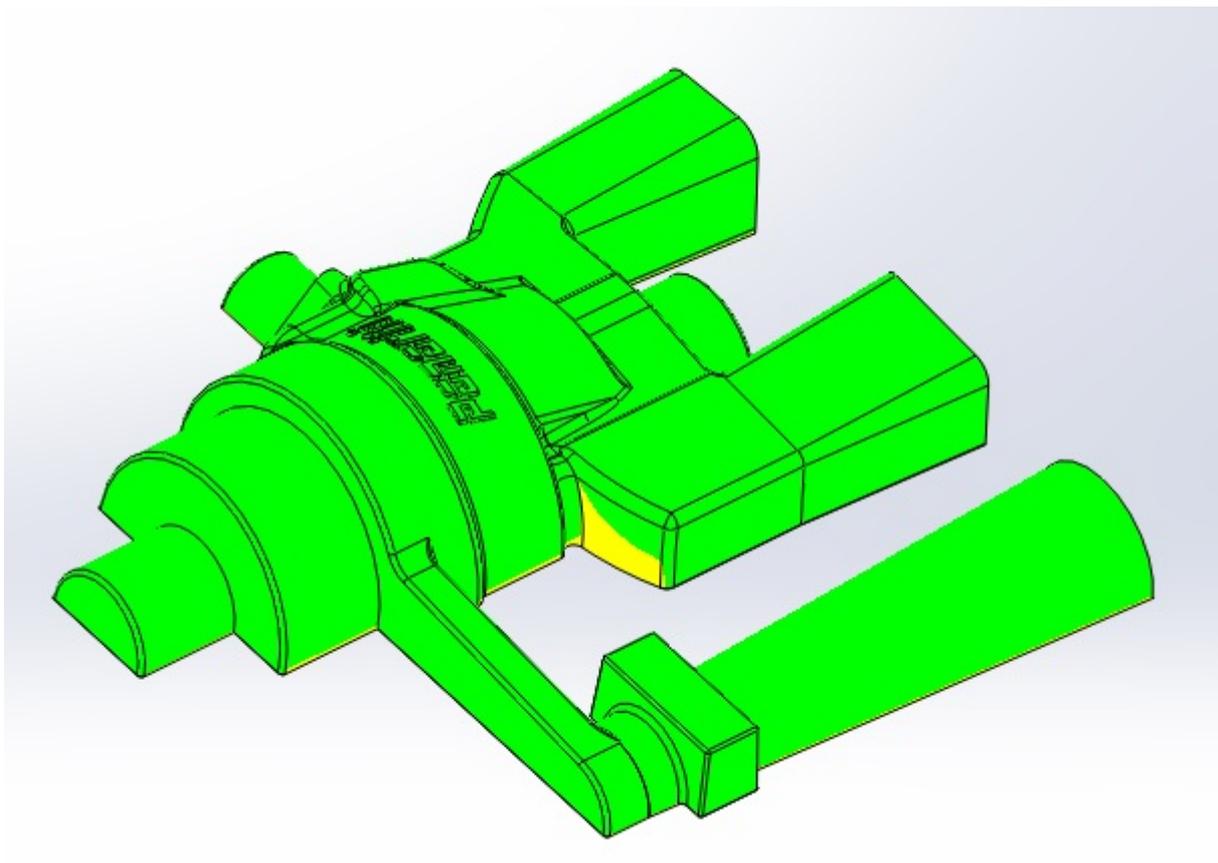


Figura 96: analisi di sforno per il semimodulo sinistro, prima vista

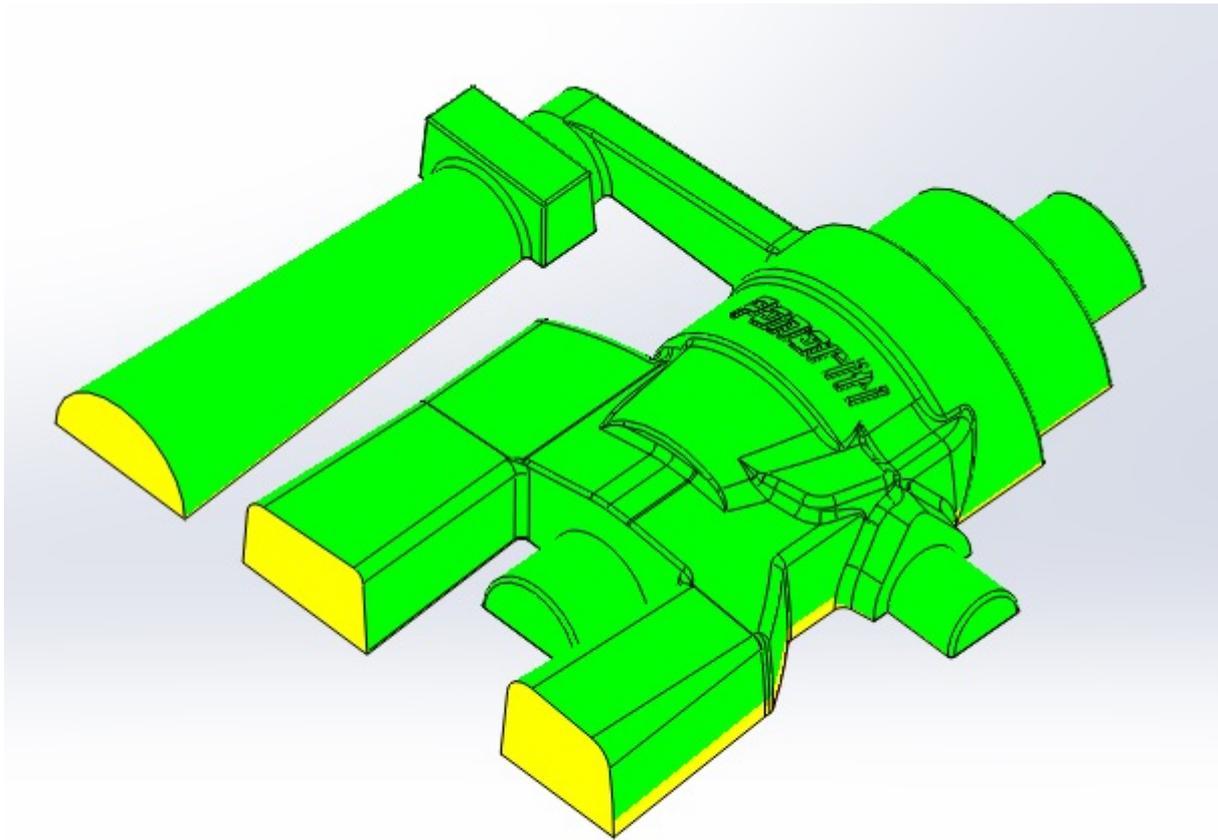


Figura 97: analisi di sformo per il semimodello sinistro, seconda vista

4.3 Stazione di colata

Per verificare l'effettiva funzionalità delle parti progettate si va a realizzare un assemblaggio virtuale della stazione di colata, partendo dai modelli chiaramente si realizza un disegno rappresentativo di entrambi i gusci scegliendo di inserire, anche in questo caso, spine e fori di riferimento ricavati direttamente nella sabbia e che consentano una chiusura e incollaggio il più possibile accurati della forma (Figura 98). Successivamente si va ad eseguire un vero e proprio montaggio, sempre in ambiente CAD, delle varie parti con l'accortezza di controllare nel mentre l'effettiva fattibilità dell'assemblaggio e l'eventuale presenza di interferenze. Per primo si compone il gruppo delle anime, ovvero si prende il solido cilindrico relativo alla canna, vi si incollano l'anima per il condotto di scarico, i condotti di travaso centrali, i condotti di travaso destro e sinistro e infine le due parti del circuito di raffreddamento sfruttando gli opportuni incastri come riferimento. Infine si esegue il ramolaggio posando l'assieme appena completato nelle apposite sedi ricavate in uno dei due gusci (Figura 99), il gruppo delle anime viene posto al centro della cavità del getto usando la canna come

