

Università degli studi di Padova

DIPARTIMENTO DI TECNICA E DI GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

Laurea in ingegneria dell'innovazione del prodotto

STUDIO DEI DIFETTI INDOTTI DAL RIEMPIMENTO DEI FORNI DI ATTESA
NELLA FONDERIA DI PRESSOCOLATA: SIMULAZIONE NUMERICA E
VALIDAZIONE SPERIMENTALE

RELATORE: Prof. Giulio Timelli

CO-RELATORI: Ing. Ozen Gursoy, Ing. Giulia Scampone

REFERENTE INDUSTRIALE: Ing. Alessandro Garlet

LAUREANDI:
Nicolò Castegini,
Nicholas Gurin,
Leonardo Zampieri

Anno accademico: 2021-2022

RINGRAZIAMENTI

Durante questo periodo di tesi abbiamo avuto modo di collaborare con diverse persone e realtà lavorative per la buona riuscita di questo lavoro. Per questo ci sembra doveroso fare dei ringraziamenti.

Ringraziamo il prof. Giulio Timelli, nostro relatore, e gli Ing. Giulia Scampone e Ing. Yozen Gyursoy per il supporto e i consigli che ci hanno fornito durante questo arco di tempo.

Ringraziamo l'azienda EDIM S.p.A, il suo personale e l'Ing. Alessandro Garlet, nostro referente industriale, per la disponibilità ed il supporto che ci hanno dato durante la visita aziendale.

Un ringraziamento va all'Ing. Raul Pirovano di XCEngineering s.r.l, che ci ha formato nell'uso del programma di simulazione Flow3D, per la disponibilità ed i consigli sull'uso del programma sia durante che dopo il periodo di formazione.

Ringraziamo infine l'Ing. Federico Nicolasi per la condivisione di materiale che ci ha aiutato a redigere questa tesi.

SOMMARIO

Nelle pagine seguenti si andrà ad analizzare la qualità dell'alluminio in una delle fasi della pressocolata, ovvero in quella di stazionamento nel forno di attesa. In questo forno il metallo viene raccolto per poi essere spillato e inviato agli stampi per la pressocolata.

Nel primo capitolo, vengono descritti i due forni, che vengono confrontati nelle simulazioni mostrando le caratteristiche costruttive (il primo ha una soletta inclinata per il versamento, il secondo ha un canale di versamento verticale). Si parlerà anche della lega utilizzata e del programma di simulazione usato.

Nel secondo capitolo, verrà mostrata la creazione della mesh che sarà utilizzata nelle simulazioni fluidodinamiche dei modelli e la rispettiva analisi di sensitività, necessaria per ottenere dei risultati che rispecchino ciò che avviene nella realtà.

Nel terzo capitolo, verranno confrontati vari parametri che aiuteranno a capire le differenze che le geometrie dei forni portano sulla qualità del metallo. Verranno analizzati due casi che coprono i livelli di metallo liquido che si hanno durante il normale esercizio del forno.

Si potranno quindi tirare delle conclusioni e dare un'opinione su quale modello di forno porta all'ottenimento di un alluminio di qualità maggiore.

INDICE

| | |
|---|----|
| RINGRAZIAMENTI | 2 |
| SOMMARIO..... | 3 |
| LISTA DELLE FIGURE | 5 |
| LISTA DELLE TABELLE..... | 7 |
| INTRODUZIONE..... | 8 |
| 1. OPERAZIONI PRELIMINARI ALL'ANALISI | 9 |
| 1.1. Nozioni di base sui difetti dell'alluminio | 9 |
| 1.2. Rilevamento quote in azienda | 10 |
| 1.3. Caratteristiche dei forni e modellazione CAD | 11 |
| 1.4. Software di simulazione utilizzati | 13 |
| 1.5. Materiale utilizzato..... | 14 |
| 2. SENSITIVITÀ, CREAZIONE ED OTTIMIZZAZIONE DELLA MESH..... | 15 |
| 2.1. Condizioni al contorno | 15 |
| 2.2. Sensitività della mesh..... | 18 |
| 2.3. Creazione della mesh..... | 20 |
| 3. CONFRONTO TRA LE GEOMETRIE..... | 23 |
| 3.1. Analisi del versamento: 750 kg in 40 s con 1500 kg interni | 26 |
| 3.2. Analisi del versamento: 750 kg in 40 s con 2250 kg interni | 34 |
| CONCLUSIONI..... | 41 |
| BIBLIOGRAFIA | 42 |

LISTA DELLE FIGURE

- Figura 1.1: Turbolenza superficiale del metallo liquido, pag. 9
- Figura 1.2: Porosità generate dalla presenza di bifilm, pag. 9
- Figura 1.3: Forno TEX² in esercizio, pag. 10
- Figura 1.4: Forno senza soletta inclinata ora dismesso, pag. 11
- Figura 1.5A: Sezione della zona di versamento con soletta inclinata, pag. 11
- Figura 1.5B: Sezione della zona di versamento senza soletta inclinata, pag. 11
- Figura 1.6: Disegni costruttivi del forno con canale di versamento verticale, pag. 12
- Figura 1.7: Disegni costruttivi del forno a soletta inclinata, pag. 13
- Figura 1.8: Composizione chimica della lega utilizzata, pag. 14
- Figura 2.1: Blocco di mesh della zona di versamento, pag. 15
- Figura 2.2: Blocco di mesh della zona centrale riscaldata, pag. 15
- Figura 2.3: Blocco di mesh della zona di spillamento, pag. 16
- Figura 2.4: Temperature delle varie zone dei forni, pag. 17
- Figura 2.5: Fonte di metallo utilizzata per la sensitività della mesh, pag. 17
- Figura 2.6: Volume d'aria intrappolata rispetto al tempo di versamento per le varie mesh studiate, pag. 18
- Figura 2.7: Energia cinetica media di massa del fluido rispetto al tempo di versamento per le varie mesh studiate, pag. 19
- Figura 2.8: Vista dall'alto della mesh completa ed evidenziazione dei mesh planes, pag. 20
- Figura 2.9: Volume d'aria intrappolata al variare del tempo di versamento per la mesh da 2 cm e per la mesh ottimizzata, pag. 21
- Figura 2.10: Energia cinetica media di massa rispetto al tempo di versamento per la mesh da 2 cm e per la mesh ottimizzata, pag. 21
- Figura 3.1: andamento della densità ricavata sperimentalmente, pag. 23
- Figura 3.2: modello CAD della siviera, pag. 24

Figura 3.3: Volume di controllo usato per lo studio della turbolenza nei forni, pag. 26

Figura 3.4: grafico energia cinetica turbolenta- tempo 1500-2250 kg, pag. 27

Figura 3.5: isosuperfici turbolenza inizio versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg, pag. 28

Figura 3.6: threshold turbolenza inizio versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg, pag. 29

Figura 3.7: isosuperfici turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg, pag. 29

Figura 3.8: threshold turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg, pag. 30

Figura 3.9: isosuperfici turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg, pag. 30

Figura 3.10: threshold turbolenza fine versamento con range ristretto per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg, pag. 31

Figura 3.11: Volume di controllo nella zona di prelievo del forno, pag. 32

Figura 3.12: Grafico dei difetti per il volume di controllo totale 1500-2250 kg, pag. 32

Figura 3.13: Grafico dei difetti nel volume inferiore del forno 1500-2250 kg, pag. 33

Figura 3.14: Grafico dei difetti sul volume superiore del forno 1500-2250 kg, pag. 33

Figura 3.15: grafico energia cinetica turbolenta rispetto al tempo 2250-3000 kg, pag. 34

Figura 3.16: isosuperfici turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000 kg, pag. 35

Figura 3.17: threshold turbolenza a inizio versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000kg, pag. 35

Figura 3.18: isosuperfici turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000 kg, pag. 36

Figura 3.19: threshold turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000kg, pag. 36

Figura 3.20: dettaglio isosuperfici turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000 kg, pag. 37

Figura 3.21: dettaglio threshold turbolenza a fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000kg, pag. 37

Figura 3.22: Grafico dei difetti per il volume di controllo totale 2250-3000 kg, pag. 38

Figura 3.23: Grafico dei difetti nel volume inferiore del forno 2250-3000 kg, pag. 39

Figura 3.24: Grafico dei difetti sul volume superiore del forno 2250-3000 kg, pag. 39

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1: Grandezza, numero di celle e tempo di elaborazione impiegato per le varie mesh studiate, pag. 20

Tabella 2: Grandezza, numero di celle e tempo di elaborazione impiegato per le mesh fini e per la mesh ottimizzata, pag. 22

INTRODUZIONE

La pressocolata è uno dei processi maggiormente utilizzati nel settore metallurgico: partendo dal forno fusorio in cui i pani di metallo, nel caso in esame alluminio, vengono fusi, il metallo viene trasportato mediante delle siviere verso i cosiddetti forni di attesa, dove viene posto per evitare una riduzione della temperatura aspettando di essere spillato per lo stampaggio dei prodotti finiti.

La qualità del metallo, la quale dovrà essere la migliore possibile e non dovrà subire decadimenti durante tutte le fasi del processo, assume, quindi, un aspetto di fondamentale importanza per l'ottenimento di prodotti finiti di elevata fattura. Conseguentemente a ciò, lo studio dell'andamento della qualità lungo tutto il processo e la ricerca di metodi per assicurare che essa non si riduca assume una rilevanza sempre maggiore, anche per il fatto che gli standard di qualità sono in continua crescita.

Questo lavoro è nato dalla richiesta di un'azienda di pressocolata, EdIM S.p.A, di fare delle analisi sulla qualità dell'alluminio in una specifica fase del processo di pressocolata, ovvero lo stazionamento del metallo nei forni di attesa.

Questa fase è forse la parte più delicata di tutto il processo in quanto l'alluminio, che già in siviera ha subito un degasaggio per ridurre la presenza di scorie, una volta versato nel forno, non ha più possibilità di essere trattato per aumentarne la qualità. È quindi fondamentale che, nel passaggio da siviera a forno e nel successivo stazionamento all'interno dello stesso, quest'ultima subisca un decadimento che sia il minore possibile per non pregiudicare il prodotto finito che nascerà in seguito.

1. OPERAZIONI PRELIMINARI ALL'ANALISI

1.1. Nozioni di base sui difetti dell'alluminio

Durante la fase di versamento del metallo liquido dalla siviera al forno di attesa si possono formare dei difetti all'interno del materiale pregiudicano la qualità del metallo stesso e quindi dei pezzi che verranno creati.

Quando l'alluminio liquido è esposto in atmosfera, l'aria presente nell'ambiente reagisce con esso e lo va ad ossidare sulla superficie. Se il moto del metallo è turbolento, il suo movimento porta questi ossidi superficiali a venir intrappolati all'interno del bagno liquido assieme anche ad una parte di aria come mostra la "Figura 1.1" [1]. Questi difetti vengono chiamati "bifilm".

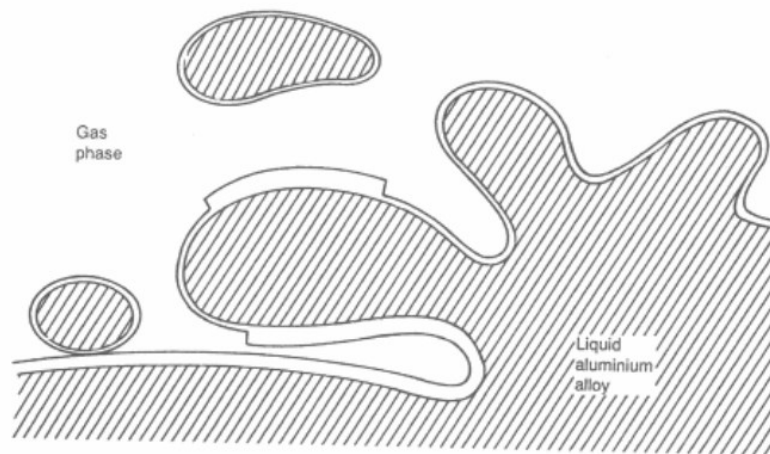


Figura 1.1: Turbolenza superficiale del metallo liquido

È stato dimostrato che i bifilm non creano problemi alla qualità del metallo quando esso è in fase liquida, tuttavia, in fase di solidificazione, questi vanno a generare delle porosità non trascurabili all'interno del pezzo stesso come mostrato in "Figura 1.2" [1].



Figura 1.2: Porosità generate dalla presenza di bifilm

Ciò è dovuto al fatto che l'idrogeno presente nell'aria che viene intrappolata può diffondere ed iniziare ad espandere con poca difficoltà il bifilm per generare un poro [1].

Per verificare e quantificare la presenza del bifilm all'interno della massa liquida, si possono effettuare dei test come il "Reduced Pressure Test (RPT), che prevede di prelevare dei provini di metallo liquido dalla massa e farli solidificare a una pressione pari a un centesimo di quella atmosferica, portando quindi le porosità ad ingrandirsi di cento volte. Una volta solidificati, i provini vengono sezionati e lucidati, per poi fare le successive analisi sulle lunghezze dei bifilm, per valutare la qualità del metallo attraverso un parametro chiamato "Bifilm Index" [2].

1.2. Rilevamento quote in azienda

Al fine di modellare correttamente i due forni d'attesa è stata svolta una giornata presso l'azienda di pressocolata EDiM di Quero (BL).

Questa fase iniziale del progetto è stata di fondamentale importanza, poiché tutti gli studi e le simulazioni numeriche eseguite successivamente dipendono dalle geometrie interne dei forni, le cui dimensioni sono state misurate manualmente.

I forni in esame sono entrambi di marca "Marconi", ma con geometrie diverse: il primo modello, un TEX² con soletta inclinata di versamento, era in funzione, come si vede in "Figura 1.3", mentre il secondo modello, senza soletta inclinata, era stato dismesso come si vede in "Figura 1.4".

La rilevazione delle quote del forno dismesso è stata semplice e veloce mentre per quanto riguarda il TEX², viste le alte temperature d'esercizio, è stato necessario l'aiuto di un operatore. Tutte le operazioni di quotatura sono state svolte in sicurezza sotto diretto controllo del supervisore e dei correlatori.



Figura 1.3: Forno TEX² in esercizio



Figura 1.4: forno senza soletta inclinata ora dismesso

1.3. Caratteristiche dei forni e modellazione CAD

In azienda sono presenti due tipologie di forni d’attesa: a soletta inclinata e a soletta non inclinata, entrambi aventi una capacità di lega liquida di 3000 kg [2].

I forni sono divisi in tre zone: una zona di versamento dove, attraverso l’uso di una siviera, viene caricato il metallo liquido proveniente dai forni fusori, una zona centrale dove sono presenti gli elementi riscaldanti e una zona di estrazione del metallo liquido dove viene effettuato il prelievo per il rifornimento della pressa per la pressocolata.

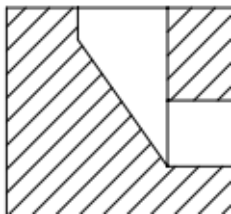


Figura 1.5A: sezione della zona di versamento con soletta inclinata

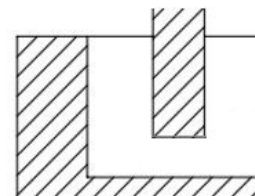


Figura 1.5B: sezione della zona di versamento senza soletta inclinata

Entrambi i forni hanno lo stesso principio di funzionamento: ci sono sei elementi riscaldanti che sfruttano l’induzione per mantenere a temperatura la lega di alluminio ed un doppio setto per separare le zona di versamento e prelievo dalla vasca interna. Il guscio esterno è realizzato in acciaio e il materiale refrattario interno è lo stesso per entrambi. Le differenze sostanziali risiedono pertanto nella zona di versamento, come mostrato in “Figura 1.5A” e “Figura 1.5B”.

Della geometria dei forni e della siviera sono stati realizzati dei modelli CAD mediante il software di modellazione “Autodesk Fusion 360”, i quali saranno necessari per la buona riuscita delle simulazioni

fluidodinamiche. In fase di modellazione ci si è accorti che le dimensioni prese per il forno a soletta inclinata (quello in esercizio al momento delle misurazioni) portavano ad una capacità interna del forno leggermente inferiore ai 3000 kg che realmente dovrebbe contenere. Essendo certi della correttezza delle quote nella zona di versamento e della zona centrale contenente gli elementi riscaldanti, è stata modificata la zona di spillamento, essendo la zona più lontana dal punto di versamento. La variazione consiste nella modifica della geometria da forma trapezoidale a rettangolare, non alterando la lunghezza complessiva della vasca.

