



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE - DIN

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA

Classe L-9

Modellazione del processo di saldatura laser su lamiera in acciaio 42CrMo4 con FLOW-3D

Elaborato finale di laurea in **Tecnologia Meccanica B**

Relatore

Prof.ssa Erica Liverani

Candidato

Enrico Bezzi
Matricola n. 0001069803

Sessione di laurea: Marzo 2026

Anno Accademico 2024/2025

Abstract

L'obiettivo di questo elaborato è analizzare e confrontare un cordone di saldatura laser ottenuto sperimentalmente con la corrispondente simulazione numerica sviluppata mediante il software FLOW-3D.

Il lavoro mira a evidenziare gli aspetti principali da considerare nella fase di progettazione dei parametri di processo, valutando al contempo l'affidabilità degli strumenti predittivi integrati nel supporto alla progettazione.

In una prima fase viene fornita una descrizione generale di FLOW-3D e della sua architettura numerica, soffermandosi sui metodi di discretizzazione, sui modelli matematici implementati e sulle specifiche opzioni dedicate ai processi di saldatura laser.

Successivamente viene presentato il modello numerico sviluppato per il caso in esame, illustrando come siano stati impostati i parametri di processo e le principali scelte modellistiche adottate per rappresentare il bagno di fusione.

Infine, i risultati numerici vengono confrontati con i dati sperimentali del cordone reale, mettendo in luce le principali differenze in termini di geometria del cordone e del bagno di fusione e fornendo una stima critica dell'affidabilità dell'approccio numerico per la progettazione e l'ottimizzazione di processi di saldatura laser.

Indice

Introduzione	1
1 Il software FLOW-3D WELD	4
1.1 Scopo del software e la sua evoluzione nel tempo	4
1.1.1 Lo sviluppo di FLOW-3D	4
1.2 Fondamenti tecnici	5
1.2.1 Panoramica	5
1.2.2 Sistema di coordinate	6
1.2.3 Equazione di Continuità della Massa	6
1.2.4 Equazioni del Moto (Navier-Stokes)	7
1.2.5 Moto in Riferimenti Non-Inerziali	10
1.2.6 Interfacce Fluide e Superfici Libere	11
1.2.7 Equazioni dell'Energia del Fluido	12
1.2.8 Diffusione Termica e Sorgenti	14
1.2.9 Equazione della Temperatura della Struttura	14
1.2.10 Equazione di Stato	15
1.2.11 Regioni Vuote e Flussi a Superficie Libera	16
1.2.12 Regioni Vuote a Pressione Costante	16
1.3 Descrizione dell'interfaccia utente	18
1.3.1 Struttura generale dell'interfaccia	18
1.3.2 Struttura e funzionalità del Model Setup	18
1.4 Modulo Display	29
1.4.1 Pannello di selezione delle variabili	29
1.4.2 Visualizzazione tridimensionale	30
1.5 Analyze	30
1.6 Area di visualizzazione geometrica	31
1.7 Simulation Manager	32
2 Applicazione dei parametri sperimentali al software	34
2.1 Obiettivi e premesse sperimentali	34
2.2 Definizione e fonti dei files di input	35
2.2.1 Caratterizzazione delle proprietà del 42CrMo4	36
2.2.2 Caratterizzazione delle proprietà dell'aria	48
2.3 Esecuzione della simulazione numerica	49
2.3.1 Fase preliminare di modellazione	49
2.3.2 Svolgimento della simulazione e il Simulation Manager	57
2.4 Analisi post-processing e visualizzazione dei risultati	58

2.5	Raccolta dei risultati	59
2.5.1	Risultati simulazione 1	59
2.5.2	Risultati simulazione 2	61
3	Esecuzione sperimentale e validazione del modello numerico . .	64
3.1	Procedura di saldatura laser	64
3.2	Confronto numerico-sperimentale dei risultati ottenuti	65
3.3	Conclusioni finali ed eventuali sviluppi futuri	66