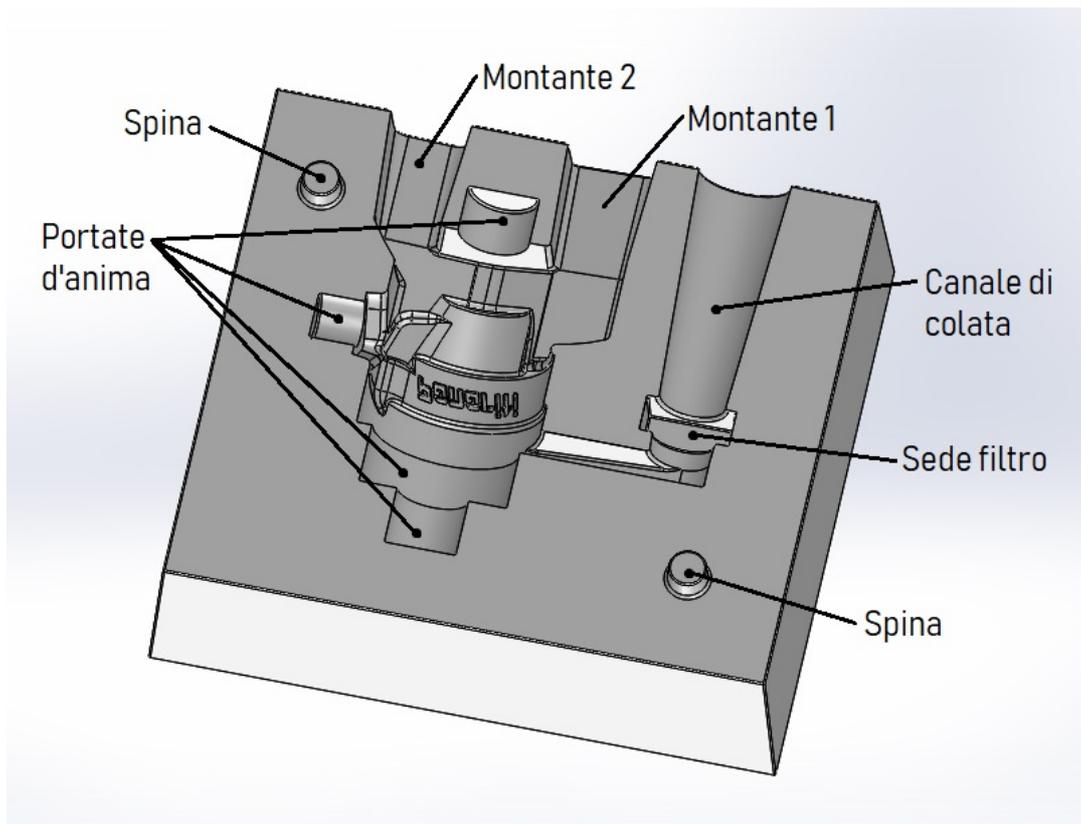


Figura 98: motta destra

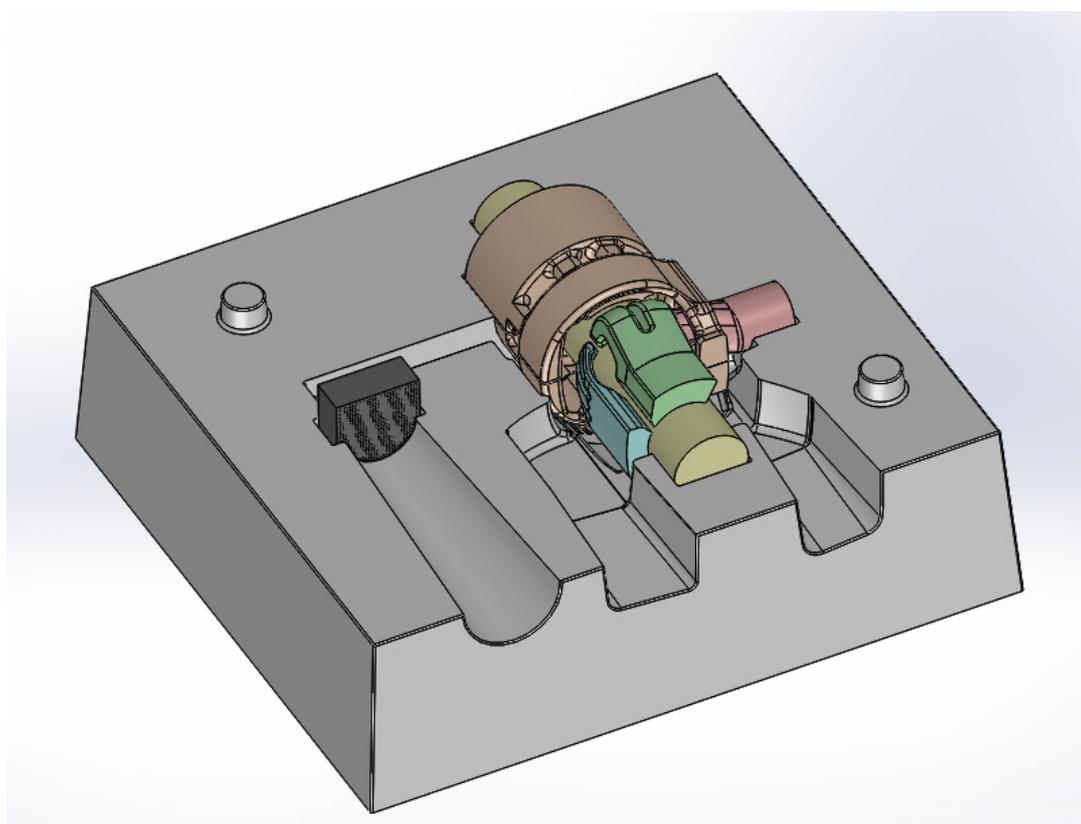


Figura 99: fase di ramolaggio

riferimento radiale e l'estremità del condotto di scarico per la localizzazione in senso assiale e angolare. Le due parti costituenti il volume del circuito di raffreddamento, sebbene già solidali all'anima cilindrica centrale, vengono anche poggiate e incollate sulla motta così da ottenere una maggior solidità di tutto il complesso. Si completa l'opera inserendo il filtro ceramico e incollando il secondo guscio in posizione a chiudere la forma. Il metallo fuso viene naturalmente versato ponendo il canale di colata in posizione verticale (Figura 100), quindi il peso della motta superiore non si oppone alla spinta metallostatica lasciando alla sola colla l'onere di mantenere chiuso lo stampo fino alla completa solidificazione. Essendo l'adesivo impiegato a base polimerica, è possibile riscontrare un degrado delle sue proprietà meccaniche in seguito al riscaldamento della forma derivante dalla presenza di alluminio liquefatto a circa 700°C, non risulta quindi saggio affidarsi solo ad esso per impedire il

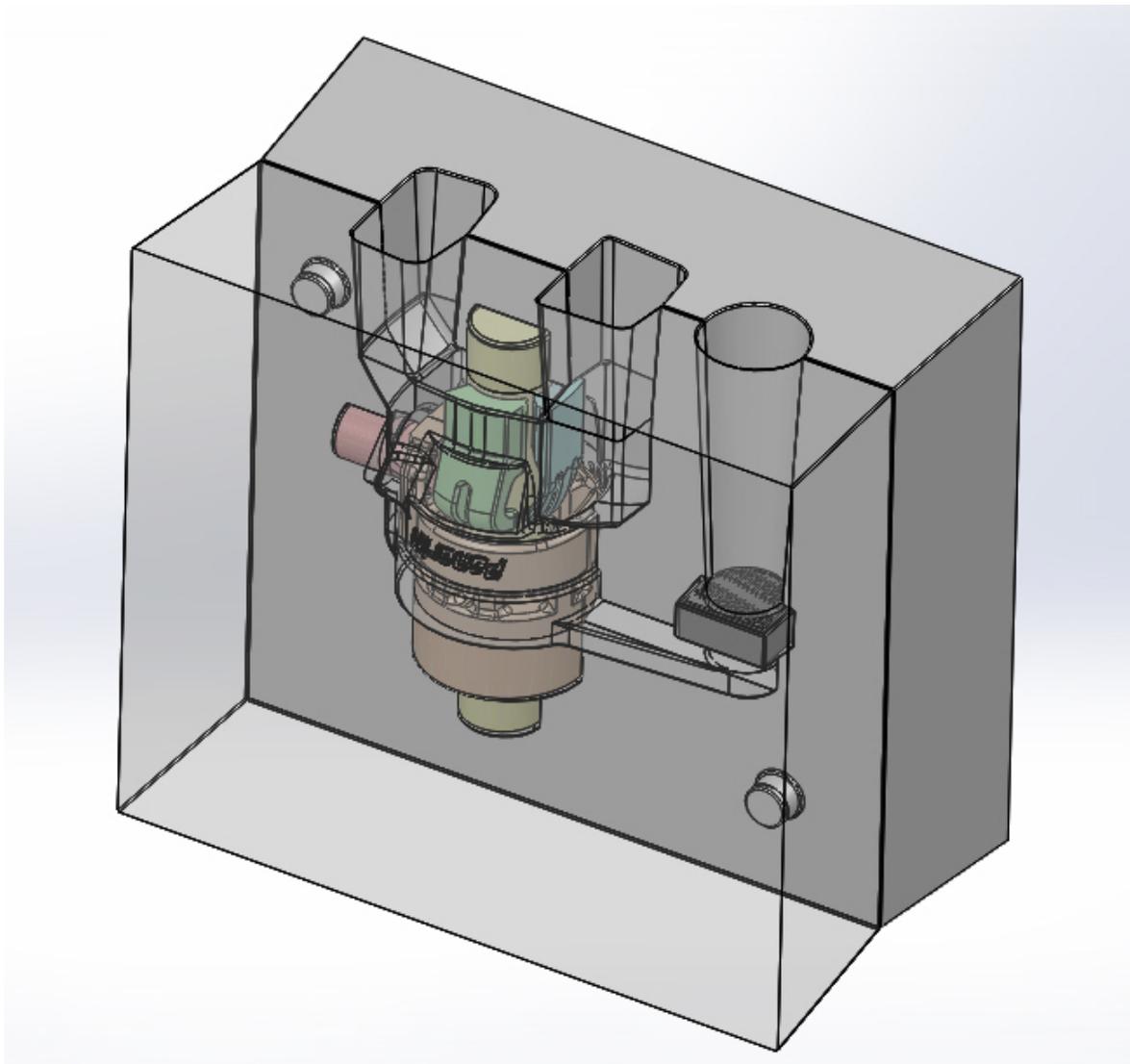


Figura 100: forma chiusa e pronta per il riempimento

distacco dei gusci, per tale motivo si consiglia vivamente di serrare le due molle all'interno di una morsa da rimuoversi solo negli istanti precedenti la distaffatura.

4.4 Proposte per la realizzazione delle attrezzature

Per la costruzione delle anime e dei gusci si è scelto di non avvalersi di tecniche di prototipazione rapida, dunque la strada da percorrere è quella più tradizionale della formatura in cassetta, cioè si conferisce alla sabbia la forma desiderata a mezzo di appositi stampi.

Si faranno ora alcune considerazioni volte alla realizzazione di codeste attrezzature da farsi in quantità di uno per ognuna delle parti costituenti la stazione di colata.