Onde evitare possibili variazioni dei risultati dovute alla geometria della parte finale, la stessa cosa è stata fatta anche per l'altro forno.

In “Figura 1.6” e “Figura 1.7” sono riportati gli schemi quotati dei forni considerati.

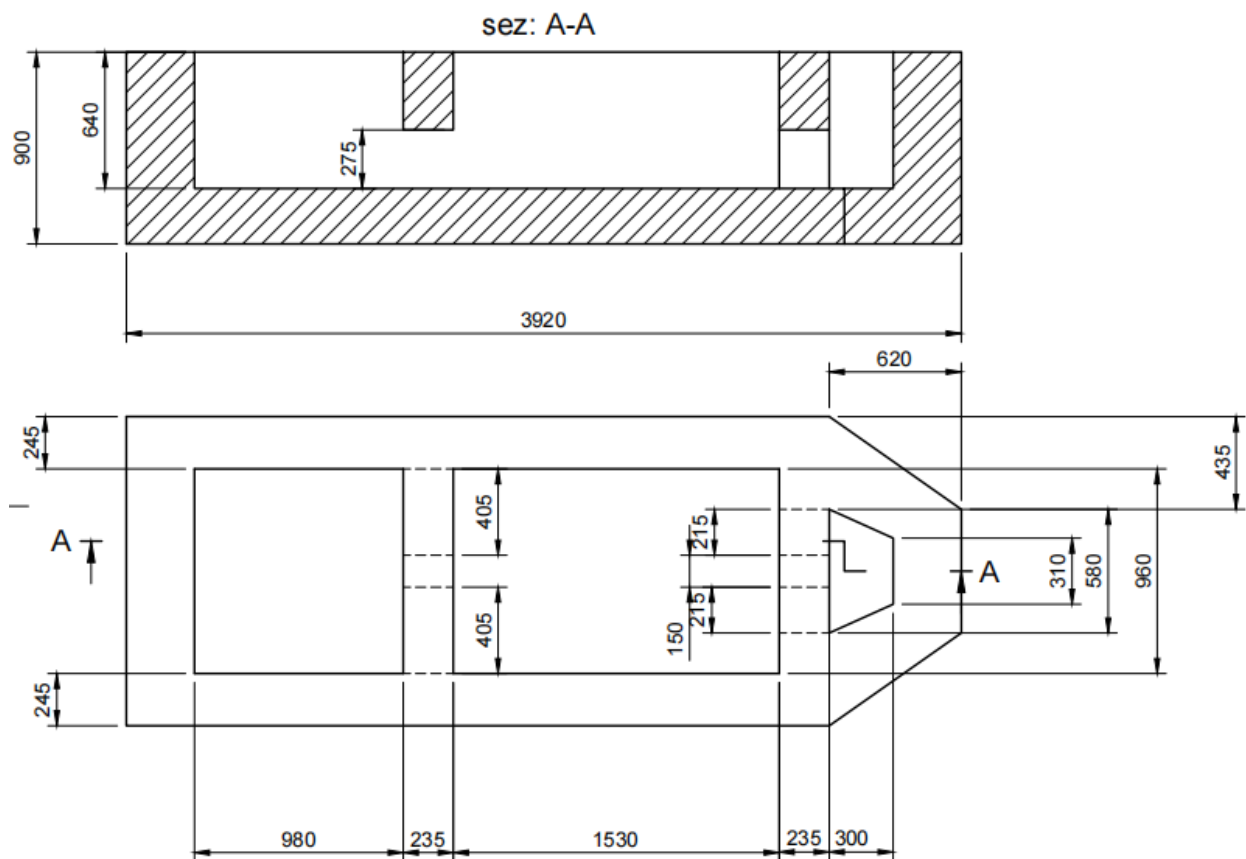


Figura 1.6: Disegni costruttivi del forno con canale di versamento verticale

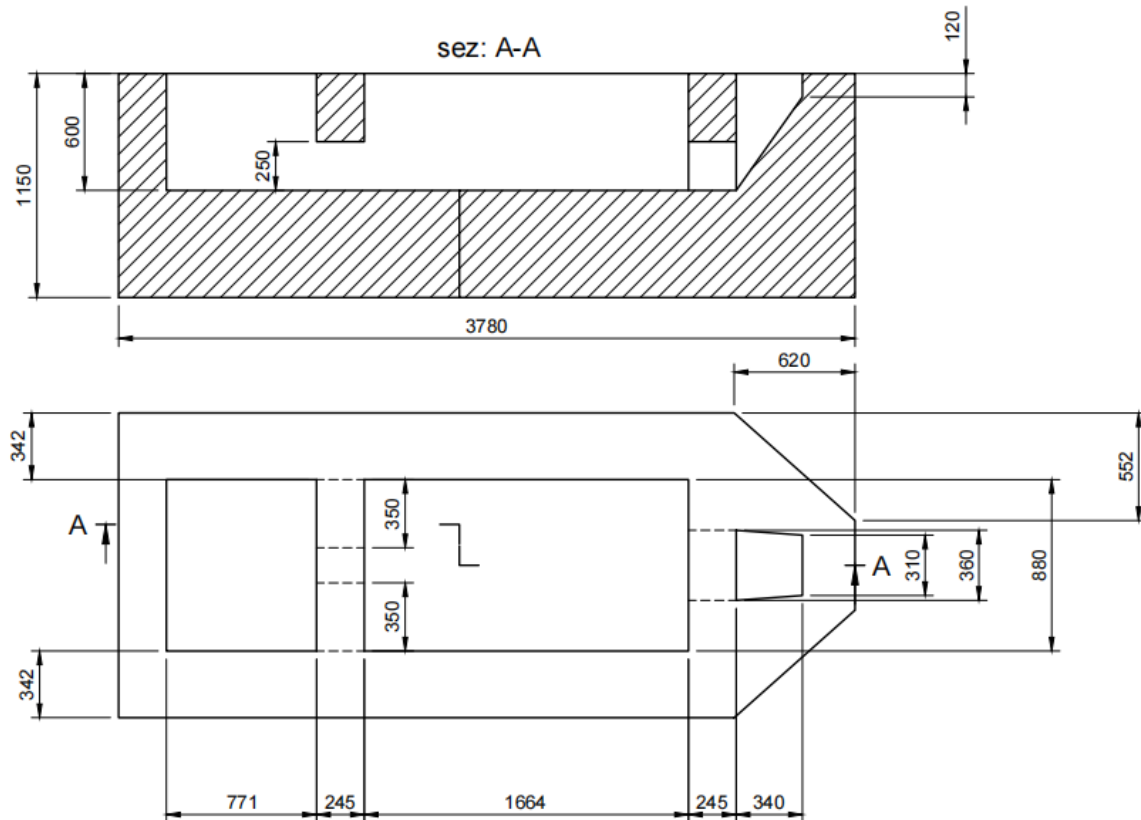


Figura 1.7: Disegni costruttivi del forno a soletta inclinata

1.4. Software di simulazione utilizzati

Per lo studio dei vari casi sono stati utilizzati i software CDF Flow-3D Cast e Flow-3D Post: il primo per la simulazione e la risoluzione di flussi su superfici libere, mentre il secondo per la visualizzazione dei risultati.

Ultimamente i software CFD sono diventati uno strumento essenziale per lo studio e l'ottimizzazione dei processi industriali e per la risoluzione di problemi. Lo scopo principale della ricerca, infatti, era quello di focalizzarsi sull'analisi delle quantità di ossidi presenti nei forni, mettendo a confronto le due quantità presenti nei forni a geometria diversa.

Lo sviluppo del trascinamento dei bifilm all'interno della colata è ancora in fase di sviluppo. Nonostante ciò, quello che viene offerto da Flow-3D è una delle opzioni più valide attualmente presenti sul mercato. I software confrontano la superficie istantanea con la superficie libera minima prevista se lo stampo si fosse riempito in modo perfetto. Se sulla superficie istantanea c'è presenza di ossido viene inserito un valore scalare. Se non è presente l'ossido invece non viene attribuito il valore. Questa tecnica è la più diffusa nell'ambito dei software CFD per il settore della colata, ed è anche quella rivelatasi più efficiente.

Flow-3D inoltre utilizza criteri di logica booleana per lo studio dei difetti e il relativo trascinarsi di essi nel metallo fuso, e li implementa in tre dimensioni. In questo modo vengono identificati tutti i meccanismi di trascinarsi e identificati individualmente; ciò fa del software una delle migliori alternative presenti sul commercio [3].

Flow-3D Cast offre un'ampia gamma di casistiche di colata che possono essere simulate. Nel caso in esame è stato utilizzato il processo di colata per gravità. L'alluminio, infatti, viene versato all'interno del forno proprio con l'aiuto della forza di gravità. In questo processo sono disponibili poi quattro sottoprocessi: il "Thermal die cycling" che simula il ciclo termico della colata, il "Filling", il quale si occupa del versamento del metallo nello stampo, il "Solidification" che mostra la solidificazione del metallo all'interno dello stampo e il "Cooling" che simula il raffreddamento.

Di questi si è fatto uso, esclusivamente, del "Filling" in quanto l'idea che sta alla base è immaginare il forno come uno stampo che accoglierà l'alluminio liquido versato dalla siviera.

1.5. Materiale utilizzato

Il metallo utilizzato in azienda su cui si è deciso di lavorare è la lega di alluminio EN AC-46000, identificata anche come $AlSi9Cu3(Fe)$ a cui viene aggiunta una certa quantità di stronzio (Sr) [2]. Nel database dei metalli presenti in Flow-3D Cast, tuttavia, questa specifica lega non è presente. Il software permette la creazione di una lega personalizzata quindi, prendendo come base la lega A380 del database, si è proceduto a modificare le percentuali di elementi di lega facendo riferimento a studi precedenti in cui viene riportata l'analisi chimica del materiale specifico che viene utilizzato in azienda [2]. La composizione chimica è riportata in "Figura 1.8". Attraverso, poi, il programma "JMatPro" sono state ricercate altre proprietà specifiche della lega come la densità e la viscosità.



| Alloy composition | |
|--|-----------|
| Base alloy | Aluminium |
| Weight percentages of alloying elements: | |
| Silicon | 9,16 |
| Copper | 2,36 |
| Magnesium | 0,12 |
| Manganese | 0,23 |
| Iron | 1,15 |
| Zinc | 0,87 |

Figura 1.8: composizione chimica della lega utilizzata

2. SENSITIVITÀ, CREAZIONE ED OTTIMIZZAZIONE DELLA MESH

2.1. Condizioni al contorno

Visto che le varie zone del forno sono sottoposte a condizioni al contorno differenti si è deciso di creare tre blocchi di mesh collegati tra loro per far fronte alle diverse esigenze di ogni zona. Il primo blocco copre la zona di versamento (in “Figura 2.1”).

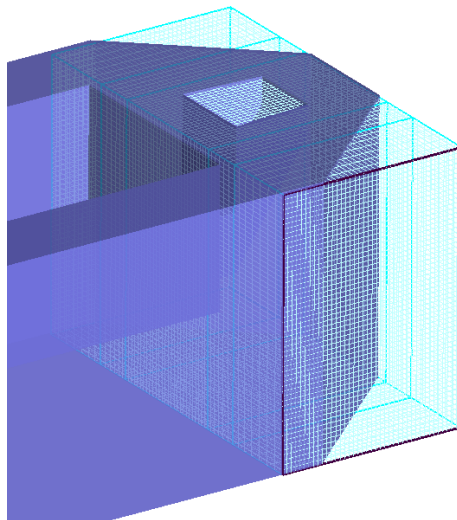


Figura 2.1: Blocco di mesh della zona di versamento

Il secondo blocco serve per la parte centrale del forno (in “Figura 2.2”).

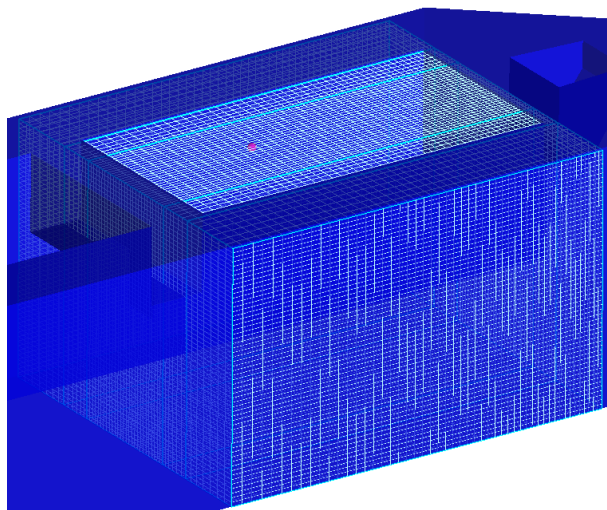


Figura 2.2: Blocco di mesh della zona centrale

Il terzo e ultimo blocco copre la zona di spillamento (in “Figura 2.3”).

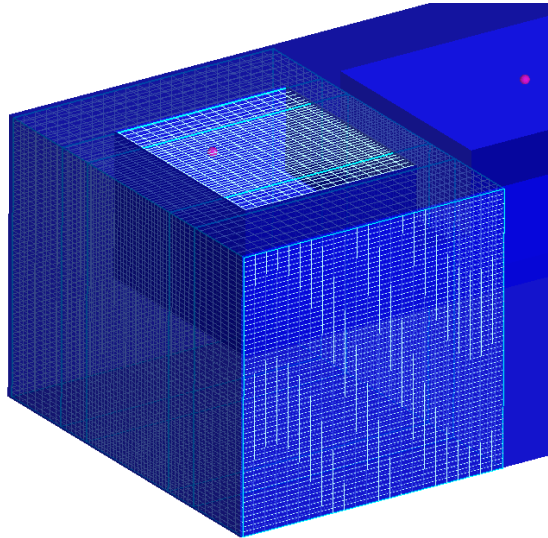


Figura 2.3: Blocco di mesh della zona di spillamento

La temperatura a cui sono state impostate le pareti del forno è stata scelta riprendendo la stessa che viene impostata in azienda durante l’esercizio. Secondo analisi sperimentali precedenti svolte sugli stessi forni questa temperatura è pari a 680°C [2].

Per quanto riguarda la temperatura dell’aria con cui il metallo entra in contatto durante la sua permanenza all’interno del forno è necessario distinguere due casi:

- Zona di versamento e di spillamento: in queste zone il metallo risulta a contatto con aria a temperatura ambiente. È stata scelta un valore classico di temperatura pari a 25°C
- Zona centrale: questa zona è quella in cui sono presenti i resistori per il mantenimento del metallo ad alta temperatura. In realtà questa zona possiede una copertura dove appunto sono inseriti i resistori; tuttavia, si è scelto per semplicità di evitare di inserire il coperchio e porre direttamente l’aria a contatto con il metallo alla stessa temperatura delle pareti, quindi 680°C.

Un’immagine esplicitiva di ciò è la “Figura 2.4”.

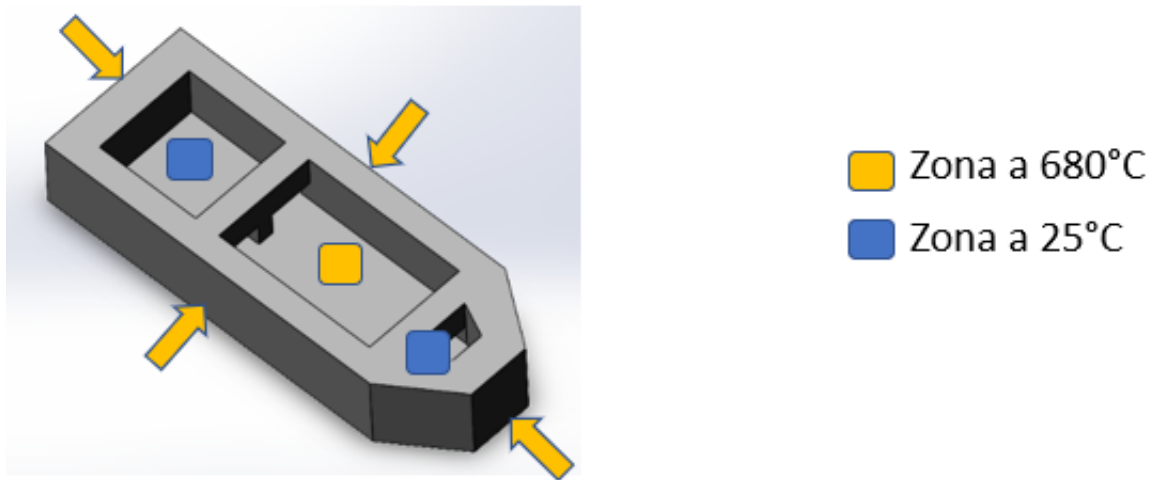


Figura 2.4: Temperature delle varie zone dei forni

Per queste simulazioni è stata creata una semplice fonte di metallo di forma ellissoidale per riprendere la forma del flusso di liquido che viene versato nella realtà, mostrata in “Figura 2.5”. Questa versa all’interno del forno una portata di massa di 18.75 kg/s di metallo per 40 secondi (750 kg totali). Essa è stata posta al centro della zona di versamento, lungo l’asse di simmetria e ad un’altezza di qualche millimetro inferiore alla faccia superiore della mesh per massimizzare il salto che il metallo deve compiere. Inoltre si è deciso di lavorare in condizioni di forno vuoto. Infine si è controllato che, durante la simulazione, la perdita di materiale dovuta agli errori durante la simulazione non superasse mai il 1%, situazione che si è sempre evitata durante tutte le elaborazioni.