Elenco delle figure

1.1	Visualizzazione dei 4 moduli	18
1.2	Interfaccia del modulo Model Setup mostrante la configurazione delle condizioni globali	19
1.3	Selezione verticale delle schede	19
1.4	Interfaccia della scheda Global	20
1.5	Interfaccia della scheda Physics	21
1.6	Interfaccia della scheda Fluids, durante la visualizzazione delle proprietà di tipo termico	23
1.7	Interfaccia della scheda Mesh, con distinzione tra una zona diffusione termica e una di interazione con laser	24
1.8	Interfaccia della scheda Boundary Conditions	25
1.9	Interfaccia della scheda Initial Conditions	26
1.10	Interfaccia della scheda Heat Source	27
1.11	Interfaccia della scheda Output	28
1.12	Modulo Display con area di rendering centrale (attualmente vuota, mostrando solo la scala cromatica) e pannelli di controllo per la selezione delle variabili da visualizzare e delle opzioni di rendering.	29
1.13	Interfaccia grafica del Modulo Analyze	30
1.14	Interfaccia dell'area di visualizzazione geometrica	31
1.15	Interfaccia del Simulation Manager	32
2.1	Valori della densità in funzione della temperatura	36
2.2	Valori della viscosità in funzione della temperatura	38
2.3	Valori delle tabelle nella sezione Thermal	41
2.4	Valori della surface tension in funzione della temperatura.	44
2.5	Immagine della pagina di absorptivity con i dati di simulazione	45
2.6	Scheda di evaporation	46
2.7	Scheda dei dati di solidification	47
2.8	Pagina di inserimento dati dell'aria	48
2.9	Global di simulazione	49
2.10	Modellazione della pagina physics nella simulazione	51
2.11	Foto delle mesh di simulazione.	52
2.12	Immagini boundary	53
2.13	Varie region definite nei tratti	54
2.14	Definizione di intensità	55
2.15	Riga di log di una delle simulazioni presenti nell'elaborato	57

2.16	Immagine di una sezione di cordone ottenuto, dove può anche essere vista la tecnica della divisione simmetrica del cordone per necessità computazionali	58
2.17	Evoluzione della simulazione 1, seguendo i timesteps presenti nel visualizzatore render	60
2.18	Evoluzione della simulazione 2, seguendo i timesteps presenti nel visualizzatore render	62
3.1	Foto ad alta risoluzione della sezione del cordone di saldatura ottenuto sperimentalmente, con una maschera nera applicata nella regioni di materiale base	65

Elenco delle tabelle

2.1	Tabella dei parametri della simulazione in esame	34
2.2	Tabella di densità del 42CrMo4 applicata	37
2.3	Viscosità vs temperatura 42CrMo4.	39
2.4	Calore specifico vs temperatura 42CrMo4.	42
2.5	Conducibilità termica vs temperatura 42CrMo4	43
2.6	Tensione superficiale vs temperatura 42CrMo4.	44
2.7	Risultati dimensionali della Simulazione 1	59
2.8	Risultati dimensionali della Simulazione 2	61
3.1	Confronto tra risultati sperimentali e simulazioni numeriche	66
3.2	Confronto in termini percentuali dell'errore dei risultati di simulazione	66

Introduzione

La saldatura laser è oggi un processo di enorme rilievo tecnologico nelle industrie all'avanguardia come quelle presenti nei settori dell'automotive, aerospace, biomedico, ecc.

Ciò è principalmente dovuto al fatto che questa possa concentrare grandi quantità di energia su di sezioni estremamente piccole ed in tempi brevi, risultando così in un procedimento estremamente preciso e rapido, in grado di garantire una limitata zona termicamente alterata e, soprattutto, un'elevata ripetibilità spesso fondamentale nelle applicazioni precedentemente introdotte.

Queste operazioni però sono estremamente sensibili alle condizioni dell'ambiente circostante ed ai parametri di processo, cosa che può portare anche ad irregolarità nella geometria, sia della superficie che della sezione del cordone stesso.

L'aspetto più rilevante al fine di questo elaborato è quello del bagno di fusione o *melt region*, ovvero la regione di interazione che si forma tra l'impronta del raggio del laser e la superficie del pezzo, caratterizzata da materiale liquido.

La dinamica di questo volume è descritta da una serie di legami tra i moti del fluido, lo scambio termico, generalmente di tipo convettivo, tensione superficiale e eventualmente anche dalla presenza di keyhole.

Comprendere quindi le relazioni fra questi sopracitati è di fondamentale importanza nello studio e nell'analisi del cordone, soprattutto prevedere il comportamento del bagno per impostare i parametri di processo e ridurre il ricorso a prove sperimentali iterative.