Casse modello

Per la fabbricazione delle molle, una attrezzatura rudimentale può anche essere semplicemente costituita dai due semimodelli da posizionarsi di volta in volta all'interno della staffa prima dell'aggiunta dell'impasto di inerti, c'è però da dire che, tra tutte alternative possibili, si tratta di quella più scomoda dal punto di vista di processo perché, per ogni pezzo, il grado di precisione va a dipendere fortemente dalla perizia dell'operatore. Per non rischiare malintesi con i fornitori quindi si decide di passare all'utilizzo di veri e propri stampi privi di parti mobili o smontabili per i quali semplicemente basta effettuare il riempimento e la compattazione della sabbia e, dopo la fase di indurimento, estrarre il guscio finito. Questa strategia risulta applicabile sia perché la formatura non viene fatta a “verde”, e quindi la

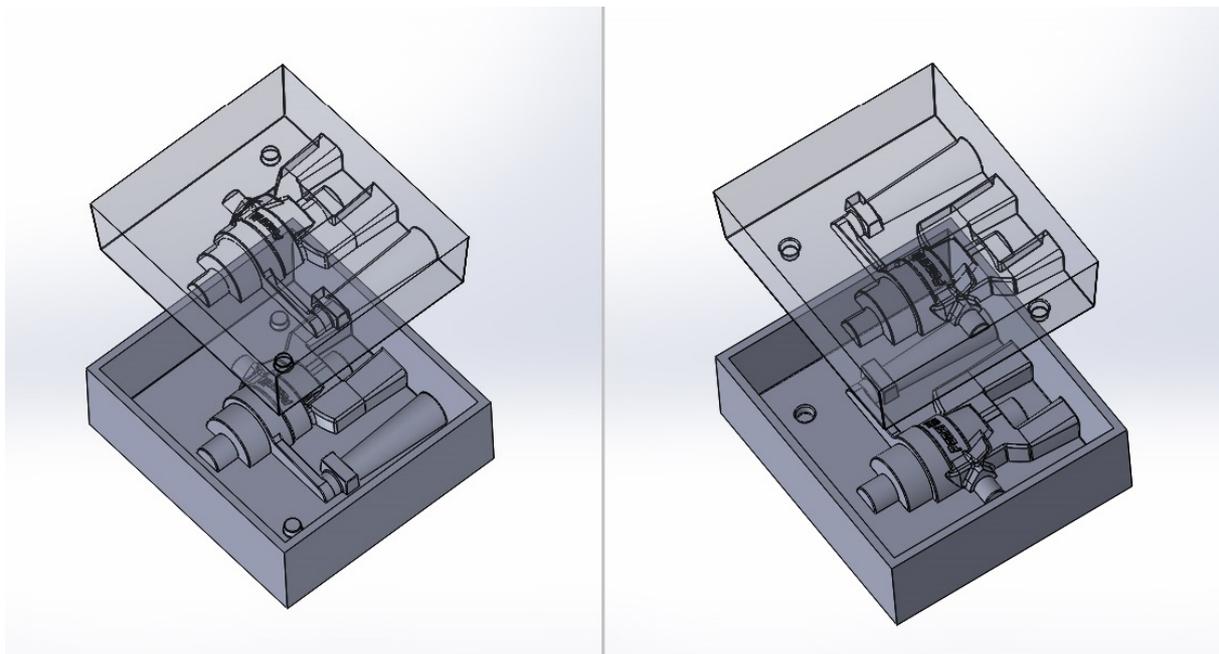


Figura 101: stampi per la motta sinistra (a sinistra) e per la motta destra (a destra), in trasparenza il solido risultante della formatura

sabbia pressata può essere maneggiata anche priva della staffa, ma anche in virtù del fatto che lo stampo in questione è semplicissimo da costruire. Precisamente, per ognuna delle due motte basta realizzare una cassetta di opportune dimensioni (Figura 101) con le pareti sformate secondo la direzione di estrazione, indi fissarvi sul fondo il semimodello con l'accortezza di disporlo poggiando la sommità del boccame contro un lato della cornice (in questo modo sul guscio risultano le bocche dei montanti e del canale di colata). Fortunatamente in questo caso non è necessario dotare il singolo stampo di una seconda parte con cui essere accoppiato perché la faccia superiore del pezzo può essere rifinita “rasando” la sabbia in eccedenza in riferimento ai bordi della cassa e, anche se la precisione non fosse delle migliori, nessun problema sorgerebbe perché quella in questione è una superficie che non deve essere accoppiata con null'altro. Infine, con una ulteriore piccola accortezza è possibile ricavare sul fondo delle casse dei risalti che possano imprimere sulle parti in sabbia le forme degli incastri di riferimento per un corretto accoppiamento delle motte.

Cassa d'anima per il gruppo condotti di travaso centrale

La geometria del pezzo non è esattamente delle più semplici per via dei piccoli dettagli quali le tre “dita” costituenti altrettanti condotti di travaso, perlomeno però la cassa può essere fatta di due sole parti con l'unica accortezza di tracciare una superficie di divisione tutt'altro che piana ricercata grazie agli strumenti per l'analisi di sformo. Per avere un buon funzionamento dello stampo tuttavia c'è la forte esigenza di avere un solido accoppiamento dei due gusci su

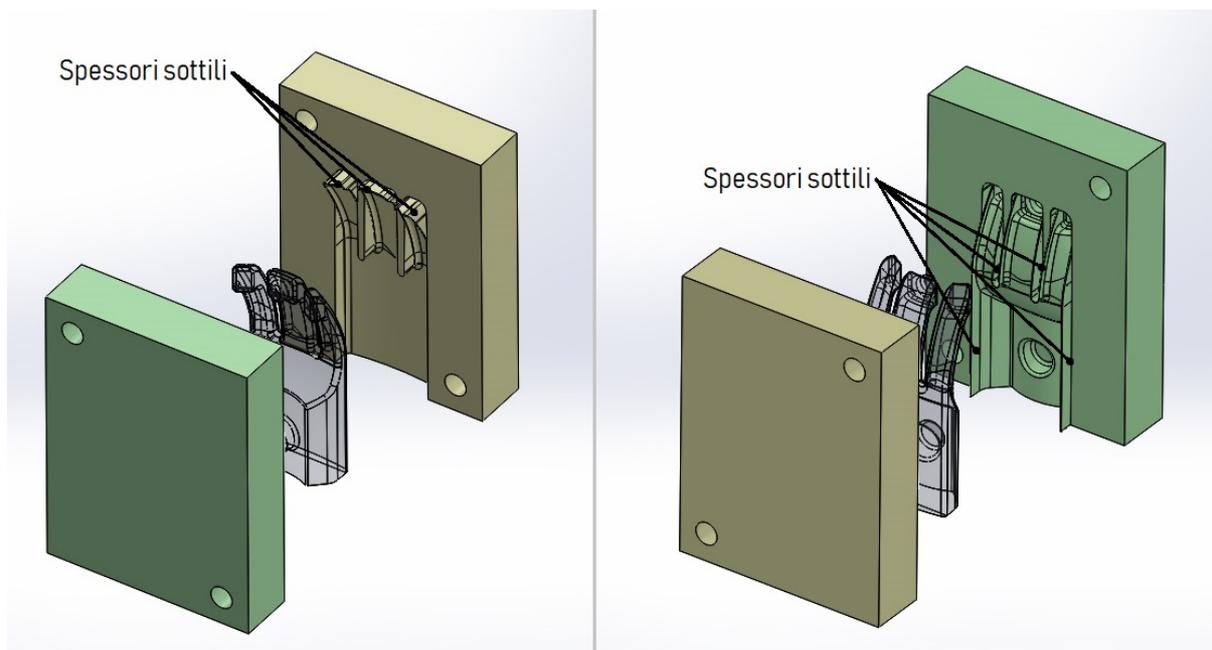


Figura 102: vista esplosa dello stampo per l'anima del gruppo travasi centrale

di una superficie piana, si accetta quindi il compromesso di avere le parti in questione che finiscono col compenetrarsi l'un l'altra, o, in altre parole, ci si trova nella situazione in cui la geometria di ognuna delle due metà stampo si propaga anche oltre il piano di chiusura andando a cercare un riscontro ad una quota diversa (Figura 102). Il disegno che viene presentato è una possibile soluzione al problema ma bisogna tenere presente che è stato realizzato con un CAD non specifico per stampi dunque presenta alcune pecche quali spessori troppo sottili in alcuni punti e una localizzazione non ottimale di certi volumi.

La posizione dei fori per le spine di riferimento non è tassativa, ma la loro presenza è necessaria per garantire un corretto accostamento delle parti, a stampo chiuso (Figura 103) diviene inoltre visibile anche la bocca di riempimento, il bordo della quale è previsto che venga usato come riferimento per la “rasatura” della sabbia in eccedenza, pratica fondamentale che serve per rifinire quella che è l'unica superficie piana del pezzo.

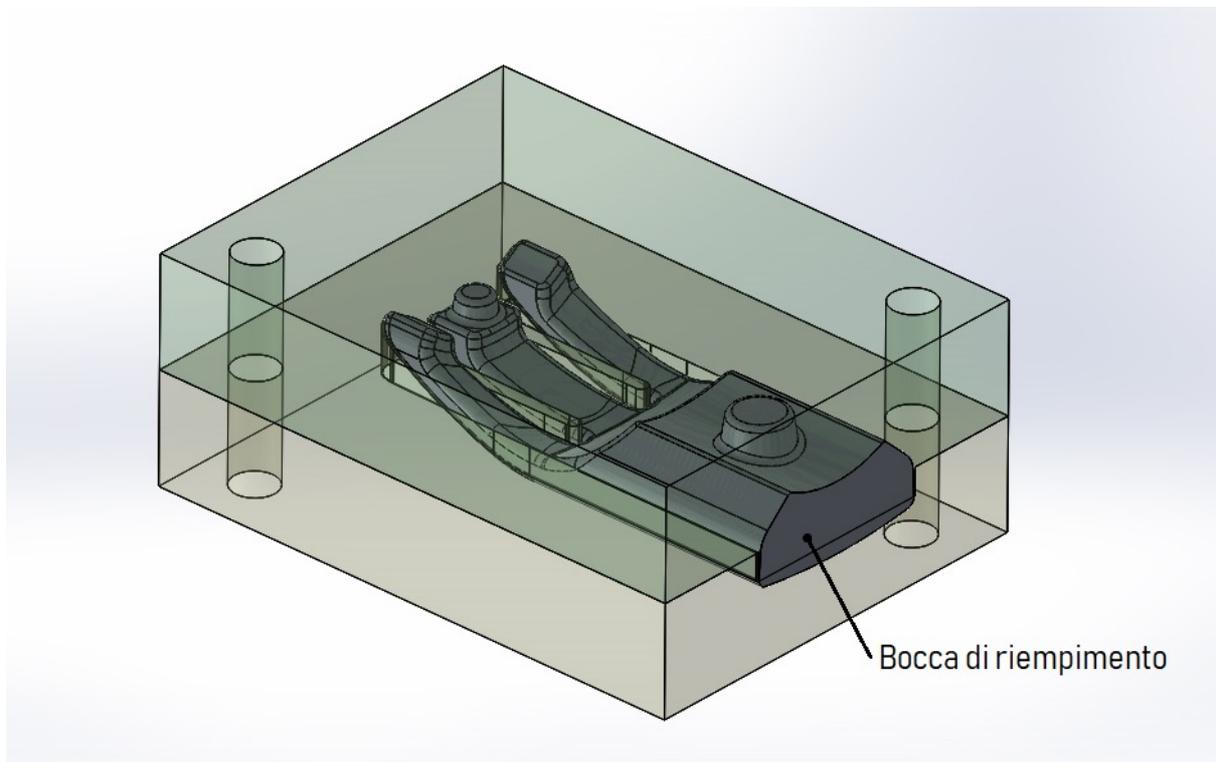


Figura 103: stampo per l'anima del gruppo travasi centrale assemblato

Cassa d'anima per il gruppo condotti di travaso destro e sinistro

Di nuovo la maggior complicazione nella progettazione dello stampo discende dalla presenza delle due protusioni rappresentative dei canali per il passaggio della miscela, la loro forma infatti dà nuovamente luogo ad una superficie di divisione della cassa d'anima che tutto è fuorché piana. Come per il particolare precedentemente analizzato, si sceglie un piano su cui