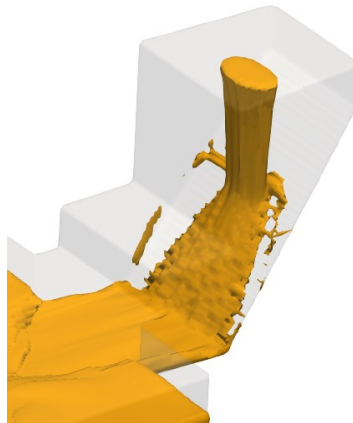


Figura 2.5: fonte di metallo utilizzata per la sensitività della mesh

2.2. Sensitività della mesh

La sensitività della mesh è un processo che è necessario compiere prima della creazione della mesh finale per capire quale può essere la dimensione minima accettabile delle celle che la dovranno comporre.

Utilizzando come modello il forno con soletta inclinata si è proceduto a creare varie mesh con dimensioni delle celle via via sempre più piccole: 5 cm, 4 cm, 3 cm, 2 cm, 1.8 cm. Attraverso le simulazioni fatte per ciascuna mesh sono state considerate alcune variabili, che il software permette di analizzare, come indice della bontà della mesh. Tra queste: “Entrained air volume” e “Mass-averaged fluid mean kinetic energy”.

È doveroso dare una definizione di ciascuna di queste variabili:

- Entrained air volume [m^3]: parametro che misura il volume di aria intrappolata all’interno del bagno. Esso aumenterà nel tempo visto che il metallo all’interno della vasca ha un comportamento di tipo turbolento durante la fase di versamento.
- Mass averaged kinetic energy [J/kg]: energia che il fluido possiede a causa del proprio movimento misurata per unità di massa [4]. Ci si aspetta quindi che essa si riduca col passare del tempo visto che la massa di liquido all’interno della vasca aumenta sempre più.

Successivamente, è stata fatta un’extrapolazione dei dati delle simulazioni lanciate e li si è inseriti all’interno di un foglio Excel, ottenendo dei grafici che mostrano l’andamento delle variabili considerate in funzione del tempo di versamento.

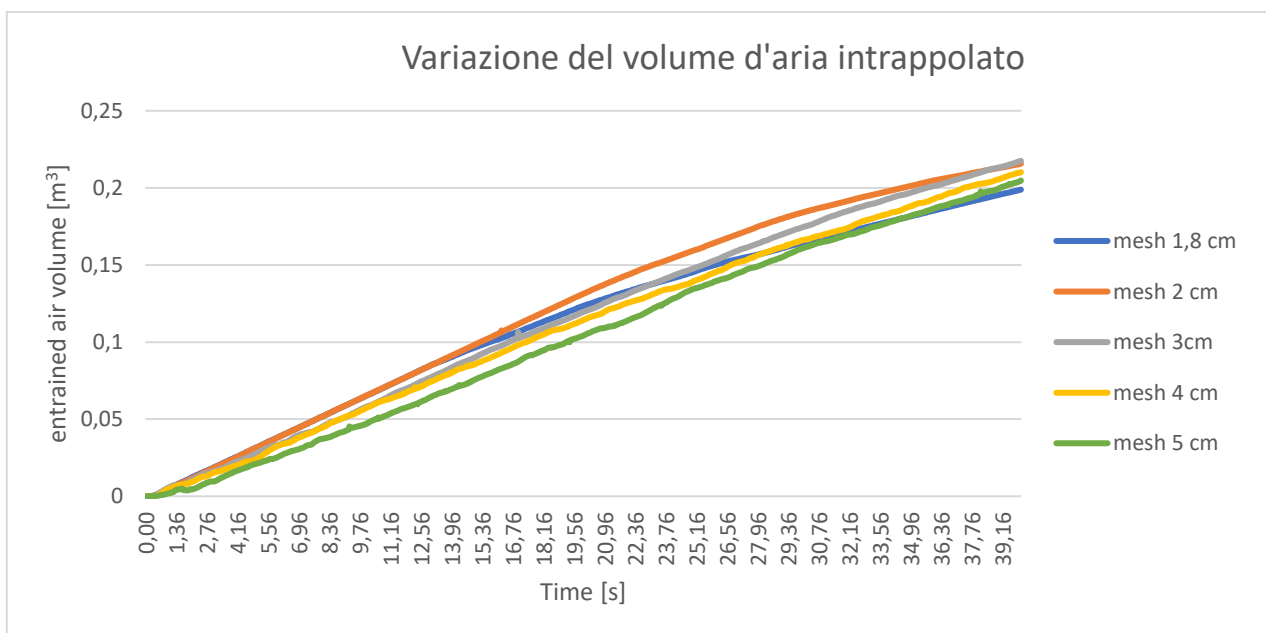


Figura 2.6: Volume d'aria intrappolata rispetto al tempo di versamento per le varie mesh studiate

Parlando di volume d'aria intrappolata in “Figura 2.6” si può vedere come tutte le mesh considerate presentino un comportamento simile. Tutte, infatti arrivano alla fine del tempo di versamento (40 s) in cui il volume d'aria intrappolata risulta circa pari a $0,2 \text{ m}^3$ con un comportamento pressoché lineare.

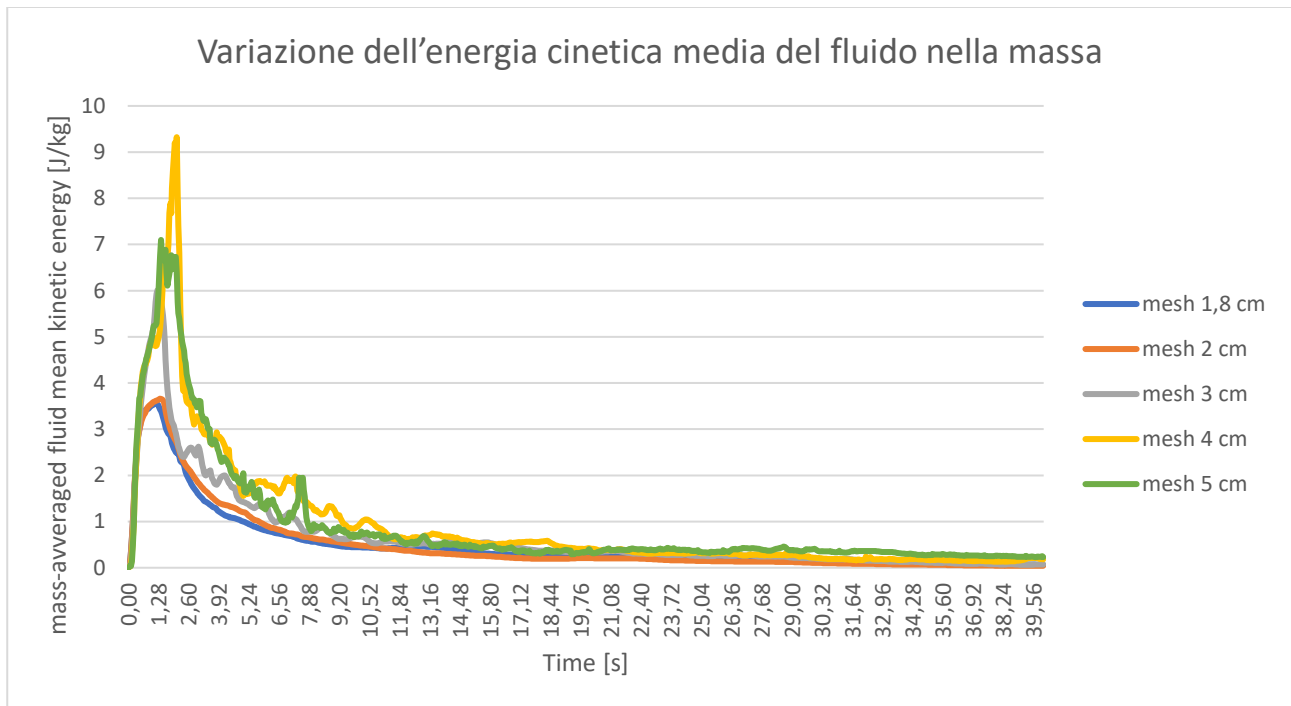


Figura 2.7: Energia cinetica media di massa del fluido al variare del tempo di versamento per le varie mesh studiate

La stessa storia si ripete nel secondo grafico, in “Figura 2.7”. In questo caso però si nota una sostanziale differenza guardando il picco iniziale. Le mesh più fini, infatti presentano un picco massimo abbastanza simile tra di loro, mentre, più le dimensioni delle celle aumentano, più l'entità del picco è maggiore. Questo è un segnale che le mesh da tenere maggiormente in considerazione sono quelle da 2 cm e da 1.8 cm. Dopo il picco si vede che tutte arrivano a convergere verso gli stessi valori.

Per ponderare ancora meglio la scelta si è deciso di tenere conto anche del numero di celle e del tempo di elaborazione di ciascuna mesh. Questi parametri sono riportati in “Tabella 1”. Si nota che al ridursi della grandezza delle celle si ha un maggior numero di celle e, parallelamente, un tempo di elaborazione maggiore. Si vede inoltre come, passando da una dimensione 2 cm a 1.8 cm, il tempo impiegato per completare la simulazione cresce vertiginosamente. La scelta finale per la grandezza minima delle celle è ricaduta sulla mesh da 2 cm essendo il miglior compromesso tra precisione dei risultati e tempo di elaborazione.

| GRANDEZZA CELLE [cm] | NUMERO DI CELLE [-] | TEMPO IMPIEGATO [min] |
|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 1.8 | 1119195 | 172 |
| 2 | 857280 | 100 |
| 3 | 248976 | 26 |
| 4 | 100016 | 16 |
| 5 | 53475 | 13 |

Tabella 1: grandezza, numero di celle e tempo di elaborazione impiegato per le varie mesh studiate

2.3. Creazione della mesh

Per la creazione della mesh si è fatto affidamento al modello di forno con soletta inclinata.

Una volta capito quale dimensione delle celle utilizzare per la mesh si è cercato di ottimizzarla per cercare di ridurre il numero di celle presenti e quindi ridurre il tempo per processare la simulazione.

Partendo quindi dalla mesh con dimensioni delle celle pari a 2 cm sono stati inseriti dei “mesh planes” per fare in modo che, esternamente alla vasca di contenimento del metallo, le celle possano leggermente stirarsi, passando così da una forma quadrata ad una rettangolare al fine di ridurre il numero. Ne sono stati inseriti 4 parallelamente al lato lungo del forno (in giallo) e 2 perpendicolarmente allo stesso (in arancione), come mostrato in “Figura 2.8” Inoltre si deve tenere presente che è stata applicata una “regola” finalizzata alla realizzazione di una buona mesh in Flow-3D ovvero che i rapporti tra le dimensioni delle celle (lato lungo, lato corto e altezza) non devono mai superare 3.

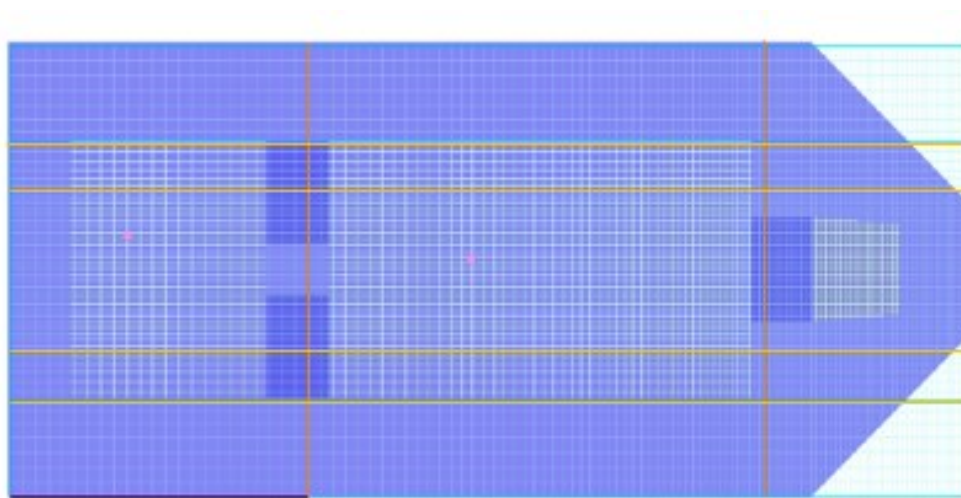


Figura 2.8: vista dall'alto della mesh completa ed evidenziazione dei mesh planes

Per verificare che la mesh sia stata fatta correttamente è stata ripetuta la procedura già vista sopra utilizzando gli stessi parametri per capire se c'è una corrispondenza dei dati ricavati dalla mesh ottimizzata con quelli della mesh da 1.8 cm e 2 cm.

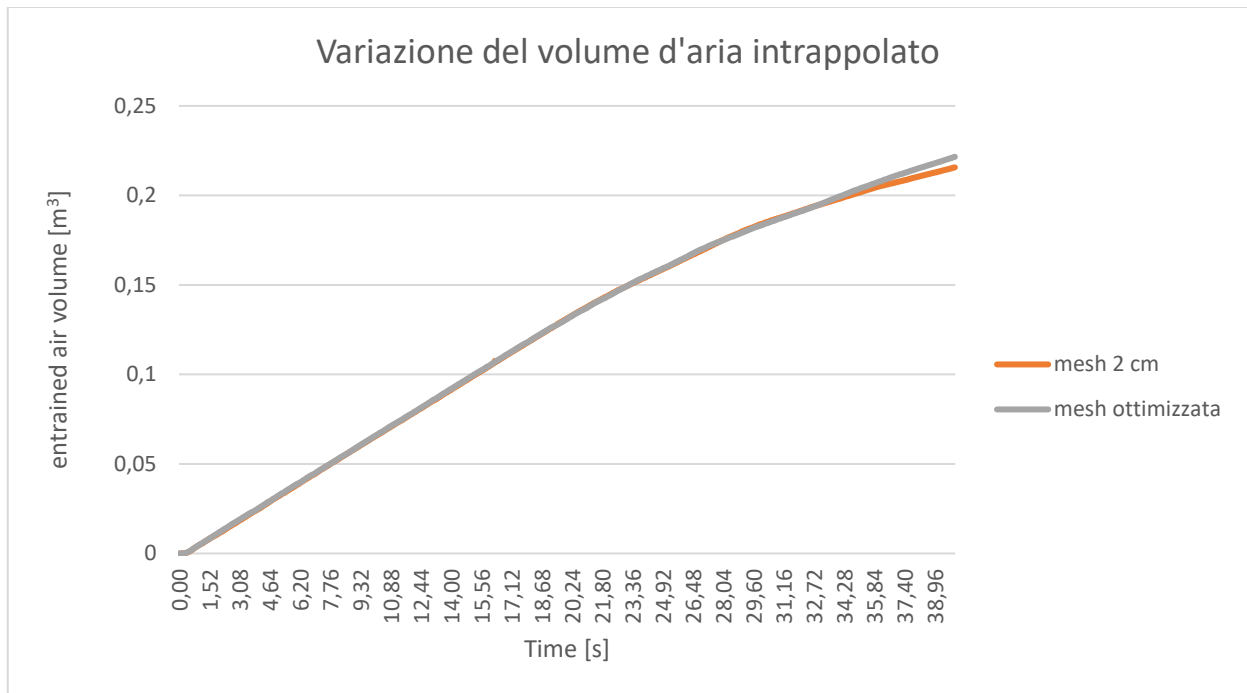


Figura 2.9: volume d'aria intrappolata al variare del tempo di versamento per la mesh da 2 cm e per la mesh ottimizzata