Prima dell'avvento di tali tecnologie, si era soliti affidarsi a processi iterativi che, variando i parametri che influenzano la geometria della saldatura, avevano come fine ultimo quello di ottenere un risultato soddisfacente all'impiego; ma ciò comportava notevoli dispendi di tempo e risorse.

Negli ultimi anni, i software di fluidodinamica computazionale o CFD (Computational Fluid Dynamics), sono stati oggetto di importanti evoluzioni, rendendo possibili lo sviluppo di simulazioni dettagliate anche dei bagni di fusione di un cordone di saldatura.

Fra questi FLOW-3D si è affermato come uno strumento largamente valido per caratterizzare fenomeni legati al processo di saldatura laser quali i processi convettivi nel bagno, gli scambi con l'ambiente e l'interazione della sorgente di calore con il modello del materiale in esame.

Nonostante le potenzialità di questa tipologia di strumenti, la loro complessità e

generalmente la modalità con la quale l'utente si interfaccia con questi, introduce un ostacolo ad un uso su vasta scala.

Inoltre, l'accuratezza dei dati di input, fondamentali per definire un modello affidabile, è direttamente collegata alla reperibilità degli stessi, anche considerando le schede tecniche prodotte sia dalle aziende del settore che dai centri di ricerca.

A questo si aggiungono anche la scelta dei modelli fisici, la definizione della sorgente di calore e la descrizione dello spazio temporale della simulazione stessa.

Le sensibilità di questo tipo di operazioni, rende dunque indispensabile anche un riscontro sperimentale con dati ottenuti da saldature effettuate sul materiale reale.

L'obbiettivo di questo elaborato è, dunque, quello di documentare lo svolgimento dell'attività di analisi e correlazione dei risultati ottenuti tramite FLOW-3D e quelli ricavati da un processo di saldatura su acciaio **42CrMo4**, al fine di valutare sia la capacità del modello di riprodurre il cordone, che di determinare se questo processo di studio possa avere finalità e modalità estendibili ulteriormente.

La dissertazione è strutturata in **3** capitoli.

Nel primo capitolo viene presentato il software FLOW-3D, insieme ad una introduzione della "user interface", ai fondamenti teorici e numerici alla base del modello termo-fluidodinamico del bagno di fusione, con riferimento alle equazioni di governo e ai modelli specifici per la saldatura laser.

Nel secondo capitolo si descrive l'attività svolta sul software, dalla definizione della geometria e del dominio di calcolo alla scelta della mesh, delle condizioni al contorno e dei parametri di processo, illustrando nel dettaglio il modello numerico adottato per il caso di studio.

Nel terzo capitolo vengono presentati i risultati sperimentali e quelli ottenuti dalla simulazione, comparandoli in termini di geometria del cordone e del bagno di fusione e discutendo le differenze riscontrate.

Infine, nelle conclusioni, si sintetizzano i principali risultati ottenuti, si valuta l'affidabilità del modello e si suggeriscono possibili sviluppi futuri del lavoro.

Capitolo 1

Il software FLOW-3D WELD

1.1 Scopo del software e la sua evoluzione nel tempo

FLOW-3D WELD è una variante specializzata di FLOW-3D dedicata alla simulazione avanzata dei processi di saldatura. Tra le sue finalità principali, vi è quella di modellare il bagno di fusione, simulando quindi la dinamica del materiale fuso, anche in relazione a tutti i parametri caratteristici di un processo di saldatura e dell'azione della fonte di calore.

Altri utilizzi del sistema includono la previsione di difetti, l'analisi di solidificazione e della diffusione del calore nella zona circostante al cordone di saldatura, permettendo anche quindi la possibilità di estendere lo studio, ad analisi di tipo termomeccanico. Come già introdotto, queste capacità lo rendono uno strumento essenziale per l'ottimizzazione dei processi di saldatura in industrie aerospaziale, automotive e navale.

1.1.1 Lo sviluppo di FLOW-3D

L'azienda proprietaria del software viene fondata nel 1985 con il nome di Flow Science Inc. da alcuni ricercatori appartenenti al gruppo di lavoro del Los Alamos International Laboratory, con lo scopo di traferire su un software commerciale, alcune tecnologie di simulazione fluidodinamica sviluppate per fini governativi.