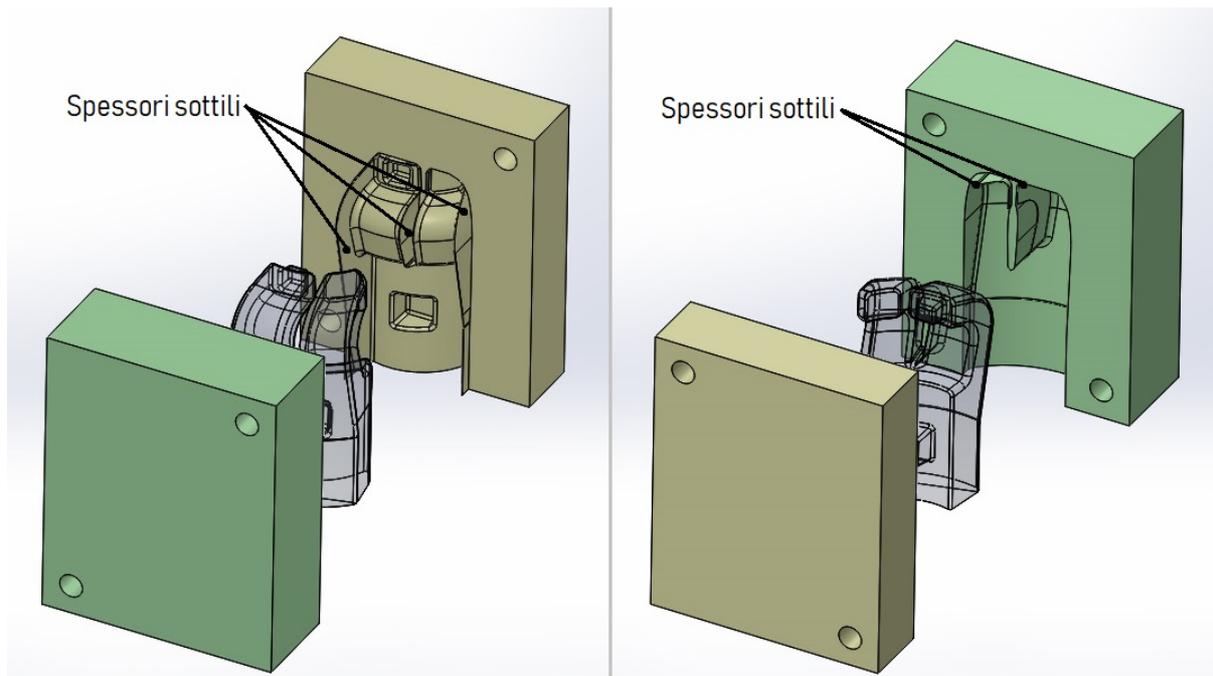


Figura 104: vista esplosa dello stampo per l'anima del gruppo travasi destro

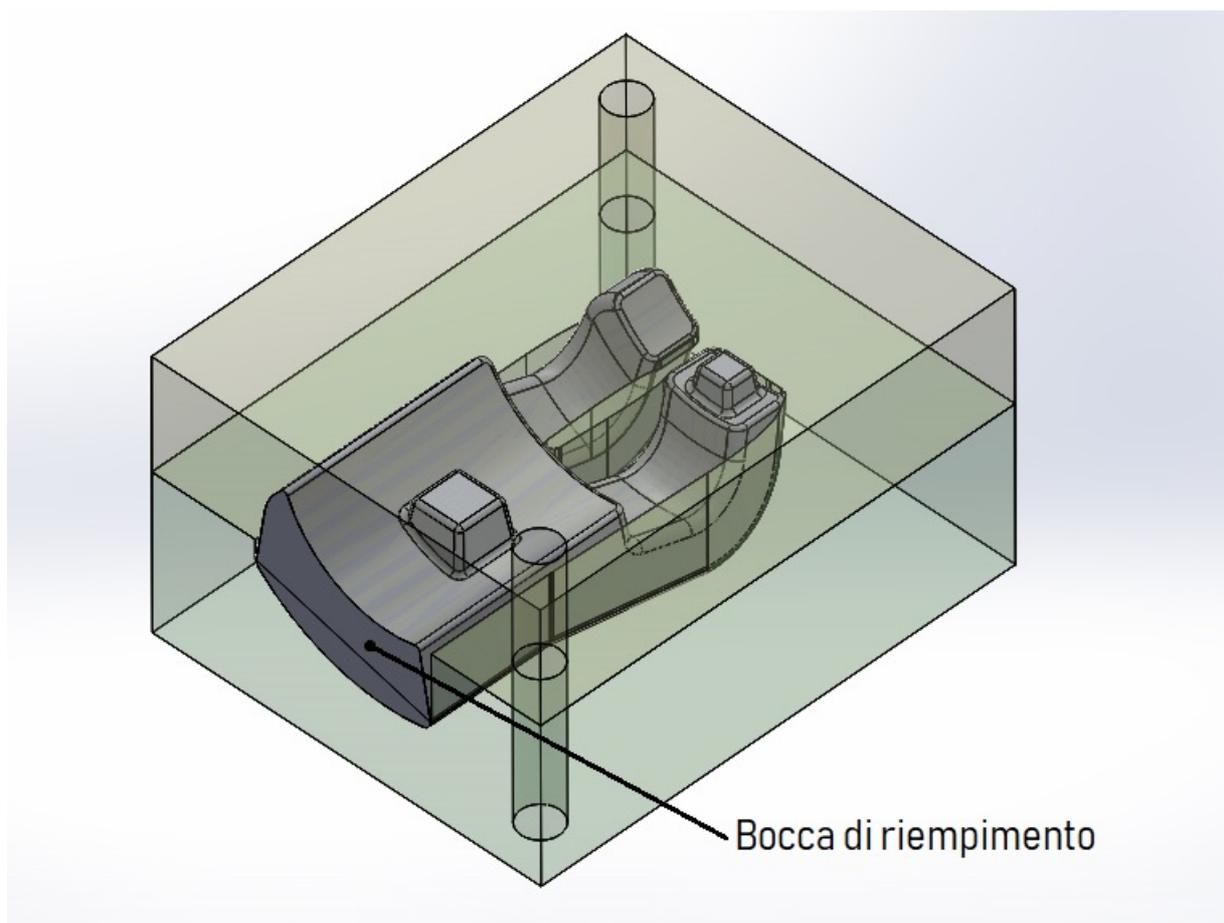


Figura 105: stampo per l'anima del gruppo travasi destro assemblato

eseguire l'accoppiamento delle due parti dello stampo lasciando le geometrie comunque libere, a loro modo, di insinuarsi una dentro l'altra (Figura 104).

Una conformazione non esattamente ottimale, evidenziata in primis da spessori sottili in alcuni punti, è inevitabile per limiti di software, sarà tuttavia corretta in quella che sarà la cassa d'anima reale così da poterla mettere in condizioni di resistere meccanicamente alle operazioni di riempimento ed estrazione del pezzo, infine, come d'abitudine, una coppia di fori calibrati serve da riferimento per avere una corretta chiusura dei due gusci. La bocca di riempimento per comodità viene sempre realizzata in corrispondenza di una superficie piana abbastanza estesa (quella della base del pezzo) così da poterla rifinire con una semplice "rasatura" (Figura 105).

L'anima destra è chiaramente la copia speculare di quella sinistra quindi, nei due casi, la soluzione a cui si è giunti è la medesima, per brevità si riportano immagini relative solo al particolare in versione destra.

Cassa d'anima per la canna del cilindro

Sebbene la forma in sé non sia particolarmente complessa, la presenza di due fori di riferimento per il montaggio dell'anima dei travasi centrali, pone nella condizione di ritrovarsi con un sottosquadro. Tenendo in conto che una scelta diversa del piano di divisione non

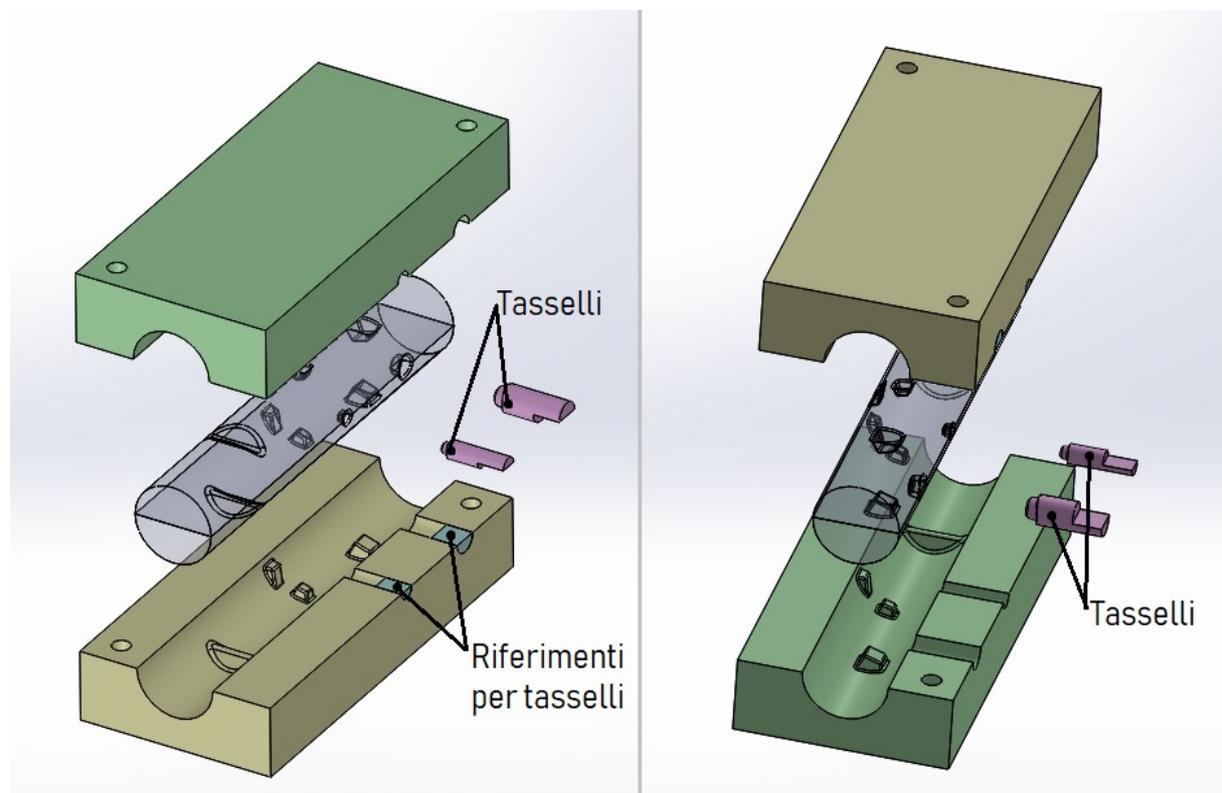


Figura 106: vista esplosa dello stampo per l'anima della canna del cilindro

porterebbe alcun giovamento, l'unica soluzione è implementare due piccoli tasselli, fortunatamente la loro forma è relativamente semplice poiché servono per imprimere nella sabbia solo due sedi coniche, dunque possono essere realizzabili anche solo con due spine, in foto risultano con una geometria più articolata perché essi sono pensati anche per modellare il raccordo con la faccia cilindrica dell'anima (Figura 106).