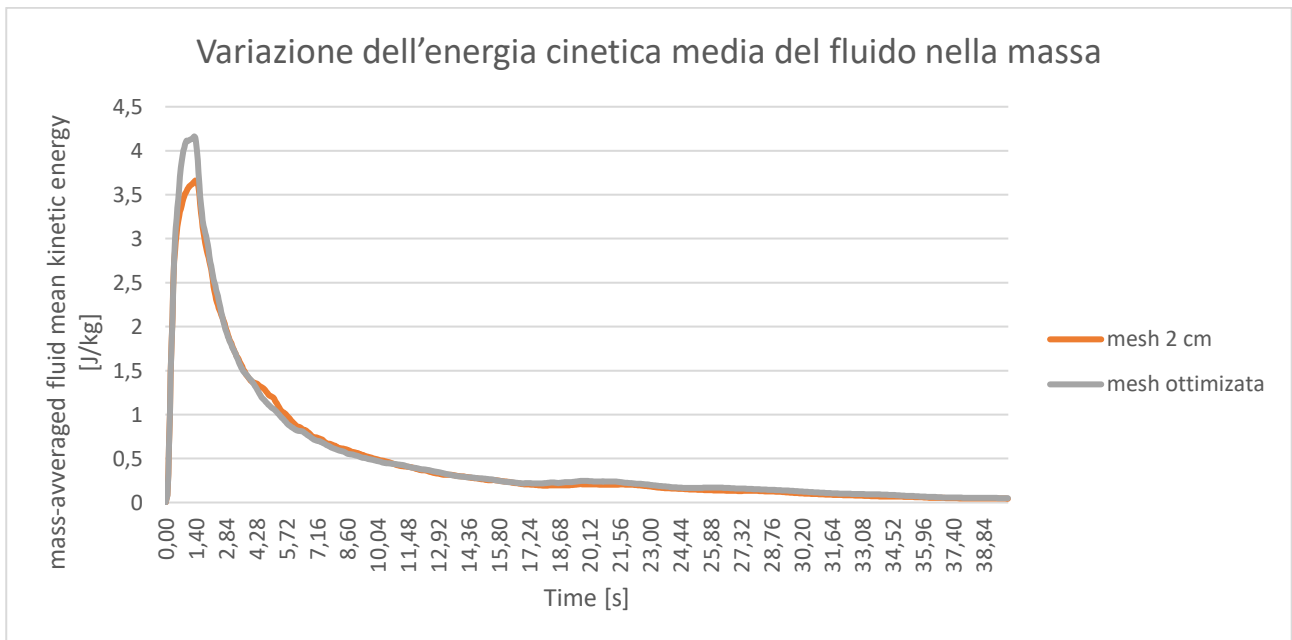


Figura 2.10: energia cinetica media di massa al variare del tempo di versamento per la mesh da 2 cm e per la mesh ottimizzata

Come si può vedere dai grafici in “Figura 2.9, 2.10”, i risultati della mesh ottimizzata sono in linea con quelli della mesh da 2 cm senza modifiche. In particolare si può notare che l’andamento del volume d’aria intrappolata nella mesh ottimizzata ricalca molto fedelmente quello della mesh “pura”.

Per quanto riguarda l'energia cinetica media si nota che il picco iniziale è leggermente maggiore per la mesh ottimizzata. Questo può essere attribuito al fatto che il calcolo fatto su celle leggermente più grandi e di forma non cubica ha portato ad un leggero aumento degli errori. Si nota però che, per il resto del tempo, il grafico è in linea con quello della mesh da 2 cm. Complessivamente, quindi, si può dire che la mesh creata risulta buona.

In “Tabella 2” viene infine riportato il numero di celle in confronto alle mesh con dimensioni costanti. Si nota qui, come già detto, una riduzione significativa (quasi due terzi in meno) delle celle complessive che la simulazione deve elaborare, portando a un drastico miglioramento dei tempi di processo, che si riducono di più della metà.

| DIMENSIONE CELLE [cm] | NUMERO DI CELLE [-] | TEMPO IMPIEGATO [min] |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 1.8 | 1119195 | 172 |
| 2 | 857280 | 100 |
| 2 ottimizzata | 344394 | 42 |

Tabella 2: grandezza, numero di celle e tempo di elaborazione impiegato per le mesh fini e per la mesh ottimizzata

3. CONFRONTO TRA LE GEOMETRIE

Prima di iniziare il confronto tra le due geometrie dei forni per capire quale delle due opzioni risulta la più valida in termini di qualità dell'alluminio è bene ricordare i risultati dell'analisi sperimentale eseguita dall'Ing. Nicolasi Federico.

Nella precedente ricerca si è andati ad analizzare la qualità del metallo presente nei forni per circa tre mesi, prelevando dei campioni sempre nella stessa fascia oraria e solo nei giorni lavorativi [2].

Il parametro adottato per il confronto è la densità, misurata tramite pesata archimedeica.

Si è notato che per tutto l'arco temporale di campionamento la densità del metallo proveniente dal forno con soletta inclinata (in blu) risultava sempre maggiore rispetto a quella dell'alluminio proveniente dal forno senza soletta (in rosso). Questo significava quindi che la qualità dell'alluminio nel primo forno era migliore a causa della minor presenza di impurezze che abbassavano i valori di densità. Il grafico utilizzato per queste analisi è stato riportato in "Figura 3.1" [2].

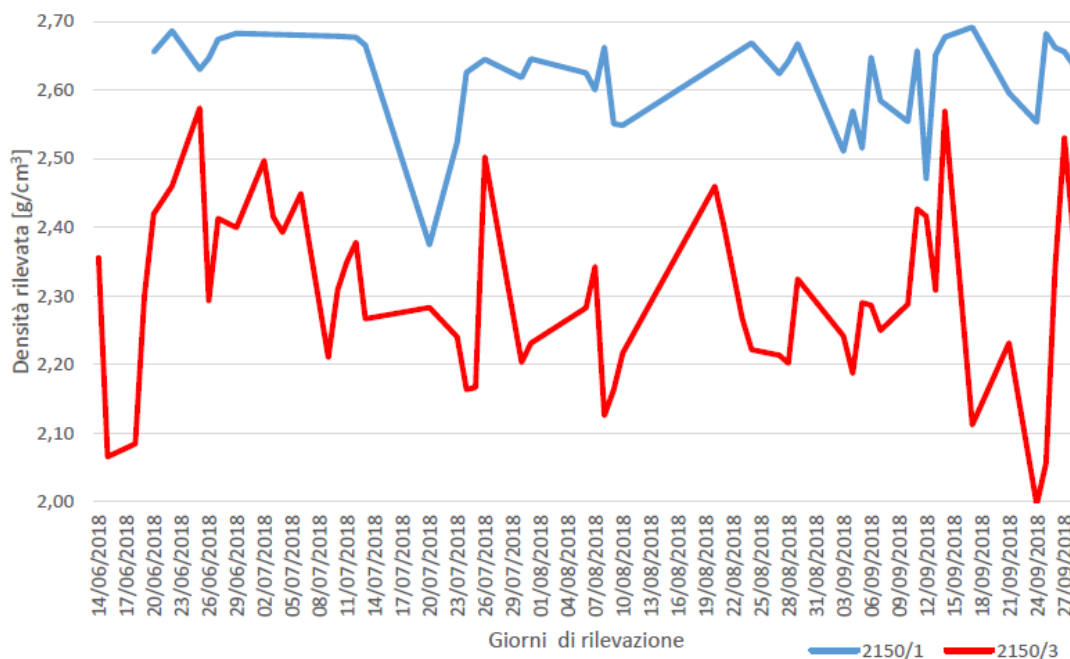


Figura 3.1: andamento della densità ricavata sperimentalmente

Cercare di ottenere un grafico simile in modo da fare un confronto diretto risulta pressoché impossibile, sia a causa dell'elevata numerosità dei prelievi (36 differenti simulazioni per forno) sia per la mancanza di informazioni sul livello effettivo dei forni. Inoltre, il software utilizzato non mette a disposizione la possibilità di valutare la densità in termini di difetti contenuti nel metallo.

L'unico parametro certo è che il livello del metallo durante i prelievi non è mai sceso sotto la soglia dei 1500 kg. Tutte le casistiche che verranno simulate, pertanto, avranno un livello minimo di metallo nei forni pari a 1500 kg, al fine di ottenere una corretta validazione dei risultati sperimentali.

La tesi finale che è stata messa in luce da queste analisi è che il forno a soletta inclinata, mostrando una densità dei provini sempre maggiore rispetto al forno concorrente, porta ad una qualità dell'alluminio maggiore e, parallelamente, a una quantità di difetti presenti nel bagno minore. Su questo ci si baserà per andare a validare il modello numerico presentato in questo lavoro di tesi.

Al termine dell'analisi dei risultati di ogni caso che verrà esposto, si procederà alla validazione di ciò che è stato esposto confrontandolo con i risultati finali emersi dalla sperimentazione in azienda.

Per svolgere le simulazioni inizialmente si era pensato di utilizzare il modello della siviera presente in azienda, di capacità 750 kg, in modo da cercare di rendere il più reale possibile l'operazione di colata.

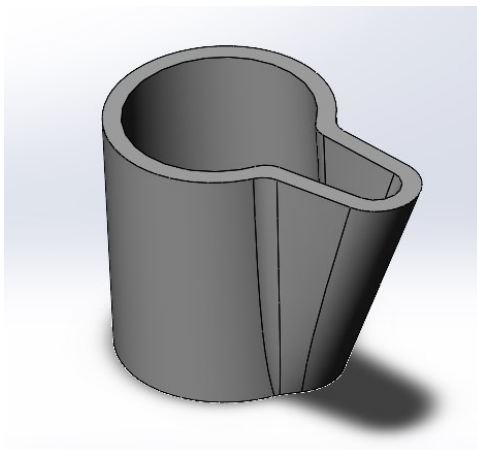


Figura 3.2: modello CAD della siviera

Le simulazioni impostate in questo modo, tuttavia, necessitavano di un lasso di tempo di elaborazione troppo grande rispetto alle tempistiche previste (tre giorni per singola elaborazione). Per velocizzare il processo si è deciso, quindi, di utilizzare lo stesso inlet già usato nel capitolo 2, ma rialzato di 25 cm (quota ottenuta tramite valutazioni semi-qualitative) in modo da simulare la caduta del metallo dalla siviera.

Il confronto è stato fatto versando all'interno del forno una quantità di metallo pari a 750 kg in 40 s (stessa quantità usata per la sensitività della mesh) e lasciandolo poi a riposare per i successivi 30 minuti, tempistica simile al tempo di riposo tra un versamento e l'altro effettuato in azienda.

Questo processo è stato ripetuto due volte in modo da coprire l'intero arco di utilizzo del forno in servizio (da 1500 kg a 3000 kg). I casi studio saranno quindi:

- Versamento di 750 kg in 40 s con 1500 kg di metallo presente nel forno
- Versamento di 750 kg in 40 s con 2250 kg di metallo presente nel forno

Successivamente, per ogni caso studiato, sono stati analizzati e confrontati due parametri fondamentali correlati alla qualità del metallo, rispettivamente nell'ordine:

- Energia Cinetica Turbolenta: è definita come l'energia cinetica media per unità di massa associata ai vortici del flusso turbolento, cioè:

$$k = \frac{1}{2} \cdot (\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2})$$

Con:

- k : energia cinetica turbolenta;
- u' , v' , w' : componenti della velocità turbolenta, intesi come la differenza tra velocità istantanea e velocità media nelle varie direzioni [5].

Questo parametro, strettamente correlato alla formazione di ossidi e bifilm, sarà analizzato per capire quale dei due forni presenta le condizioni di minor turbolenza. Verranno accostati diagrammi “energia cinetica turbolenta-tempo” a rappresentazioni grafiche ottenute tramite volumi di controllo. Lo studio dell'energia cinetica turbolenta sarà localizzato alla zona di versamento in quanto una visione globale su tutto il volume del forno non darebbe risultati accurati.

- I difetti sono un parametro di fondamentale importanza in quanto una bassa concentrazione di essi comporta proprietà meccaniche eccellenti sul prodotto finito. Al contrario un materiale ricco di ossidi o porosità porta ad un prodotto finale dalle basse proprietà meccaniche, che spesso non rispecchiano i requisiti minimi imposti dal costruttore. Il software mette a disposizione un parametro, la “Free Surface Defect Concentration” (FSDC), che permette di stimare la concentrazione dei difetti all'interno del bagno. Esso viene ricavato dall'analisi della turbolenza superficiale. Il programma inoltre accumula la quantità di difetti, dall'inizio della simulazione alla fine, con un coefficiente chiamato “Defect generation rate” espresso in $[MT^{-1}L^{-2}]$. Partendo dalla turbolenza superficiale e dal sopra citato parametro il software ricava la “FSDC”, e utilizzando dei coefficienti correttivi gli associa un'unità di misura in $[kg/m^3]$.

Si utilizzeranno intervalli temporali differenti per lo studio dei sopra citati parametri: l'energia cinetica turbolenta verrà analizzata in un arco di 45 s per avere dei risultati grafici migliori, mentre la “FSDC” in 30 minuti. Poiché la turbolenza si smorza già dopo pochi istanti dal termine del

versamento, non ha senso studiarne l'andamento in un lasso temporale così elevato. La "FSDC" continua invece ad aumentare, come detto in precedenza.

È necessario fare una considerazione riguardo al metallo già presente nel forno all'istante di inizio versamento. Il software considera questa quantità come metallo pulito, tuttavia, nella realtà, il metallo presente durante il regime di esercizio del forno è già contaminato dalle impurità che si formano durante la sua permanenza anteriore all'istante di inizio analisi.

Questa semplificazione, nel caso in esame, è accettabile perché in questo modo si garantisce una condizione di uniformità necessaria per le considerazioni che saranno fatte.

3.1. Analisi del versamento: 750 kg in 40 s con 1500 kg interni

In questa prima analisi si va a considerare il versamento che porta la quantità di metallo contenuta nel forno da 1500 kg a 2250 kg.

Il primo parametro che si può analizzare è l'energia cinetica turbolenta. Per il grafico successivo e per tutte le immagini seguenti appartenenti allo studio della turbolenza si farà riferimento a un volume di controllo posto nella parte iniziale del forno, di altezza pari all'altezza utile della vasca e sporgente di 15 cm dalla parete di sinistra indicata in figura. E' stata fatta questa scelta per avere risultati più accurati, essendo questa la zona interessata dal versamento e quella in cui si ha la generazione dei difetti.

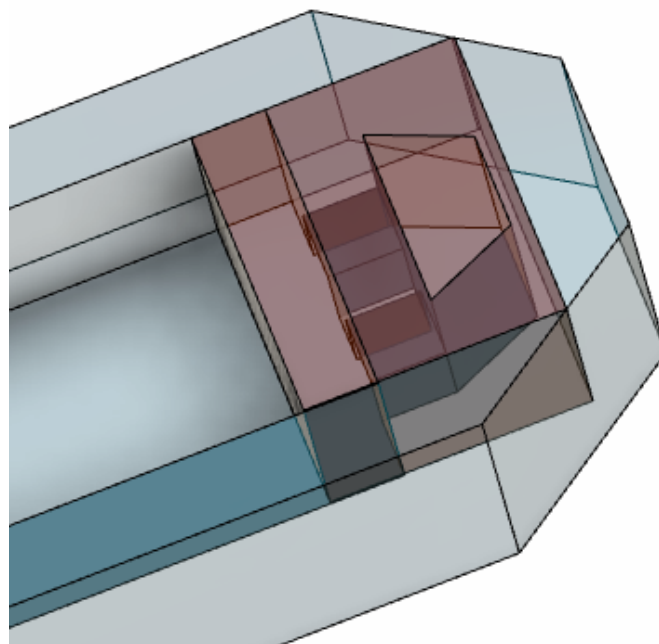


Figura 3.3: Volume di controllo usato per lo studio della turbolenza nei forni

Il primo confronto tra i due forni, e forse il più diretto, può essere fatto guardando un grafico “energia cinetica turbolenta-tempo” riportato in “Figura 3.3”.