Per rendere più agevole il riempimento dello stampo si lasciano esposte verso l'esterno entrambe le estremità piane del pezzo e, a garantire un perfetto accoppiamento delle due metà ci sono due spine di riferimento (Figura 107). Per la presenza dei due tasselli l'estrazione del pezzo avviene leggermente più articolata, infatti bisogna per prima cosa separare i due gusci lasciando per ultima la rimozione dei perni conficcati nell'anima.

In questo caso l'assenza di dettagli di ridotte dimensioni ha consentito di costruire al CAD una superficie di divisione in modo estremamente agevole, grazie a questa situazione favorevole non risultano i classici spessori sottili che metterebbero a rischio la durata della vita dell'attrezzatura.

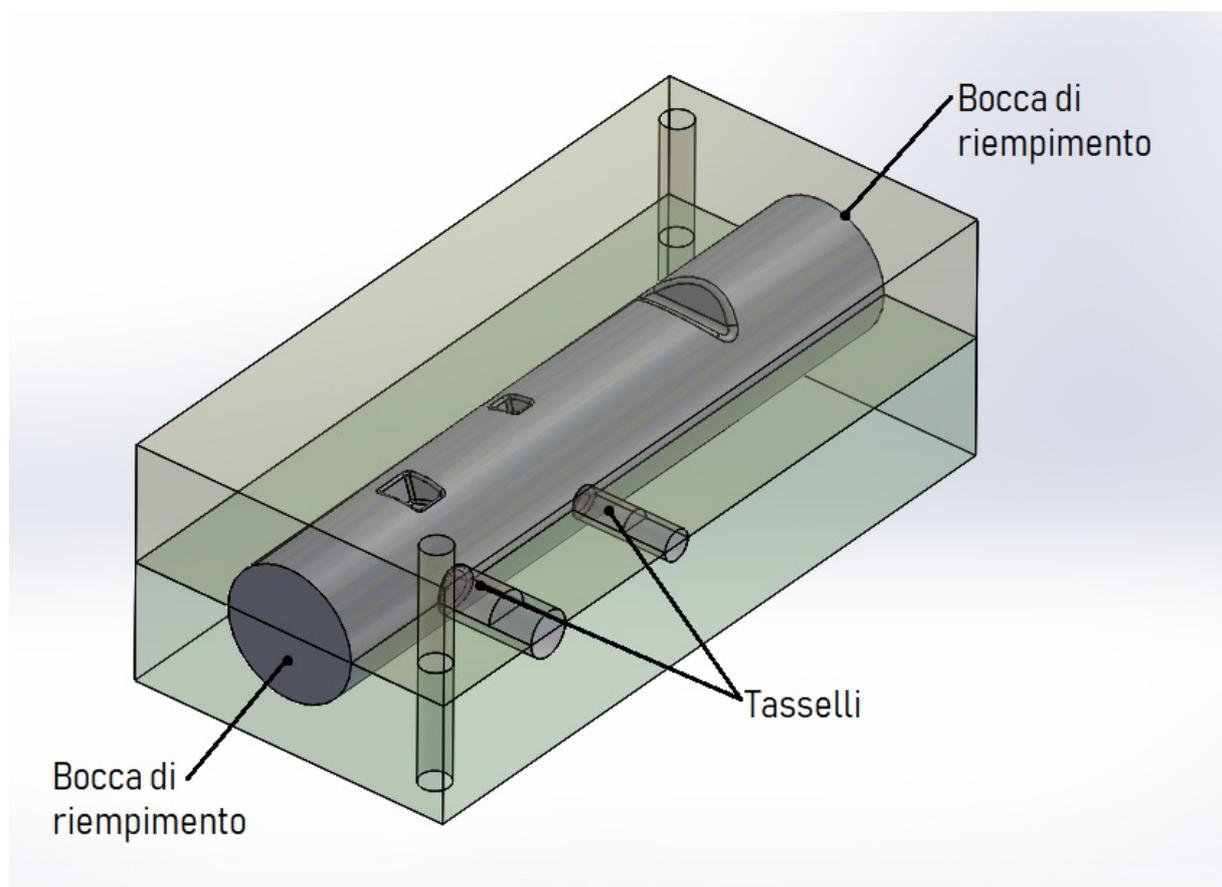


Figura 107: stampo per l'anima della canna del cilindro assemblato

Cassa d'anima per il condotto di scarico

L'anima in questione deve necessariamente essere fabbricata mediante uno stampo diviso in tre parti, non tanto per la forma sgradevole ma piuttosto per esigenze di processo, infatti sarebbe stato possibile ottenere lo stesso pezzo con una cassetta costituita di due soli gusci, problema era che per consentire una buona estraibilità si rendeva necessario sformare le superfici "S" (Figura 108). Essendo però tali aree impiegate per l'accoppiamento con l'anima della canna del cilindro, si è preferito di gran lunga mantenere delle interfacce tra i due membri conformi così da scongiurare il più possibile assemblaggi di bassa qualità, il prezzo è chiaramente stato quello di introdurre il terzo componente dello stampo cui è demandata la sola funzione di formare la parte inerente l'incastro.

Nonostante il numero maggiore di parti, c'è comunque da dire che, nella sua globalità la cassa d'anima non si presenta con un livello di complessità costruttiva troppo elevata, infatti il suo componente frontale (Figura 108 in azzurro) è un semplice parallelepipedo con un risalto a profilo circolare e due scavi atti a plasmare i due riferimenti tra scarico e canna. Questa sua conformazione, per lo meno, è tale che si può pensare di evitare di utilizzare due ulteriori spine di riferimento rispetto al solito paio necessario tra i due gusci principali, per l'appunto si può supporre che il risalto cilindrico possa fungere da vincolo per la direzione orizzontale

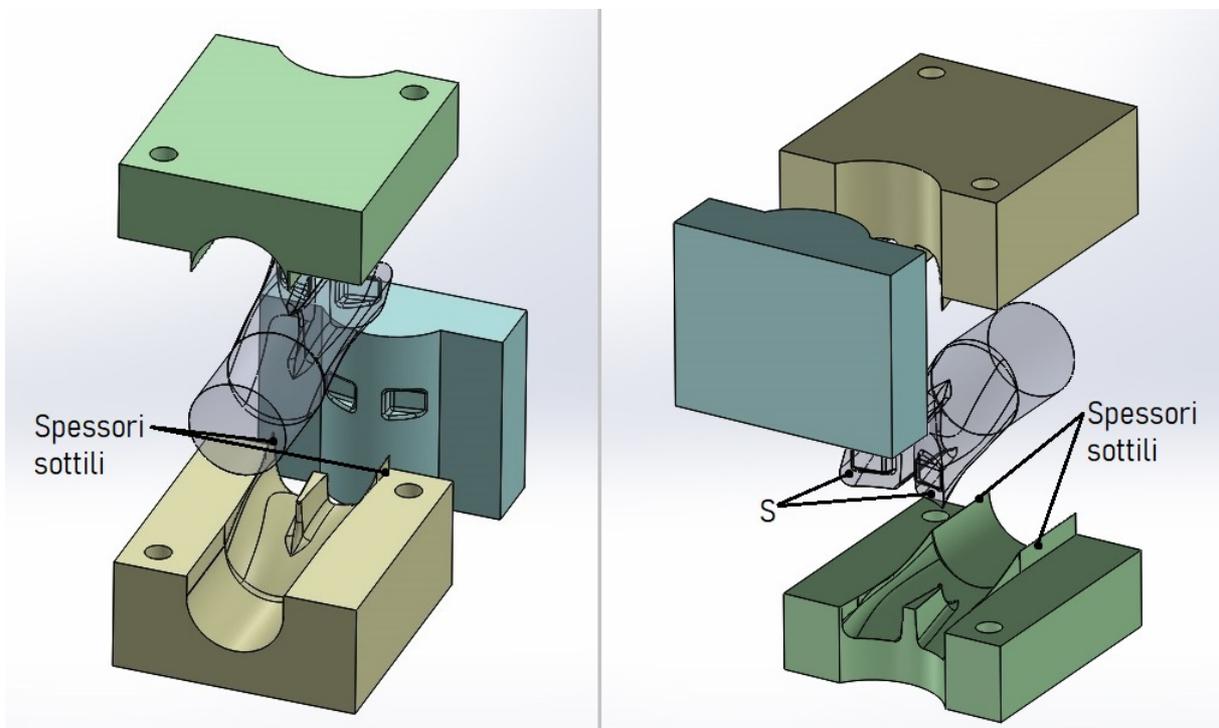


Figura 108: vista esplosa dello stampo per l'anima del condotto di scarico

lasciando l'onere del posizionamento in verticale all'accostamento delle base del componente giallo e di quello azzurro sullo stesso piano.

Nuovamente si è dovuto accettare di fare i conti con un software non adatto alla progettazione di stampi, infatti si notano spessori sottili in prossimità delle superfici piane di chiusura della cassa che risultano da una sequenza obbligata di passi da compiersi durante la fase di modellazione tridimensionale.

La bocca di riempimento viene realizzata in corrispondenza della seconda estremità dell'anima recante una faccia piana che, al solito, viene rifinita con la rasatura della sabbia in eccedenza (Figura 109).

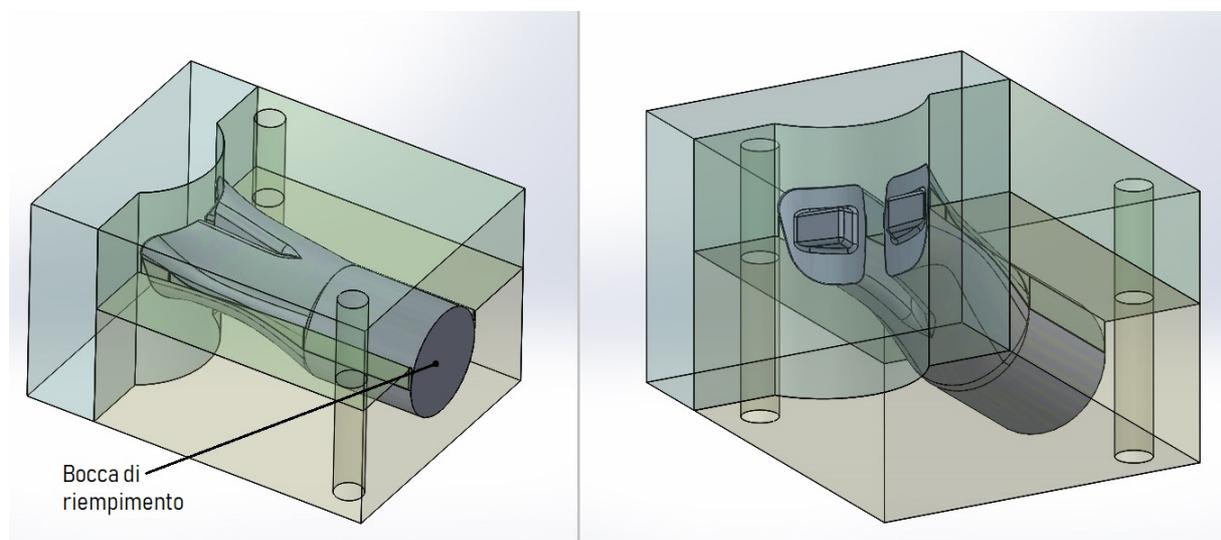


Figura 109: stampo per l'anima del condotto di scarico assemblato

Cassa d'anima per il circuito di raffreddamento, parte destra e sinistra

Si tratta indubbiamente delle anime più problematiche da farsi per via della complessità geometrica, soprattutto nella zona popolata dalle quattro appendici che collegano il volume vero e proprio del circuito dell'acqua a quello della portata d'anima, per questa ragione infatti è molto difficile identificare chiaramente una superficie di divisione capace di delimitare i due gusci della cassetta, tanto che, perfino attraverso il software CAD, non è stato possibile ottenere un loro disegno ragionevolmente corretto. Dall'analisi di sforno (Figure 92 e 93), risulta noto che il pezzo è effettivamente estraibile da uno stampo costituito di due sole parti, il riempimento della cassetta invece, andrà effettuato accedendo dalla sommità del tratto con funzione di portata d'anima e dalla base del circuito di raffreddamento, cioè ove esso si espande a formare il condotto di collegamento con il basamento motore (Figura 111).

I due gusci, come di rito, dovranno essere accoppiati con spine di riferimento e le due superfici piane facenti capo alle luci per l'introduzione della sabbia, verranno rifinite livellando l' eccesso alla superficie della cassa chiusa.

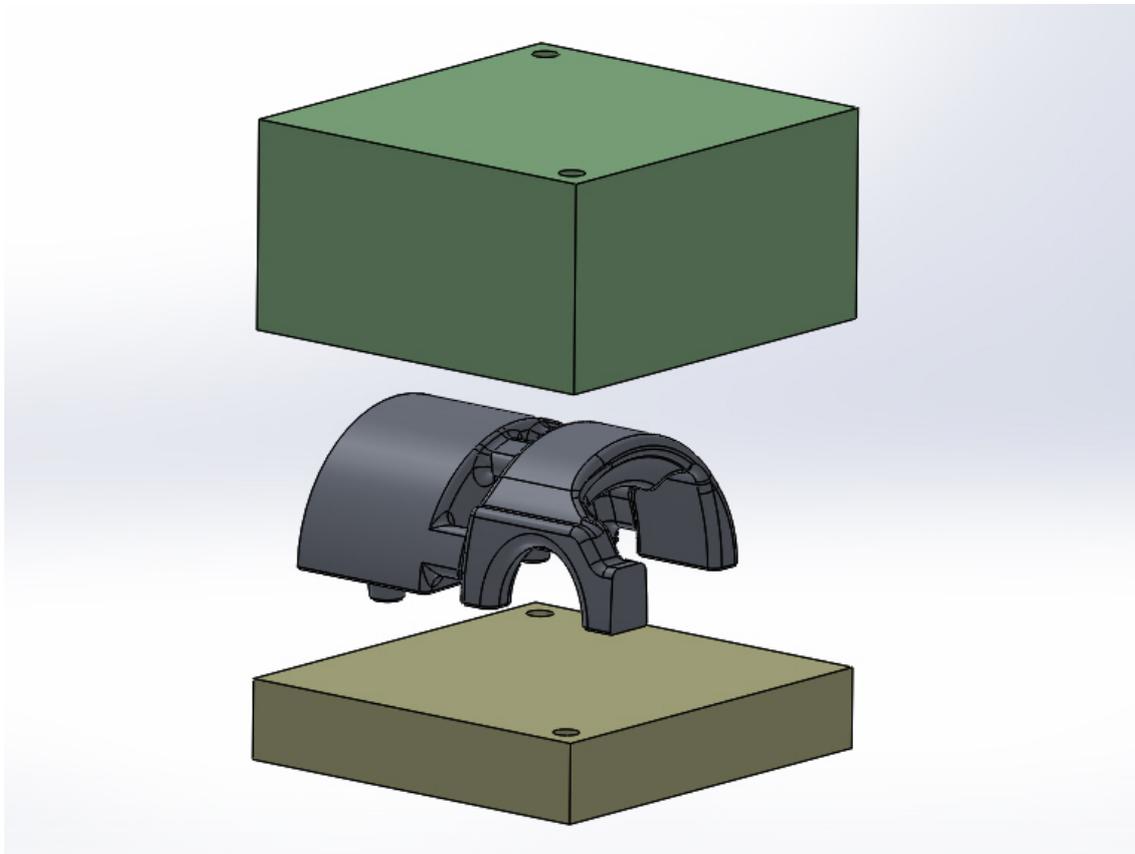


Figura 110: rappresentazione schematica della disposizione delle parti della cassa d'anima rispetto al pezzo

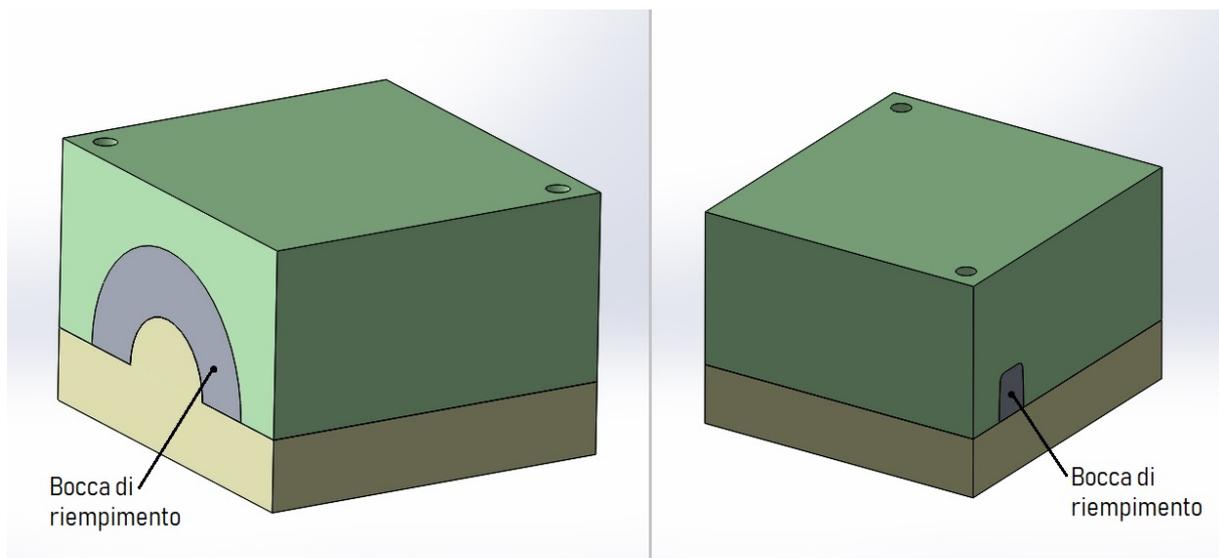


Figura 111: rappresentazione schematica dello stampo assemblato per la parte destra dell'anima del circuito di raffreddamento

Tutti i disegni di stampi presentati in questo capitolo sono ovviamente solo indicativi, infatti si ricordano i più volte citati limiti a livello di CAD che hanno costretto a lasciare in certi punti dettagli con spessori estremamente sottili, i quali non sopravviverebbero sicuramente a lungo quando sottoposti all'azione aggressiva del ciclo di formatura della sabbia. Un'altra consapevole omissione riguarda il posizionamento dei fori di sfiato che servono, qualora il riempimento sia meccanizzato, a far uscire l'aria da dentro la cassa lasciando il posto alla sabbia iniettata con la tecnica dello “sparo”.

Per tali ragioni, i risultati di quest'ultima parte dello studio, verranno consegnati al cliente affinché possano fungere solo da linea guida durante la costruzione delle attrezzature, la quale, anche per motivi di costi, sarà effettuata quasi completamente a mano con un procedimento simile a quello tradizionale.