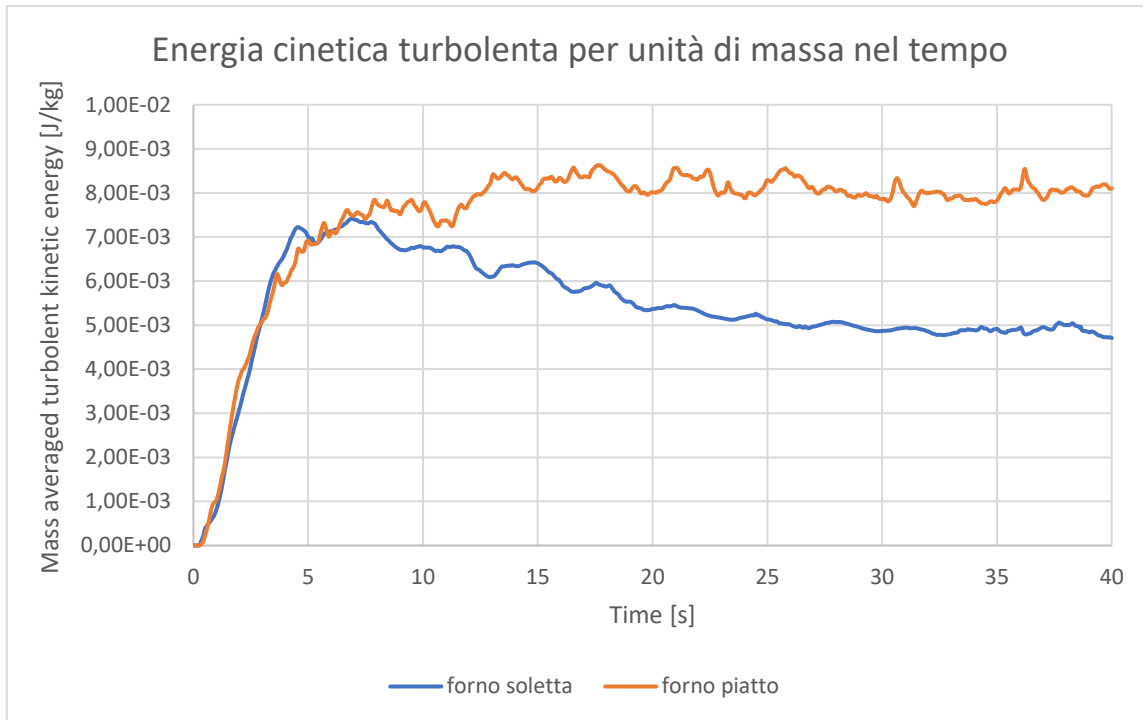


Figura 3.4: grafico energia cinetica turbolenta- tempo 1500-2250 kg

Si può notare che per tutta la durata del versamento il forno a soletta inclinata assume valori di energia cinetica turbolenta molto minori rispetto a quelli del forno piatto. Dopo i primi 5 secondi l’energia cinetica tende a stabilizzarsi e decresce leggermente per tutto il resto della durata del versamento. Si può vedere inoltre che, mentre nel forno a soletta inclinata si ha un andamento abbastanza costante, per il forno piatto si ha una brusca salita iniziale seguita da una stabilizzazione dopo 15 secondi dall’inizio del versamento. Questo diverso andamento dei grafici è dovuto alla geometria della zona di versamento: nel forno a soletta inclinata, infatti, il metallo è libero di fluire nella zona centrale del forno senza trovare ostacoli durante il percorso, mentre, nel forno piatto, il nuovo metallo tende a ristagnare nella zona iniziale a causa del “sifone” posto tra zona di versamento e zona centrale e a causa del pilastro di supporto.

Si procederà adesso ad analizzare due istanti temporali rispettivamente a inizio (10.35 s) e fine versamento (39.6 s) per mettere in luce la turbolenza causata dall’ingresso di nuovo metallo all’interno del forno. Per farlo ci si avvale della funzione “Threshold”. Questa funzione permette di mostrare solo le zone in cui il parametro scelto (turbolenza) presenta valori all’interno di un range imposto. Le zone in questione vengono quindi discretizzate in solidi cubici, ognuno dei quali colorato seguendo la scala indicata in funzione del valore che il parametro assume in quel punto. Per entrambi

i casi analizzati è stata utilizzata la stessa scala, lo stesso range di turbolenza da visualizzare e la stessa trasparenza per le celle.

Nel caso in cui si preferisca avere una visualizzazione continua e non seghettata delle superfici, con l'attuale versione del software (1.1.0) è possibile ricorrere a due strade:

- Mediante l'uso di più "isosuperfici" sovrapposte;
- Sovrapponendo il "threshold" ad un'unica "isosuperficie" in modo da arrotondare e rendere più omogenea la superficie esterna.

È stata utilizzata la prima alternativa essendo la più chiara nella visualizzazione. Come si vede nelle "Figure 3.5, 3.7, 3.9, 3.16, 3.18, 3.20", la tecnica delle isosuperfici permette di ottenere dei risultati grafici visivamente migliori, purtroppo però ha una limitazione che è data dal numero di isosuperfici utilizzate. Per poter ottenere delle visualizzazioni soddisfacenti bisognerebbe utilizzarne un numero molto alto, infatti, maggiori saranno le isosuperfici e maggiori saranno i valori visualizzati che la turbolenza assume regione per regione. Inoltre, l'utilizzo della trasparenza sulle isosuperfici più esterne per mostrare quelle interne fa perdere leggermente il senso di profondità e l'estensione delle stesse. Si è ritenuto più opportuno, pertanto, basare le considerazioni solo sui risultati ottenuti con la funzione "threshold", che mostra in automatico tutti i valori compresi nel range di turbolenza selezionato.

Il risultato grafico ottenuto è il seguente:

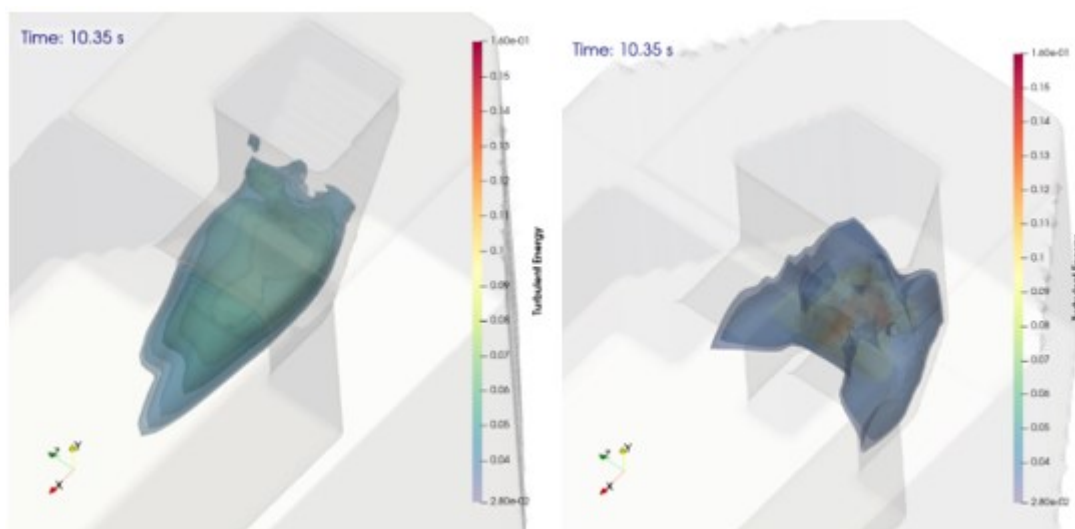


Figura 3.5: isosuperfici turbolenza inizio versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg

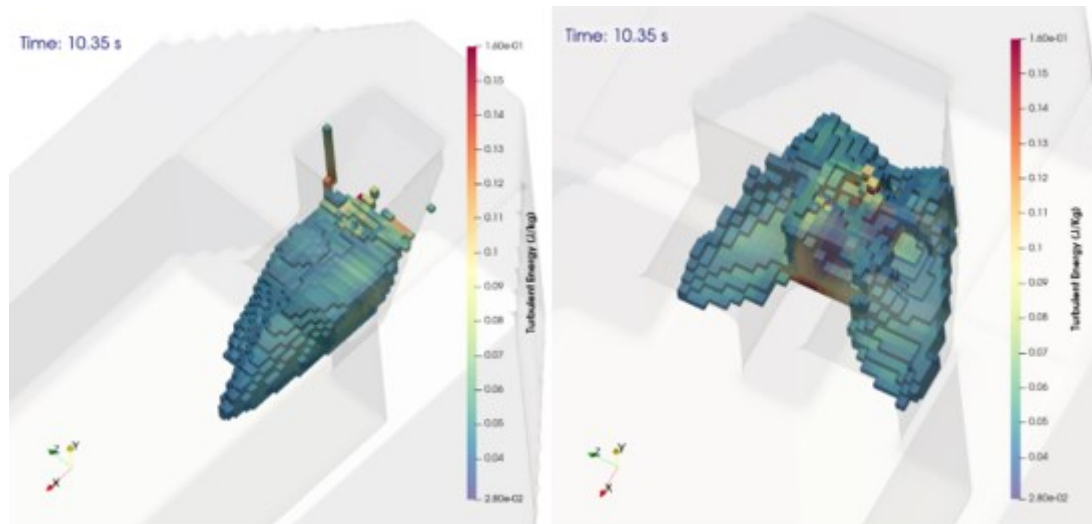


Figura 3.6: threshold turbolenza inizio versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg

In “Figura 3.6” si può notare che la quantità di turbolenza, in termini di volume, nel forno a soletta è leggermente maggiore rispetto a quella del forno piatto. Non bisogna, tuttavia, fermarsi alla quantità ma è necessario studiare anche l’intensità. Guardando i colori, si nota che i valori di turbolenza dei blocchetti centrali della zona di versamento del forno piatto, portano a valori prossimi a 0,15-0,16 J/Kg, cioè verso la parte alta della scala imposta. Nel forno a soletta inclinata invece si vedono dei colori più uniformi e tendenti tutti (a eccezione di qualche singolo blocco in superficie) nella zona bassa della scala, cioè valori di 0,04-0,07 J/Kg. A conferma di quanto detto prima nel grafico in “Figura 3.4”, il forno a soletta inclinata presenta valori di turbolenza inferiori.

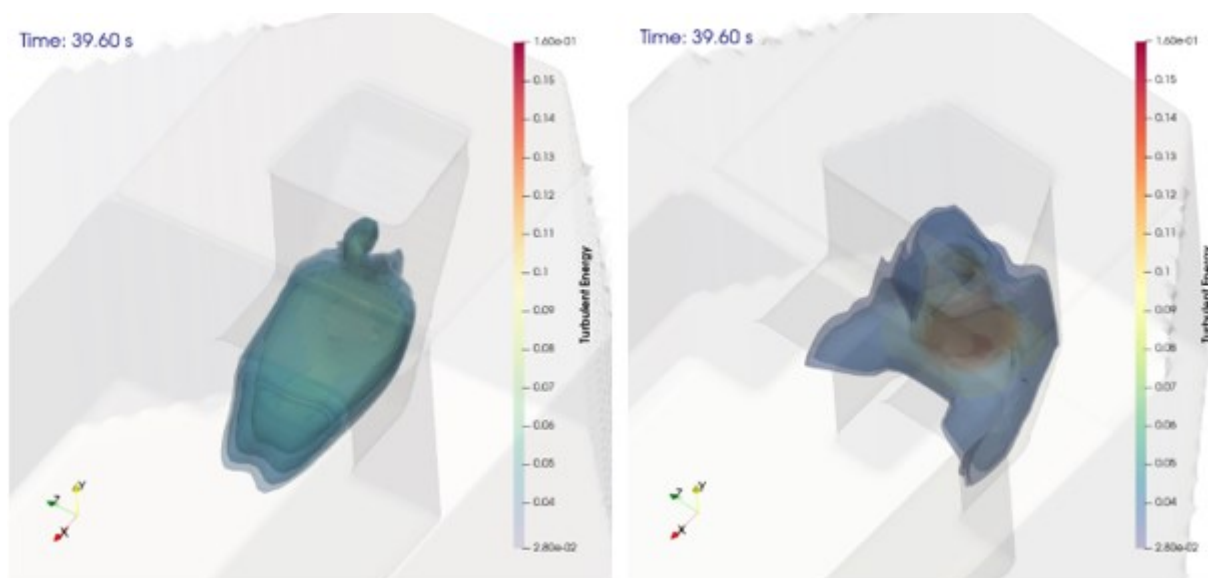


Figura 3.7: isosuperfici turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg

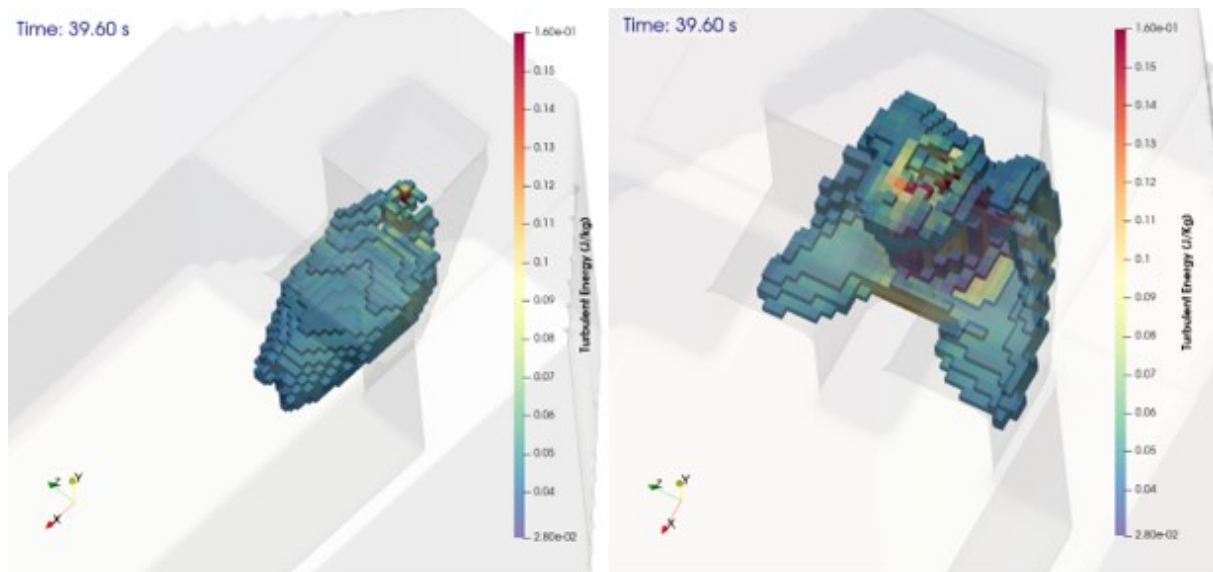


Figura 3.8: *threshold turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg*

Anche per l'istante mostrato in "Figura 3.8" si possono fare delle considerazioni simili al caso precedente. Innanzitutto si può notare immediatamente che la quantità di turbolenza è diminuita nel forno a soletta inclinata, mentre è aumentata nel forno piatto rispetto al caso precedente. Si può già intravedere, nell'immagine di destra, una zona molto turbolenta al di sotto dei blocchi superficiali, non presente invece in quella di sinistra. Per mostrare meglio questa zona è stato ridotto il range con cui il programma considera i threshold in entrambi i forni, considerando solo valori superiori a 0,09 J/Kg. La scala invece è rimasta invariata in modo da poter confrontare le successive immagini con quelle precedenti; anche l'istante temporale è rimasto quello della "Figura 3.8".