Arrivati a questo punto, sarà necessario procedere producendo le stampe 3D dei due semimodelli e di tutti i sette particolari costituenti il gruppo delle anime (gruppo travasi centrale, gruppo travasi destro, gruppo travasi sinistro, condotto di scarico, canna del cilindro, circuito di raffreddamento lato destro e circuito di raffreddamento lato sinistro). Poiché il processo a deposizione di materiale fuso tramite testa di estrusione (FDM) però lascia, oltre ad una finitura non sufficientemente buona, anche un polimero scarsamente lavorabile con utensili manuali, si esegue una pesante stuccatura. Dopo aver rifinito con aggiustaggio manuale tutte le superfici di tutte le parti, per i due semimodelli, grazie ad una sequenza di calchi con gomma siliconica, si realizza una copia in resina caricata con ceramica, questo per ottenere elementi con grande resistenza all'abrasione da installare sul fondo delle casse per la formatura delle motte. Per le anime invece, su ognuno dei solidi stampati, stuccati e rifiniti, si va a ricercare manualmente la linea di divisione (in questa fase di grande utilità risultano le analisi di sforno e i disegni schematici delle cassette) delimitandola, poco alla volta, con un cordone di plastilina che circonda tutto il pezzo. Terminata la prima fase di “cercatura”, con altra plastilina si crea, partendo dalla linea di divisione, una massiccia stuccatura che diverrà la superficie di chiusura dello stampo da realizzare, lasciando così in vista solo la porzione di volume corrispondente all'impronta in uno dei due gusci. Da ciò, sempre con una sequenza di calchi, si andrà ad ottenere il primo guscio in resina caricata sul quale sarà riportata l'impronta delimitata nelle fasi precedenti, quindi si rimuove la plastilina dal solido in plastica e lo si inserisce nello scavo presente nella prima parte dello stampo ora divenuta disponibile. Partendo dall'insieme del primo guscio accoppiato al relativo solido, con l'accortezza di

passare una mano di distaccante (generalmente un inibitore della resina a base siliconica), si esegue una ulteriore colata di resina mista a polveri ceramiche così da ottenere, con un ultimo calco, il secondo guscio.

Come ultima fase, si conclude la costruzione della cassa d'anima eseguendo eventuali aggiustaggi delle imperfezioni, fori di sfiato dell'aria e fori calibrati per le spine di riferimento.

Il processo brevemente esposto è, ovviamente, fuori da ogni logica di produzione industriale, infatti sarebbe sicuramente più semplice ed efficace eseguire una fresatura a controllo numerico direttamente dei modelli e dei gusci delle casse d'anima, senza passare per calchi, aggiustaggi e simili peripezie. Viene quindi da chiedersi che senso abbia prendere in considerazione un metodo così macchinoso per costruire qualcosa che con le tecnologie giuste si realizza in modo relativamente banale: la risposta è semplicemente racchiusa nella parola “costo”. Certo, si è provato ad interpellare un modellista professionista per consegnargli tutta la documentazione necessaria e lasciare a lui (pagando), l'onere di fabbricare le attrezzature, problema era che questo avrebbe richiesto esborsi troppo ingenti per essere sostenuti da un appassionato, il quale le parti di moto le costruisce solo per diletto. Ecco che, a questo punto, l'impiego di tecniche oramai obsolete e molto spostate sul lavoro manuale torna ad essere competitivo.

Capitolo 5

Conclusioni

La trattazione esposta nei precedenti capitoli, mostra essenzialmente il ciclo di progettazione di un nuovo componente riservando larghissima attenzione al processo tecnologico di fabbricazione che, in questo caso, è una tecnica di fonderia in terra.

Le maggiori difficoltà si sono registrate durante le prime fasi di sviluppo del prodotto, ovvero quando ci si ritrovava a dover realizzare il disegno di un oggetto che potesse rispondere alle richieste del cliente, non avendo esperienza alcuna in materia di costruzione di motori a combustione interna. Il risultato quindi è stato un cospicuo quantitativo di ore trascorse a lavorare al CAD, con lo scopo di ottenere un componente in parte simile ad altri già esistenti, ma fortemente personalizzato ove le circostanze lo richiedevano.

Per quel che concerne la progettazione del processo fusorio vero e proprio, ci si è affidati sì alle conoscenze apprese durante il corso degli studi, ma anche, in una certa misura, ai consigli profusi da persone impiegate nel settore le quali pazientemente si sono impegnate per rispondere alle questioni di ordine pratico e operativo sorte durante le varie fasi del progetto.

Trattando il problema con l'aiuto, tra le altre cose, di un simulatore FEM si è cercato di portare una piccola innovazione all'interno di una pratica che, generalmente, è ancora molto legata a tecniche tradizionali. Come esempio, si cita la pratica del dimensionamento del bocchame, spesso eseguito sulla base dell'esperienza ed eventualmente validata con alcuni getti di prova che, tuttavia, costringe a sostenere l'onere per costruire attrezzature con il rischio che esse si dimostrino inadatte per la nascita di difetti. Certamente va detto che anche un software FEM, come può essere ProCAST, richiede un certo esborso per le licenze, ma indubbiamente ci si ritrova con il vantaggio che una simulazione agli elementi finiti, in termini di tempo, richiede al più un'ora o due, contro le settimane che invece sarebbero necessarie per allestire una colata pilota.

I risultati ottenuti, ovvero il disegno del componente da costruirsi, la forma ottimizzata del grappolo di fusione e le proposte per la costruzione delle attrezzature, sono naturalmente commisurati all'abilità del progettista che, in questo caso, si cimentava per la prima volta in assoluto in un incarico di questo genere. Probabilmente un modellista esperto avrebbe potuto far molto di meglio ma tant'è che per acquisire simili capacità il percorso formativo dura

decine di anni in cui è necessario, non solo sviluppare abilità di disegnatore, ma anche partecipare personalmente alle fasi di fabbricazione degli stampi per rendersi conto, di volta in volta, delle diverse problematiche. Non si può fare a meno di notare che comunque il mestiere dell'attrezzista rimane ancora oggi, in una certa misura, manuale e ricco di tutte quelle fasi di aggiustaggio la cui qualità di esecuzione è la vera differenza tra un prodotto di buona e uno di ottima fattura. Di questo ancora una volta si ha testimonianza prendendo visione del capitolo 4.4 ove alcuni dei disegni risultano scarsamente rifiniti e questo, non perché non sia umanamente possibile farlo, ma piuttosto, almeno secondo l'opinione dell'autore, risulterebbe una pratica molto più efficace colloquiare pochi minuti con il modellista indicandogli il corretto modo di procedere con un aggiustaggio, piuttosto che impiegare svariate ore per correggere una manciata di dettagli sul CAD.

Ricapitolando, l'aspetto innovativo del presente studio riguarda senz'altro il componente stesso, il quale è stato niente di meno che disegnato partendo dal cosiddetto "foglio bianco", in più va considerata nella dovuta misura l'introduzione delle simulazioni FEM per le valutazioni relative al metodo di fabbricazione.

Ulteriori sviluppi sono sicuramente possibili ma, per discuterne a ragion veduta, sarebbe necessario avere sotto mano i resoconti riguardanti sia il processo di fabbricazione, che eventuali guasti e difetti manifestati dal prodotto durante il servizio attivo, così da agire in modo mirato per risolvere le diverse problematiche riscontrate.

Per motivi di tempo non è stato possibile passare agli aspetti pratici del progetto prima delle scadenze imposte per il completamento del presente elaborato, dunque si ritiene sensato concludere a questo punto l'esposizione degli argomenti.

Appendice

Composizione chimica delle leghe per fonderia (in percentuali di massa)

Alloy Group	Alloy designation		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti ^h	Others ^{a, g}		Aluminium	
	Numerical	Chemical symbols												Each	Total		
Al ^g	-	Al 99,6E	0,10	0,30	0,01	0,007	0,02	0,005	-	0,04	-	-	-	-	0,03 ^e	-	99,60 min.
	-	Al 99,7E	0,07	0,20	0,01	0,005	0,02	0,004	-	0,04	-	-	-	-	0,03 ^f	-	99,70 min.
AlCu	EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	0,20 (0,15)	0,35 (0,30)	4,2 to 5,0	0,10	0,15 to 0,35 (0,20 to 0,35)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05	0,15 to 0,30 (0,15 to 0,25)	0,03	0,10	Remainder
	EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti	0,18 (0,15)	0,19 (0,15)	4,2 to 5,2	0,55	-	-	-	0,07	-	-	0,15 to 0,30 (0,15 to 0,25)	0,03	0,10	Remainder	
	EN AC-21200	EN AC-Al Cu4MnMg	0,10	0,20 (0,15)	4,0-5,0	0,20 to 0,50	0,15 to 0,50 (0,20 to 0,50)	-	0,05 (0,03)	0,10 (0,05)	0,03	0,03	0,10	0,03	0,03	0,10	Remainder
AlSiMgTi	EN AC-41000 ⁱ	EN AC-Al Si2MgTi	1,6 to 2,4	0,60 (0,50)	0,10 (0,08)	0,30 to 0,50	0,45 to 0,65 (0,50 to 0,65)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05 to 0,20 (0,07 to 0,15)	0,05	0,15	Remainder	
AlSi7Mg	EN AC-42000 ⁱ	EN AC-Al Si7Mg	6,5 to 7,5	0,55 (0,45)	0,20 (0,15)	0,35	0,20 to 0,65 (0,25 to 0,65)	-	0,15	0,15	0,15	0,05	0,25 ^l (0,20)	0,05	0,15	Remainder	
	EN AC-42100 ⁱ	EN AC-Al Si7Mg0,3	6,5 to 7,5	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,25 to 0,45 (0,30 to 0,45)	-	-	0,07	-	-	0,25 ^l (0,18)	0,03	0,10	Remainder	
	EN AC-42200 ⁱ	EN AC-Al Si7Mg0,6	6,5 to 7,5	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,45 to 0,70 (0,50 to 0,70)	-	-	0,07	-	-	0,25 ^l (0,18)	0,03	0,10	Remainder	
	EN AC-43000 ⁱ	EN AC-Al Si10Mg(a)	9,0 to 11,0	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,45	0,20 to 0,45 (0,25 to 0,45)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15	Remainder
AlSi10Mg	EN AC-43100 ⁱ	EN AC-Al Si10Mg(b)	9,0 to 11,0	0,55 (0,45)	0,10 (0,08)	0,45	0,20 to 0,45 (0,25 to 0,45)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	9,0 to 11,0	0,65 (0,55)	0,35 (0,30)	0,55	0,20 to 0,45 (0,25 to 0,45)	-	0,15	0,35	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-43300 ⁱ	EN AC-Al Si9Mg	9,0 to 10,0	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,25 to 0,45 (0,30 to 0,45)	-	-	0,07	-	-	-	0,15	0,03	0,10	Remainder
	EN AC-43400 ⁱ	EN AC-Al Si10Mg(Fe)	9,0 to 11,0	1,0 (0,45 to 0,9)	0,10 (0,08)	0,55	0,20 to 0,50 (0,25 to 0,50)	-	0,15	0,15	0,15	0,15	0,05	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-43500 ⁱ	EN AC-Al Si10MnMg ^c	9,0 to 11,5	0,25 (0,20)	0,05 (0,03)	0,40 to 0,80	0,10 to 0,60 (0,15 to 0,60)	-	-	0,07	-	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Remainder

(continua)

Alloy Group	Alloy designation		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti ^h	Others ^{a, g}			
	Numerical	Chemical symbols												Each	Total		
AISI	EN AC-44000 ¹	EN AC-Al Si11	10,0 to 11,8	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,45	-	-	0,07	-	-	0,15	0,03	0,10	Remainder	
	EN AC-44100 ¹	EN AC-Al Si12(b)	10,5 to 13,5	0,65 (0,55)	0,15 (0,10)	0,55	0,10	-	0,10	0,15	0,10	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Remainder	
	EN AC-44200 ¹	EN AC-Al Si12(a)	10,5 to 13,5	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,35	-	-	-	0,10	-	-	0,15	0,05	0,15	Remainder	
	EN AC-44300	EN AC-Al Si12(Fe)(a)	10,5 to 13,5	1,0 (0,45 to 0,9)	0,10 (0,08)	0,55	-	-	-	0,15	-	-	0,15	0,05	0,25	Remainder	
	EN AC-44400 ¹	EN AC-Al Si9	8,0 to 11,0	0,65 (0,55)	0,10 (0,08)	0,50	0,10	-	0,05	0,15	0,15	0,05	0,05	0,05	0,15	Remainder	
	EN AC-44500 ¹	EN AC-Al Si12(Fe)(b)	10,5 to 13,5	1,0 (0,45 to 0,9)	0,20 (0,18)	0,55	0,40	-	-	0,30	-	-	0,15	0,05	0,25	Remainder	
	EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu4	5,0 to 7,0	1,0 (0,9)	3,0 to 5,0 (0,9)	0,20 to 0,65	0,55	0,15	0,45	2,0	2,0	0,30	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,35	Remainder
	EN AC-45100	EN AC-Al Si6Cu3Mg	4,5 to 6,0	0,60 (0,50)	2,8 to 3,8	0,55	0,15 to 0,45 (0,20 to 0,45)	-	0,10	0,20	0,20	0,10	0,05	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-45300	EN AC-Al Si6Cu1Mg	4,5 to 5,5	0,65 (0,55)	1,0 to 1,5	0,55	0,35 to 0,65 (0,40 to 0,65)	-	0,25	0,15	0,15	0,15	0,05	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-45400	EN AC-Al Si6Cu3	4,5 to 6,0	0,60 (0,50)	2,8 to 3,8	0,55	0,05	-	0,10	0,20	0,20	0,10	0,05	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Remainder
EN AC-45500	EN AC-Al Si7Cu0,5Mg	6,5 to 7,5	0,25	0,2 to 0,7	0,15	0,20 to 0,45 (0,25 to 0,45)	-	-	0,07	-	-	-	0,20 ^l	0,03	0,10	Remainder	
AISI9Cu	EN AC-46000	EN AC-Al Si8Cu3(Fe)	8,0 to 11,0	1,3 (0,8 to 1,1)	2,0 to 4,0 (0,8 to 1,1)	0,55	0,05 to 0,55 (0,15 to 0,55)	0,15	0,55	1,2	1,2	0,35	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Remainder
	EN AC-46100	EN AC-Al Si11Cu2(Fe)	10,0 to 12,0	1,1 (0,45 to 1,0)	1,5 to 2,5	0,55	0,30	0,15	0,45	1,7	1,7	0,25	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Remainder
	EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3	7,5 to 9,5	0,8 (0,7)	2,0 to 3,5	0,15 to 0,65	0,05 to 0,55 (0,15 to 0,55)	-	0,35	1,2	1,2	0,25	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Remainder
	EN AC-46300	EN AC-Al Si7Cu3Mg	6,5 to 8,0	0,8 (0,7)	3,0 to 4,0	0,20 to 0,65	0,30 to 0,60 (0,35 to 0,60)	-	0,30	0,85	0,85	0,15	0,10	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Remainder
	EN AC-46400	EN AC-Al Si8Cu1Mg	8,3 to 9,7	0,8 (0,7)	0,8 to 1,3	0,15 to 0,55	0,25 to 0,65 (0,30 to 0,65)	-	0,20	0,8	0,8	0,10	0,10	0,20 ^l	0,05	0,25	Remainder
	EN AC-46500	EN AC-Al Si8Cu3(Fe)(Zn)	8,0 to 11,0	1,3 (0,8 to 1,2)	2,0 to 4,0	0,55	0,05 to 0,55 (0,15 to 0,55)	0,15	0,55	3,0	3,0	0,35	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Remainder
	EN AC-46800	EN AC-Al Si7Cu2	6,0 to 8,0	0,8 (0,7)	1,5 to 2,5	0,15 to 0,65	0,35	-	0,35	1,0	1,0	0,25	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Remainder

(fine)

Alloy Group	Alloy designation		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti ^h	Others ^{a, e}		
	Numerical	Chemical symbols												Each	Total	
AlSi(Cu)	EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)	10,5 to 13,5	0,8 (0,7)	1,0 (0,9)	0,05 to 0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20 (0,15)	0,05	0,25	Remainder
	EN AC-47100	EN AC-Al Si12Cu1(Fe)	10,5 to 13,5 (0,8 to 1,1)	1,3 (0,8 to 1,1)	0,7 to 1,2	0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20 (0,15)	0,05	0,25	Remainder
AlSiCuNiMg	EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNiMg	10,5 to 13,5	0,7 (0,6)	0,8 to 1,5	0,35	0,8 to 1,5 (0,9 to 1,5)	-	0,7 to 1,3	0,35	-	-	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-48100	EN AC-Al Si17Cu4Mg	16,0 to 18,0	1,3 (1,0)	4,0 to 6,0	0,50	0,25 to 0,65 (0,45 to 0,65)	-	0,3	1,5	-	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Remainder
AlMg ^b	EN AC-61100 ⁱ	EN AC-Al Mg3	0,55 (0,45)	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,45	2,5 to 3,5 (2,7 to 3,5)	-	-	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-61200 ⁱ	EN AC-Al Mg9	2,5	1,0 (0,45 to 0,9)	0,10 (0,08)	0,55	8,0 to 10,5 (8,5 to 10,5)	-	0,10	0,25	0,10	0,10	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-61300 ⁱ	EN AC-Al Mg5	0,55 (0,35)	0,55 (0,45)	0,10 (0,05)	0,45	4,5 to 6,5 (4,8 to 6,5)	-	-	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-61400 ⁱ	EN AC-Al Mg5(Si)	1,5 (1,3)	0,55 (0,45)	0,05 (0,03)	0,45	4,5 to 6,5 (4,8 to 6,5)	-	-	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-61500 ⁱ	EN AC-Al Mg5Si2Mn	1,8 to 2,6	0,25 (0,20)	0,05 (0,03)	0,4 to 0,8	4,7 to 6,0 (5,0 to 6,0)	-	-	0,07	-	-	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Remainder
	EN AC-71100	EN AC-Al Zn10Si8Mg	7,5 to 9,5	0,30 (0,27)	0,10 (0,08)	0,15 (0,10)	0,20 to 0,5 (0,25 to 0,5)	-	-	-	9,0 to 10,5	-	-	0,15	0,05	0,15

NOTE 1 Figures in brackets are ingot compositions (prefix EN AB instead of EN AC) where they differ from the casting. See EN 1676 for information.

NOTE 2 Limits are expressed as a maximum unless shown as a range.

^a "Others" does not include modifying or refining elements such as Na, Sr, Sb and P.

^b For alloys with Mg ≥ 3 %, the alloy may contain 0,005 % Be max.

^c Sr addition is recommended.

^d These grades of unalloyed aluminium are specified in EN 576, and included in this European Standard due to its importance for electrotechnical applications.

^e B max. 0,04; Mn + Ti + Cr + V max. 0,030.

^f B max. 0,04; Mn + Ti + Cr + V max. 0,020.

^g "Others" includes all the elements which are not listed in this Table or without specific values.

^h Refining agents such as Ti, B or master alloys containing nucleating particles such as TiB₂ shall not be considered as impurities. Nevertheless, the minimum and maximum content of refining elements shall be agreed between the manufacturer and the purchaser.

ⁱ These alloys are in compliance with EN 601 (for information only).

^j Minimum Ti limits are not required if the grain refining is not required or reached by other means.

Bibliografia

- [1] Norma UNI EN 1706:2010 - Alluminio e leghe di alluminio - Getti - Composizione chimica e proprietà meccaniche.
- [2] John Campbell, Castings - 2003, Butterworth Heinemann.
- [3] Dispensa di fonderia, appunti del corso tenuto dal prof. Lorenzo Donati nell'a.a. 2016/2017 - Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica, II Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Bologna.
- [4] Carmine Pirozzi, Ottimizzazione di Processi FSW “Butt Joint”, “Lap Joint” mediante RSM – Tesi di Dottorato – Ingegneria dei Materiali e della Produzione, Indirizzo Tecnologie e Sistemi di Produzione, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- [5] I. Narasimha Murthya, N. Arun Babub, J. Babu Raoa, High Carbon Ferro Chrome Slag - Alternative Mould Material for Foundry Industry - International Conference on Solid Waste Management, 5IconSWM 2015

Ringraziamenti

Doveroso è citare coloro i quali hanno permesso la realizzazione del progetto in tutti i suoi diversi aspetti, primo tra tutti il Sig. Stefano Panariti committente dello studio e che, fin dall'inizio, ha creduto nelle sue possibilità di successo. Secondi ma non meno importanti gli illustrissimi professori Lorenzo Donati e Ivan Todaro per l' aiuto profuso e la grande disponibilità, nonché il Sig. Lorenzo Cirocchi per le ore spese a dispensare consigli di carattere tecnico e pratico per la costruzione delle attrezzature.