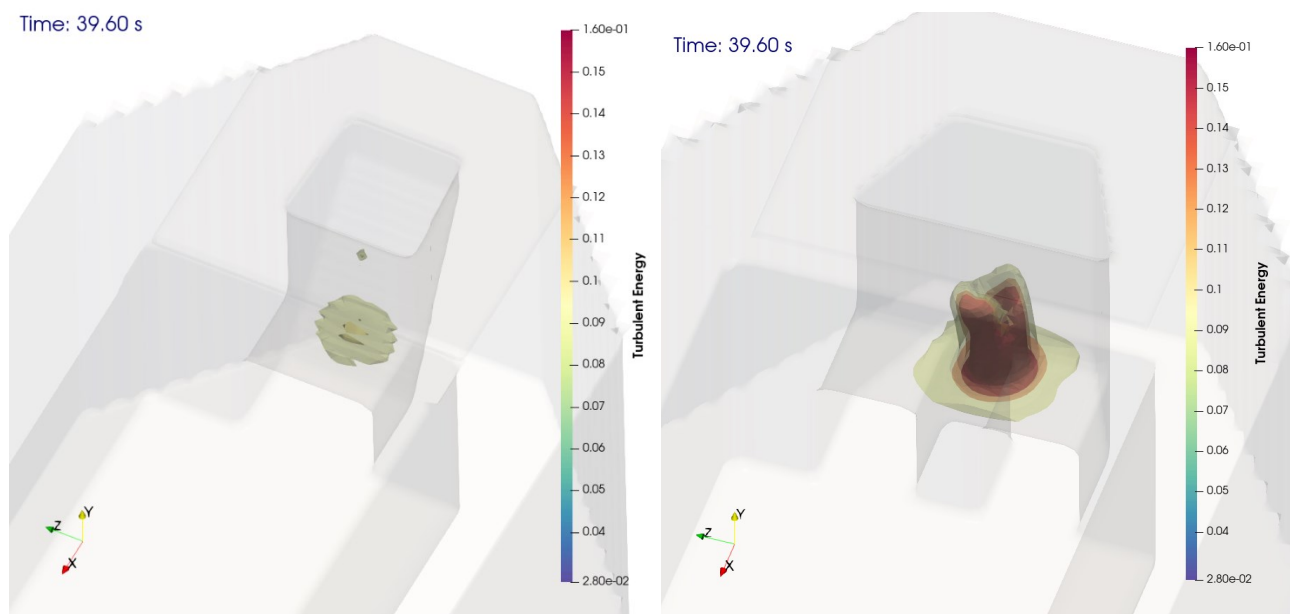


Figura 3.9: *isosuperfici turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg*

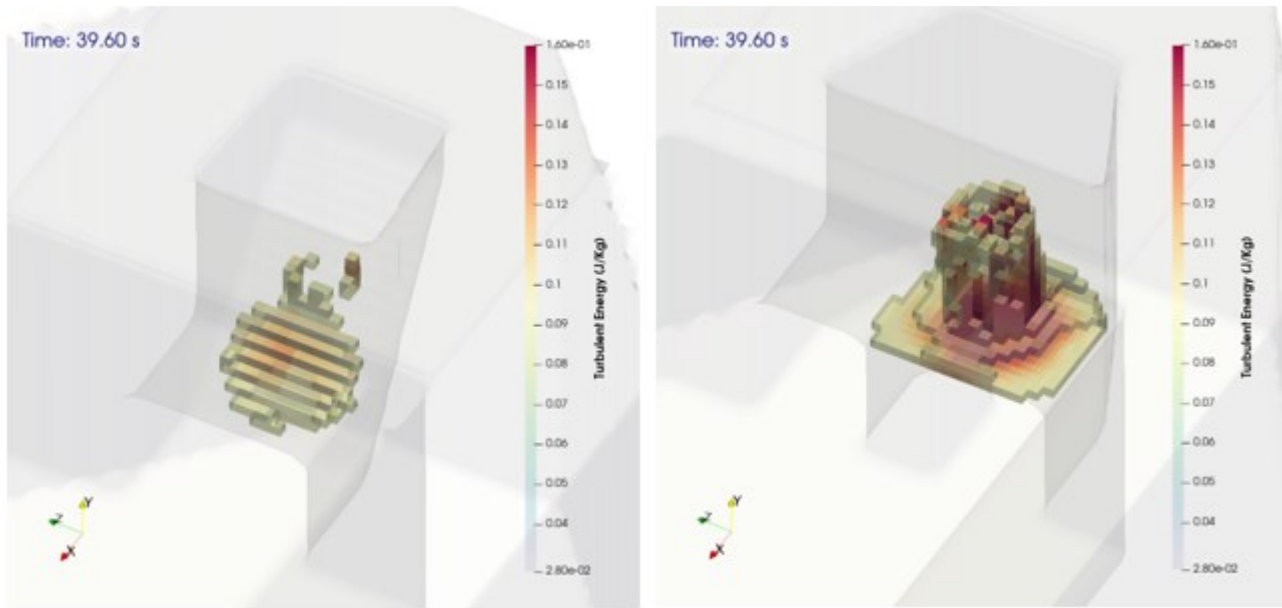


Figura 3.10: *threshold turbolenza fine versamento con range ristretto per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 1500-2250 kg*

Ricollegandosi al grafico in “Figura 3.4” si può affermare che quanto mostrato nelle immagini precedenti è concorde con il fatto che l’energia cinetica turbolenta è maggiore nel forno piatto rispetto al forno a soletta inclinata.

Per concludere la trattazione di questo primo caso verranno analizzati ora i difetti presenti nel bagno tramite il parametro “Free surface defects concentration”. Lo studio verrà localizzato nella parte finale del forno, cioè nella zona di prelievo, in quanto nel precedente lavoro di ricerca svolto dall’Ing. Nicolasi i campioni erano stati prelevati tutti nella parte finale. Si faranno uso di tre volume di controllo e si confronteranno le concentrazioni dei difetti dei due forni dopo 30 minuti dall’inizio del versamento attraverso dei grafici. In “Figura 3.11” è mostrato il volume di controllo totale, il secondo volume invece si sviluppa sulla stessa superficie del primo ma ha una profondità minore ed è posto in modo da comprendere la superficie del metallo a contatto con l’atmosfera e una porzione di 10/15 cm di metallo sotto di essa. Il terzo comprende invece solo la zona inferiore del forno.

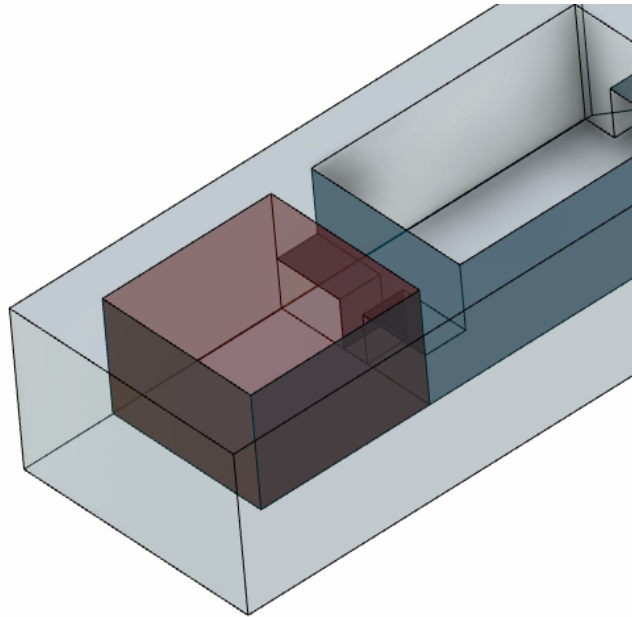


Figura 3.11: Volume di controllo nella zona di prelievo del forno

Dal volume di controllo totale è possibile ricavare il seguente grafico:

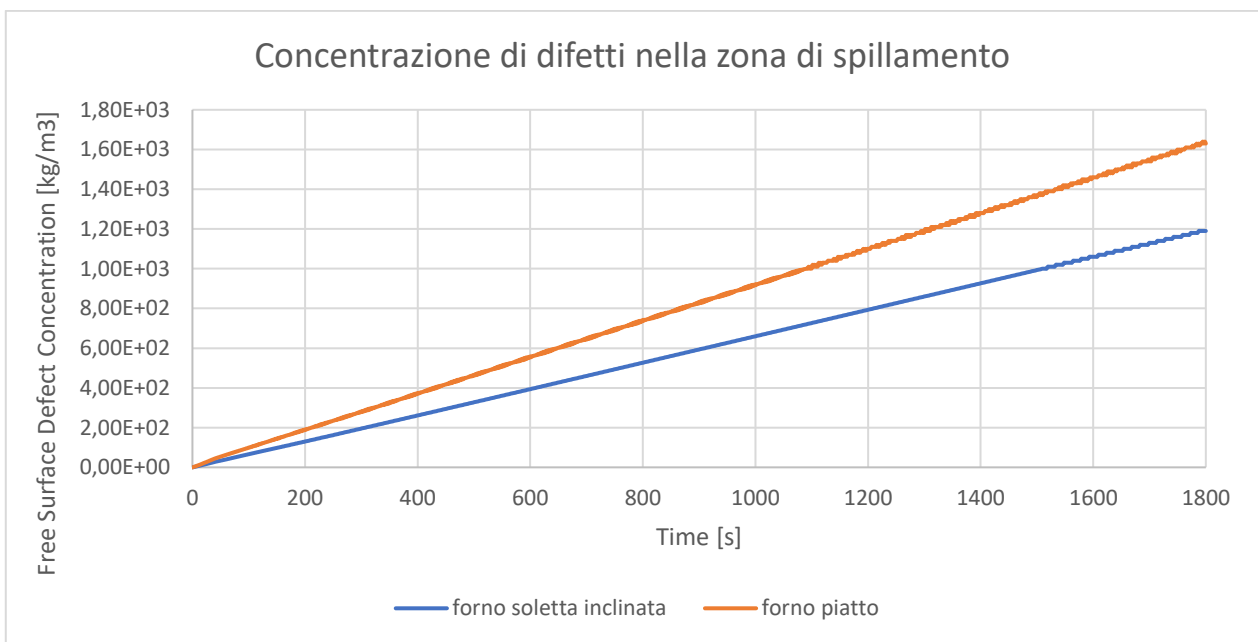


Figura 3.12: Grafico dei difetti per il volume di controllo totale 1500-2250 kg

Come si può vedere in “Figura 3.12”, la presenza di difetti nel forno a soletta inclinata è minore rispetto al forno quadrato; con una prima vista globale si può affermare che la qualità del metallo è migliore nel forno a soletta inclinata.

I difetti teoricamente tendono a concentrarsi sulla porzione superiore del bagno in quanto il metallo, essendo a contatto diretto con l’aria, tende a ossidarsi. Sul fondo invece dovrebbero essere presenti

in quantità minore. I volumi secondari da cui sono stati ricavati i grafici successivi avranno il compito di dimostrare quanto detto.

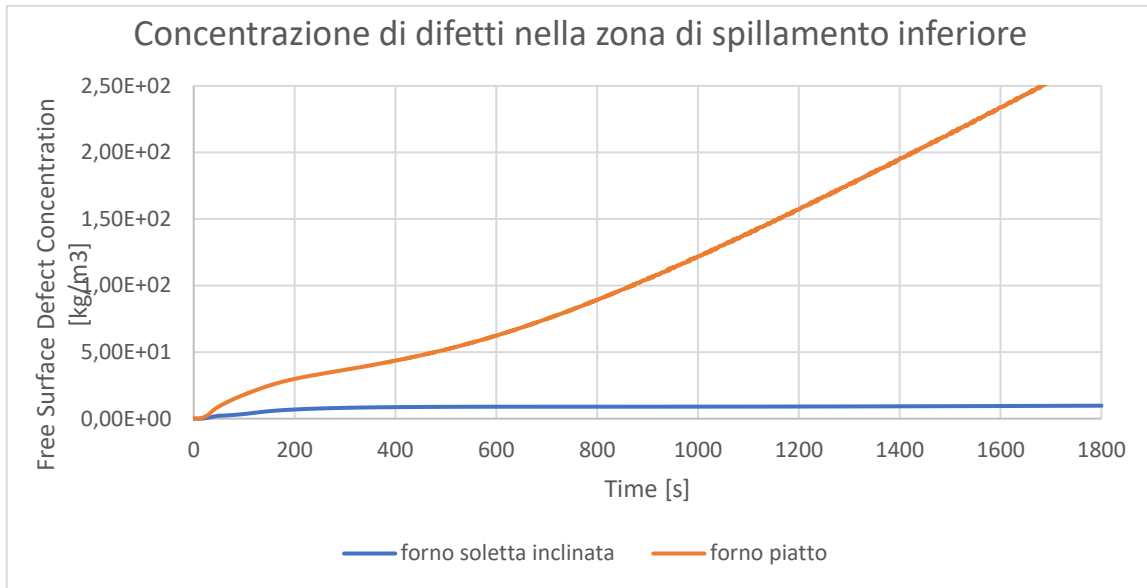


Figura 3.13: Grafico dei difetti nel volume inferiore del forno 1500-2250 kg

Nella zona inferiore del forno si è notato un ampio divario tra i grafici, mostrati in “Figura 3.13”: il forno piatto presenta una concentrazione di difetti elevata rispetto al forno concorrente.

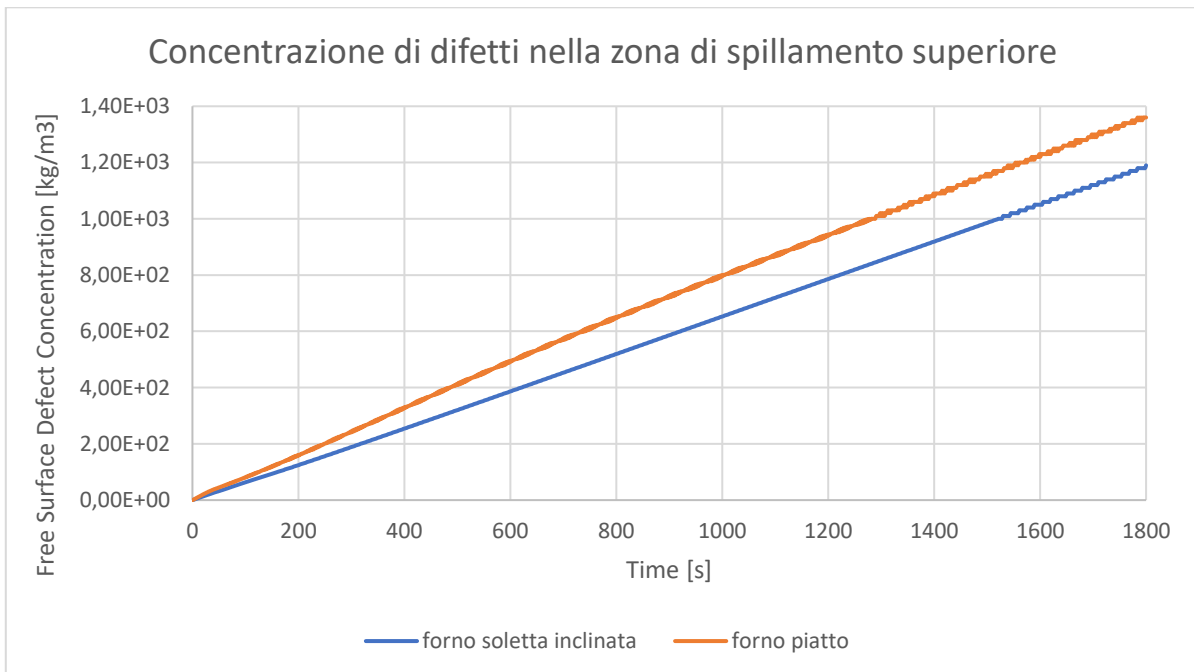


Figura 3.14: Grafico dei difetti sul volume superiore del forno 1500-2250 kg

Infine, osservando le concentrazioni della zona superiore, in “Figura 3.14”, si può vedere che la quasi totalità dei difetti si concentra qui. Nonostante il divario sia minore rispetto ai casi precedenti il forno a soletta inclinata continua ad avere una migliore qualità del metallo.

Nello studio dei difetti non sono stati inseriti risultati grafici in quanto la versione attuale del software non considera lo strato d'ossido superficiale separatamente dal volume del metallo liquido sottostante ma lo visualizza inglobandolo nelle celle poste in superficie. Il risultato che si ottiene è la visualizzazione di uno strato di celle contenenti una quantità d'ossido massima, affiancate da celle sottostanti a basso contenuto di difetti. Nelle versioni successive del software sarà implementata questa funzionalità, per ora però, per non ottenere risultati apparentemente discordanti dai grafici si è preferito non inserirle.

Concludendo, visti i risultati esposti è naturale affermare che il forno a soletta inclinata, considerando una quantità di metallo liquido tra i 1500 e 2250 kg presenta una qualità dell'alluminio migliore rispetto al forno piatto. Questa tesi è in accordo con quanto ricavato dalle analisi sperimentali in azienda, per cui si può affermare che il modello numerico presentato risulta valido.

3.2. Analisi del versamento: 750 kg in 40 s con 2250 kg interni

Ora si analizzerà il caso in cui si versa metallo fino a raggiungere la capacità massima che può essere contenuta nel forno. Come nel caso precedente si può partire da un confronto mediante un grafico che mostra l'energia cinetica turbolenta per unità di massa rispetto al tempo, in "Figura 3.15". Anche questa volta, questo grafico è stato realizzato considerando solo il volume di controllo posto in zona di versamento in "Figura 3.3".

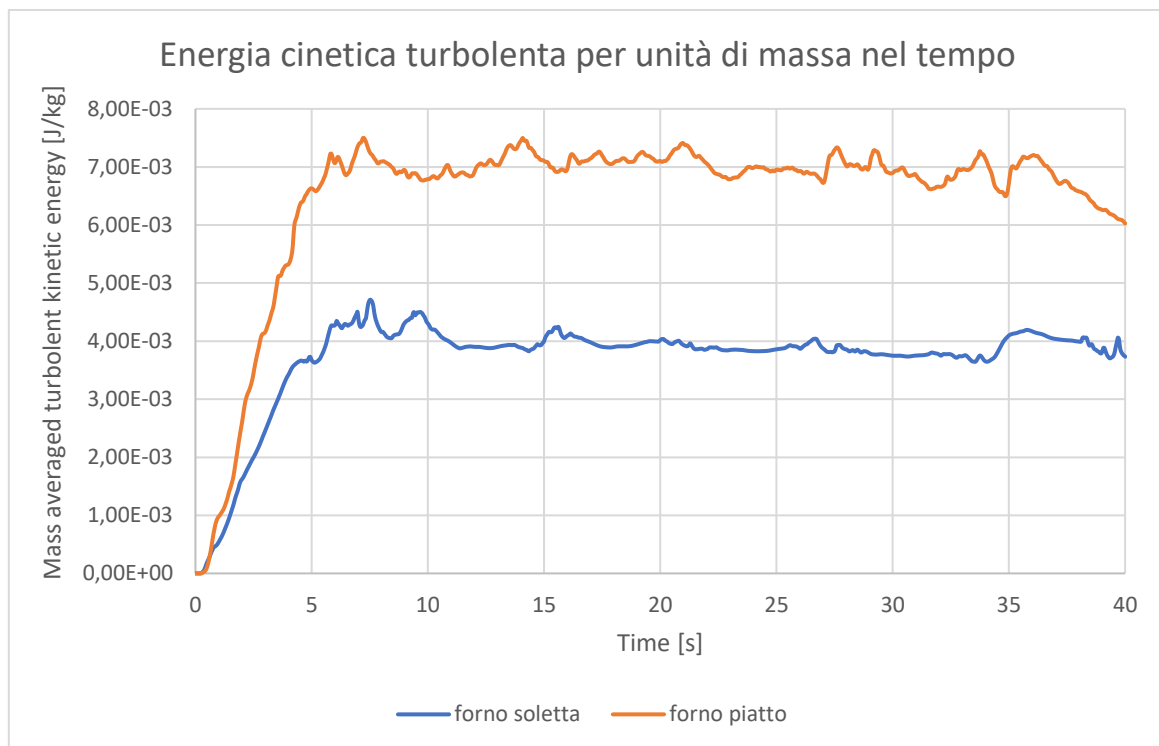


Figura 3.15: grafico energia cinetica turbolenta rispetto al tempo 2250-3000 kg

Anche qui si vede una spiccata differenza tra i due forni, con il forno a soletta che porta un'energia cinetica turbolenta inferiore rispetto al forno piatto. Si nota inoltre che entrambi i grafici tendono a rimanere costanti dopo un primo aumento ad inizio versamento. Si può vedere anche che, rispetto al caso precedente, i valori in gioco sono più bassi. Questo perché il livello del metallo è aumentato per cui la velocità del flusso di nuovo metallo che entra all'interno del forno è ridotta.

Ora, utilizzando i “threshold” si farà un confronto della turbolenza all'interno del bagno all'inizio ed alla fine del versamento.

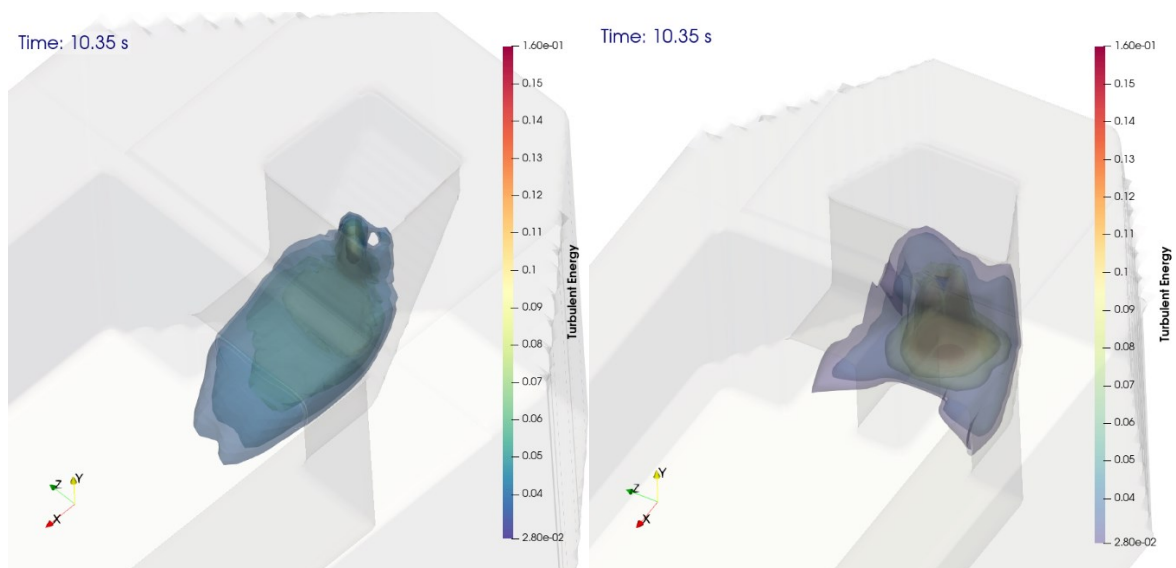


Figura 3.16: isosuperfici turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000 kg

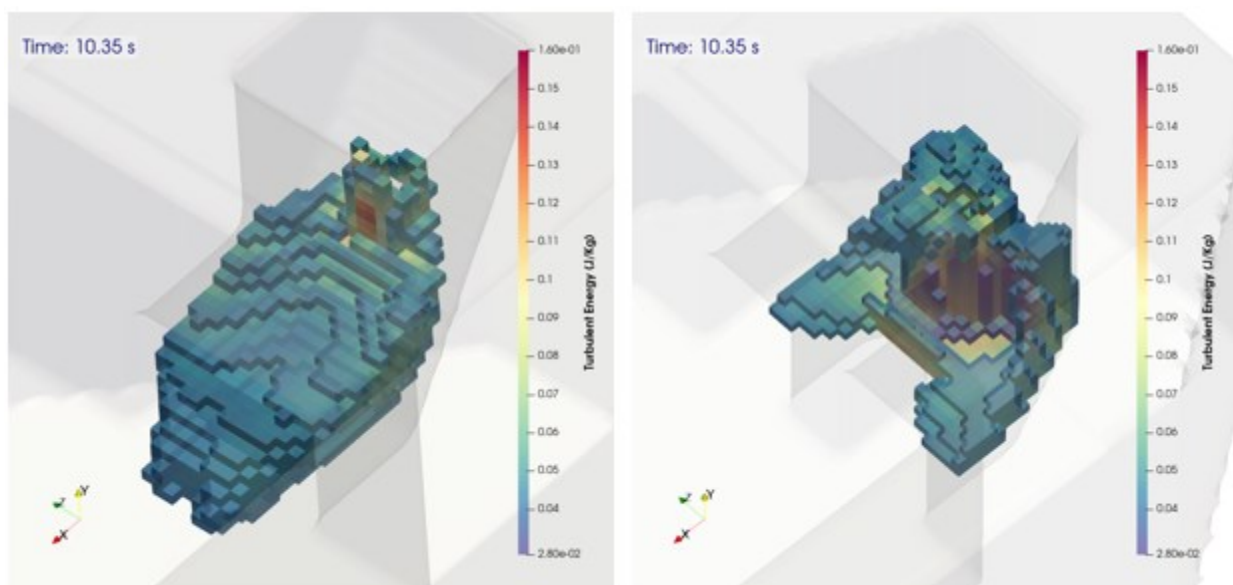


Figura 3.17: threshold turbolenza a inizio versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000kg

In “Figura 3.17” sono mostrati i threshold raffiguranti la turbolenza in un istante della fase iniziale di versamento. Guardando la colorazione delle immagini si nota fin da subito che i valori di turbolenza

nel forno a soletta sono molto più bassi rispetto a quelli del forno piatto. Si intravede inoltre, nel forno piatto, che la zona centrale in cui il nuovo metallo entra a contatto con quello già presente all'interno presenta una turbolenza molto elevata, che invece nel forno a soletta risulta limitata a pochi blocchi. I risultati mostrati da queste immagini sono quindi in accordo con il grafico in “Figura 3.15”.

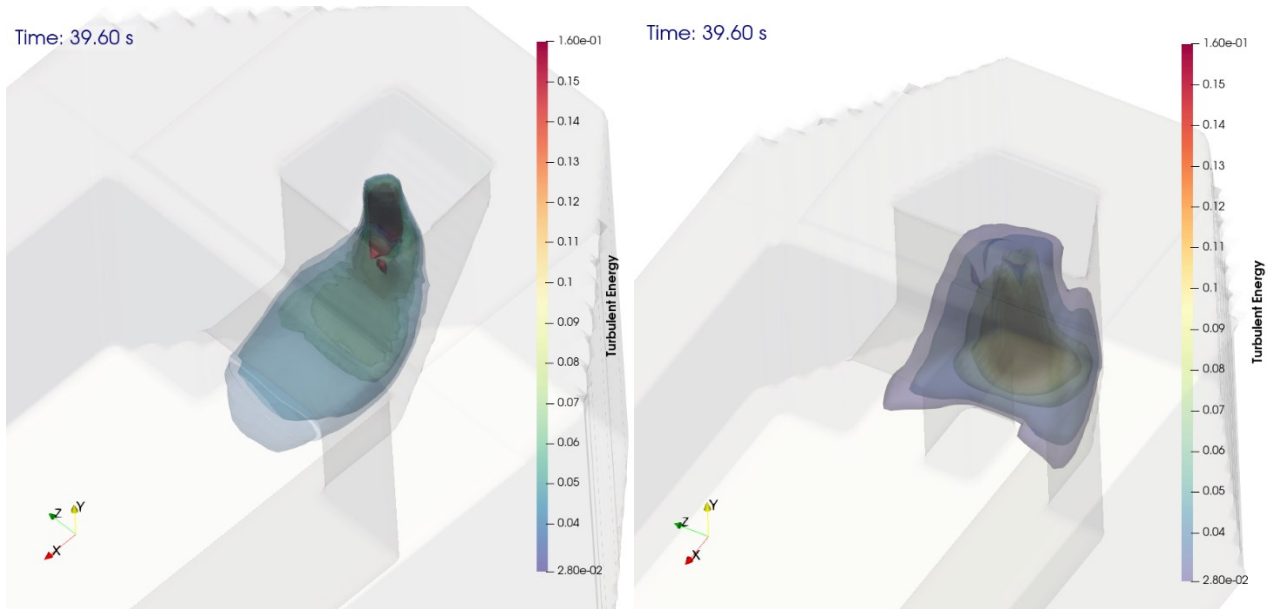


Figura 3.18: isosuperfici turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000 kg

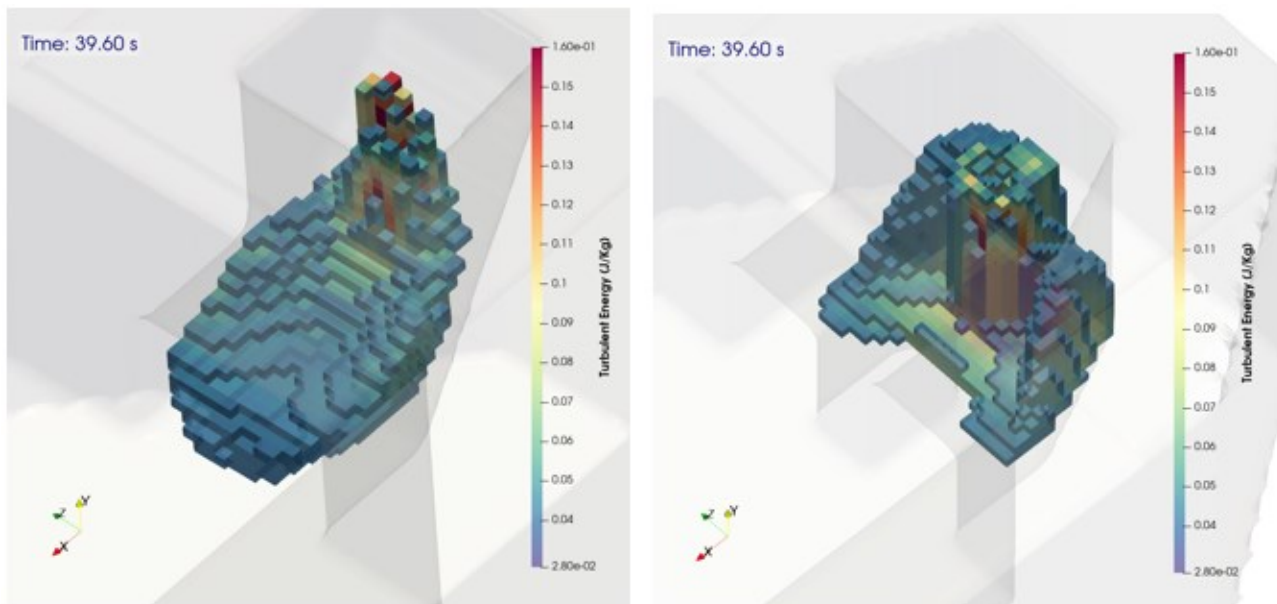


Figura 3.19: threshold turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000kg

In “Figura 3.19” sono mostrati i threshold in uno degli istanti finali del versamento. La situazione, a questo punto, è simile a quanto già mostrato ad inizio versamento. Le considerazioni già fatte sopra quindi valgono anche in questo caso. Per mostrare in maniera migliore la zona turbolenta centrale è

stato ridotto il range con cui il programma considera i threshold in entrambi i forni, portando il minimo da considerare a 0.09 J/kg.

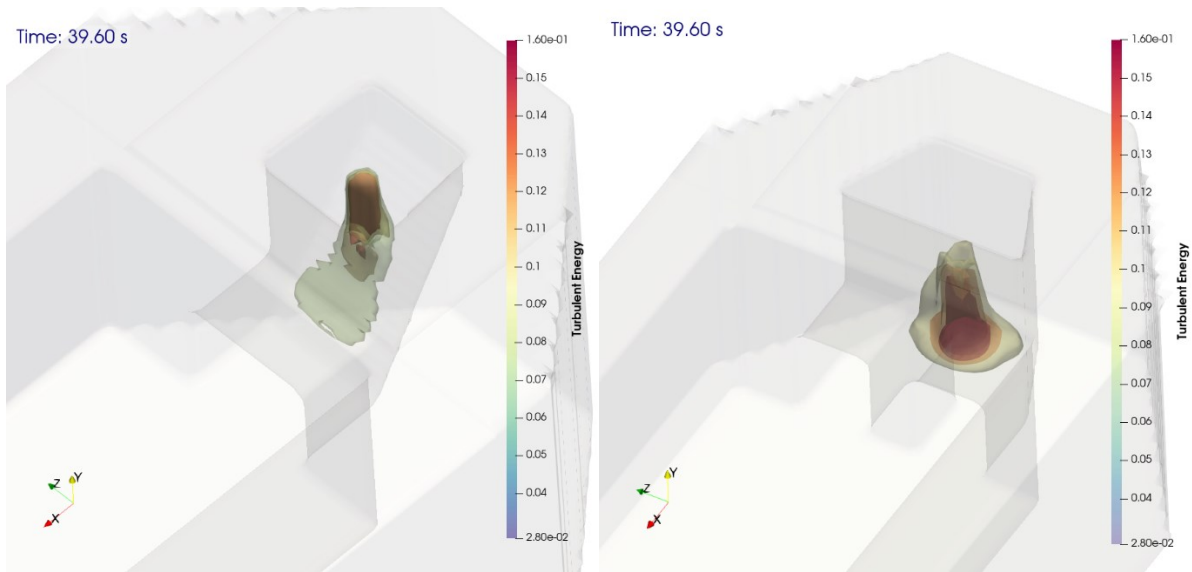


Figura 3.20: dettaglio isosuperfici turbolenza fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000 kg

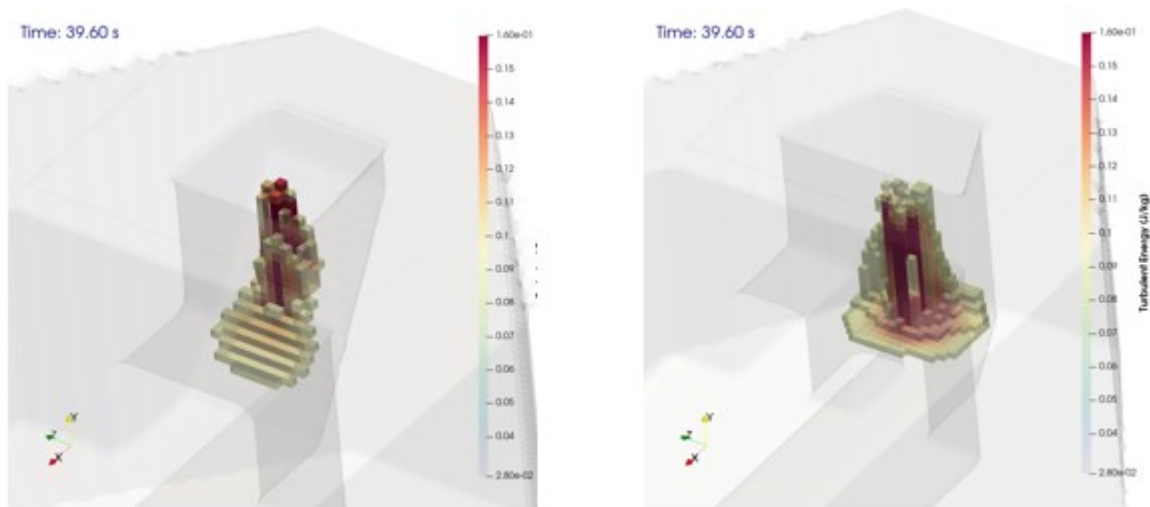


Figura 3.21: dettaglio treshold turbolenza a fine versamento per forno a soletta (sinistra) e forno piatto (destra) 2250-3000kg

In “Figura 3.21” si vedono in dettaglio le zone più critiche per quanto riguarda la turbolenza. Si vede fin da subito che la zona turbolenta nel forno piatto è molto più ampia di quella del forno a soletta. Facendo un confronto con le stesse immagini mostrate nel caso precedente (Figura 3.10) si nota che la zona turbolenta nel forno a soletta è aumentata di dimensione. Questo probabilmente è dovuto al fatto che il livello del metallo è arrivato ad un punto in cui l’effetto benefico della soletta si riduce. Ciò, tuttavia, non va ad influire sulla turbolenza totale in quanto la quantità di turbolenza presente a fine versamento è molto più bassa rispetto al caso precedente per il semplice fatto che il metallo che

viene versato arriva all'interno del forno con la velocità che è prossima al valore minimo, dato che il livello del metallo è ormai all'altezza massima.

Si può quindi concludere che la turbolenza anche a fine versamento è maggiore nel forno piatto, in accordo con il grafico in “Figura 3.15”.

Passando ora allo studio dei difetti superficiali si è mantenuto lo schema precedente adottato per lo studio dai 1500 ai 2250 kg, utilizzando tre volumi di controllo in modo da studiare tutte le zone della regione di prelievo dei forni, in “Figura 3.11”.

Dal volume di controllo totale è possibile ricavare il grafico mostrato in “Figura 3.22”:

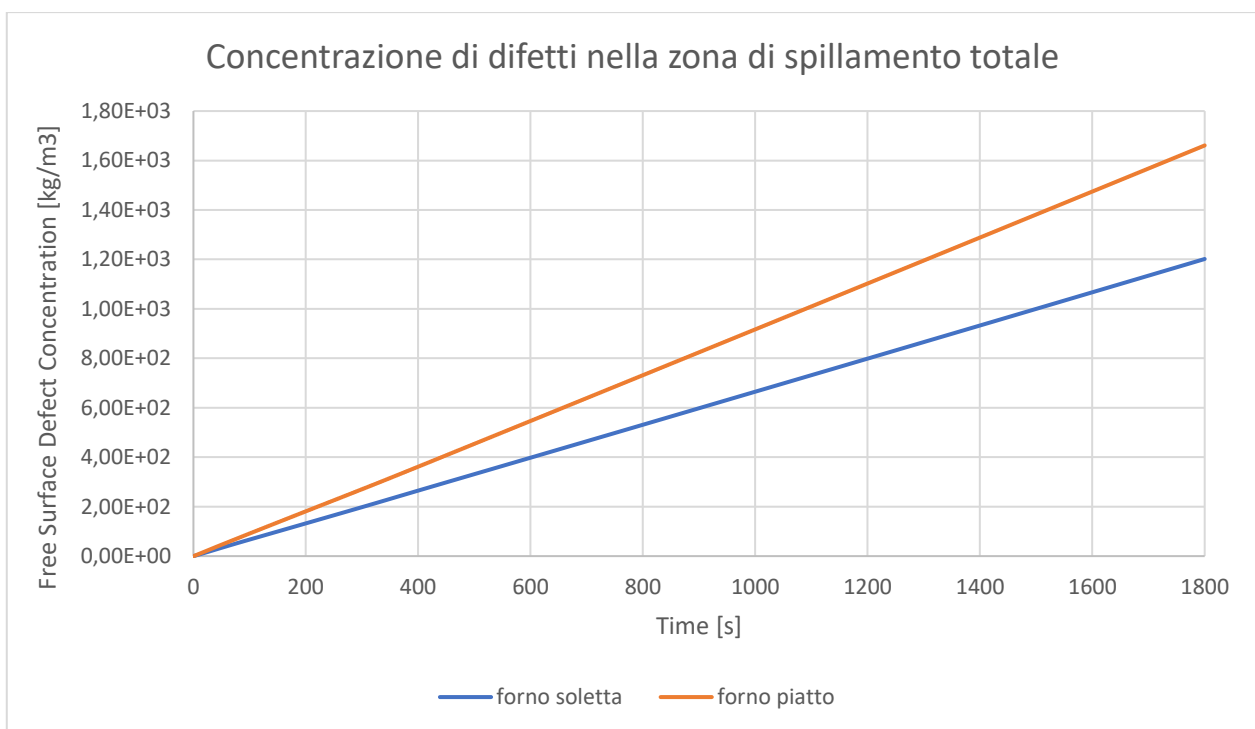


Figura 3.22: Grafico dei difetti per il volume di controllo totale 2250-3000 kg

Come per il caso precedente la presenza di difetti nel forno a soletta inclinata è minore rispetto al forno quadrato e il divario è pressochè lo stesso per entrambi i casi di versamento.

Passando ora allo studio della regione inferiore del forno, in “Figura 3.23” si può notare un andamento simile al precedente caso.

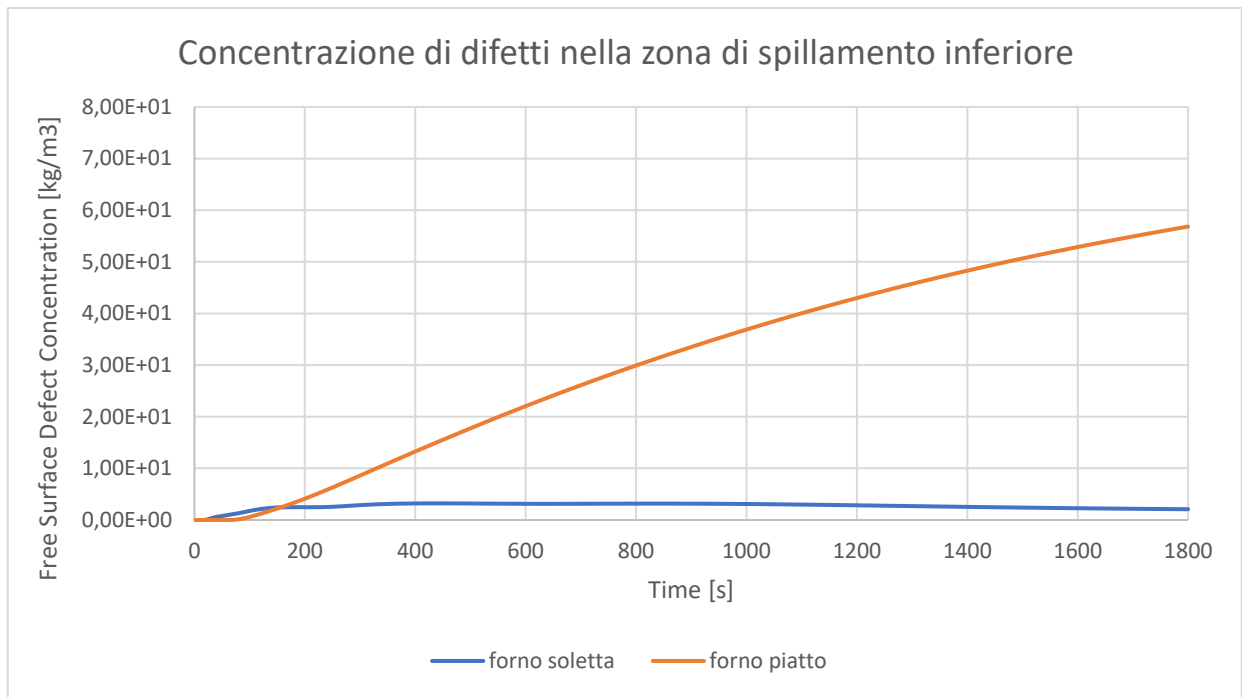


Figura 3.23: Grafico dei difetti nel volume inferiore del forno 2250-3000 kg

Il divario qui è ancora più netto e il forno piatto presenta una concentrazione di difetti più elevata.

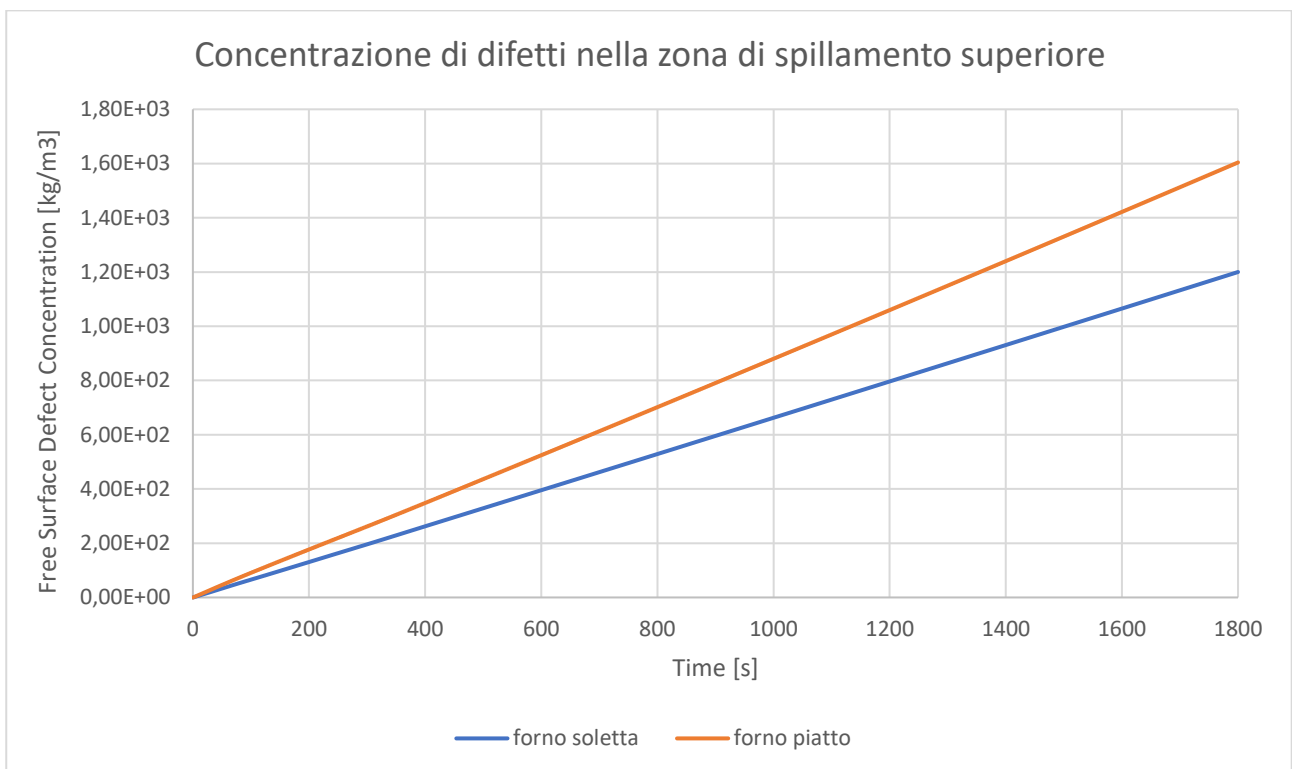


Figura 3.24: Grafico dei difetti sul volume superiore del forno 2250-3000 kg

Infine, osservando le concentrazioni della zona superiore, in “Figura 3.23” si può vedere il forno a soletta inclinata continua ad avere una migliore qualità del metallo.

Anche per questo caso, con quantità di metallo liquido tra i 2250 e 3000 kg la tesi finale è la stessa del precedente caso, ovvero che il forno a soletta inclinata porta una qualità dell'alluminio oggettivamente migliore. Questa affermazione è in accordo con le analisi sperimentali fatte precedentemente, quindi anche questo caso numerico è da considerarsi valido.

CONCLUSIONI

Di seguito verranno trattate le conclusioni a cui si è arrivati dopo lo sviluppo di questo lavoro di tesi.

Una prima analisi è stata condotta sull'andamento dell'energia cinetica turbolenta, parametro che è strettamente collegato alla generazione di difetti in quanto avere una forte turbolenza porta al rimescolamento del metallo e quindi all'inglobamento di questi difetti all'interno del bagno. Alla fine di questa analisi è stato mostrato che l'energia cinetica turbolenta assume valori maggiori nel caso del forno senza soletta inclinata per tutti i livelli di metallo liquido considerati. Questo significa che la qualità dell'alluminio che deriva dal forno con canale di versamento verticale è peggiore rispetto a quella del forno con soletta inclinata.

Per confermare quanto appena detto è stata fatta, in seguito, un'analisi che aveva come scopo quello di confrontare l'effettiva quantità di difetti presenti all'interno del bagno. Si è visto che, anche in questa analisi, il forno con fondo piatto ha generato risultati peggiori, mostrando una maggiore quantità di difetti rispetto a quello con soletta inclinata.

È possibile, quindi, affermare con certezza che il forno a soletta inclinata vince il confronto con il suo diretto concorrente e che quindi esso rappresenta una prima soluzione per l'ottenimento di una maggiore qualità dell'alluminio.

Si è visto, inoltre, che all'aumentare del livello di metallo liquido, i livelli di energia cinetica turbolenta e, parallelamente, le quantità di difetti presenti nel bagno, si riducono. Questo vuol dire che mantenere il livello di metallo all'interno del forno prossimo al limite massimo porta dei benefici per la qualità dell'alluminio.

Se si volessero approfondire ulteriormente gli argomenti trattati in questo lavoro si potrebbero simulare i versamenti utilizzando, invece di un inlet fisso, un modello di una siviera che ruota e versa il metallo all'interno del forno. In questo modo si andrebbe a simulare il processo di versamento come dovrebbe avvenire nella realtà. Un altro tema che potrebbe essere trattato è la simulazione del versamento in condizioni di esercizio. In azienda infatti non viene svuotata la capacità completa di una siviera all'interno del forno, ma si procede, di solito, a versare quantità variabili di metallo in base alla richiesta.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "D. Dispinar and J. Campbell, "Critical assessment of reduced pressure test. Part 1: Porosity Phenomena" *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 17 No. 5, 2004, pp. 280-286"
- [2] "F. Nicolasi, relazione finale Nicolasi Federico assegno di ricerca, "Monitoraggio real time e ottimizzazione per l'efficienza e la qualità del processo di pressocolata", pp. 7-65"
- [3] "C. Reilly, N.R. Green, M.R. Jolly, J.-C. Gebelin, "The modelling of oxide film entrainment in casting systems using computational modelling", *Applied Mathematical Modelling* 37, 2013, pp. 8452-8464."
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Kinetic_energy
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence_kinetic_energy