La prima versione concentrava le proprie risorse su applicazioni di tipo idraulico ed era orientato a calcoli tridimensionali di base, con un'interfaccia utente a riga di comando. Nelle versioni successive, il software viene introdotto gradualmente anche al mercato dell'industria aerospaziale e in qualche azienda del settore automotive, per studi come il movimento di fluidi all'interno di serbatoi. Negli anni novanta, venne introdotta un'interfaccia grafica che permetteva anche di visualizzare la struttura della mesh, così come i risultati della simulazione, senza la necessità di plug-in esterni. Lo sviluppo ulteriore del programma permise di ottenere nei primi anni duemila, una struttura di interfaccia basata su 3 "pilastri" quali:

- Pre-processor
- Solver
- Post-processor

rendendo quindi possibile l'utilizzo del software anche a tecnici meno esperti di CFD.

Le versioni successive ampliarono ancor di più il mercato target dello strumento ad aziende quali Hewlett-Packard, che portarono a specifiche simulazioni di getti di inchiostro, ma anche estensioni per processi di fonderia. FLOW-3D si affermò in questo periodo come soluzione affidabile per la simulazione di flussi complessi, con una documentazione arricchita da numerosi casi studio industriali. Nel 2013 la componente grafica del software venne completamente rinnovata, caratterizzata da modularità e pannelli personalizzabili. Dal 2018 vennero sviluppati prodotti derivati specializzati, quali FLOW-3D CAST per i processi di colata e FLOW-3D WELD per le applicazioni di saldatura, tutti basati su un nucleo computazionale comune. La crescita commerciale fu significativa: collaborazioni con enti quali NASA e Boeing validarono l'applicabilità del software in ambito aerospaziale. La pandemia di COVID-19 accelerò la transizione verso architetture cloud. A partire dal 2020, FLOW-3D venne integrato con piattaforme quali AWS e Azure, consentendo l'esecuzione di simulazioni remote scalabili. Al giorno d'oggi Flow Science può essere ritenuta come un'azienda affermata nel settore, con prodotti alla pari di Ansys o CFX.

1.2 Fondamenti tecnici

1.2.1 Panoramica

FLOW-3D WELD è un software sviluppato per risolvere le equazioni non-lineari del moto dei fluidi in configurazioni transienti e tridimensionali. Il software impiega tecniche numeriche specializzate per ottenere soluzioni accurate a problemi multi-scala e multifisica, particolarmente adatti alla simulazione di processi di saldatura dove fenomeni fluidodinamici, termici e metallurgici interagiscono simultaneamente. La soluzione numerica delle equazioni differenziali parziali che governano il moto dei fluidi richiede l'implementazione di un approccio discreto. FLOW-3D WELD suddivide il dominio fisico di interesse in una griglia strutturata di celle rettangolari (brick elements).

Questo approccio permette di rappresentare le grandezze fisiche incognite (pressione, temperatura, velocità) come valori discreti calcolati in punti nodali specifici. La griglia strutturata offre vantaggi computazionali significativi: facilita l'implementazione di algoritmi agli elementi finiti e volumi finiti, garantisce stabilità numerica e trasparenza nella relazione con le equazioni originarie. Un principio fondamentale della metodologia numerica è la convergenza: al diminuire della dimensione delle celle della griglia, la soluzione numerica approssima sempre meglio la soluzione esatta delle equazioni differenziali originarie. Tuttavia, la riduzione della dimensione delle celle comporta un aumento esponenziale del numero di incognite da risolvere, e quindi dei costi computazionali. La scelta della dimensione della griglia rappresenta quindi un compromesso tra l'accuratezza della soluzione desiderata e le risorse computazionali disponibili. FLOW-3D WELD può operare in diverse modalità a seconda della natura del problema da simulare: flussi comprimibili o incompressibili, mono-fluido o bi-fluido. Nel caso della saldatura, il regime prevalente è incomprimi-

bile, sebbene il software disponga di modelli per catturare effetti di comprimibilità limitata quando necessario (ad esempio in processi ad altissima energia).

Un aspetto critico nella simulazione della saldatura è la modellazione della superficie libera del bagno fuso. FLOW-3D WELD implementa il metodo Volume of Fluid (VOF), che consente di tracciare con precisione l'interfaccia bagno-vapore senza ricorrere a mesh adattive. Nel metodo VOF, la frazione volumetrica di fluido in ciascuna cella rappresenta implicitamente la posizione dell'interfaccia, permettendo di catturare fenomeni complessi come la formazione del keyhole (cavità nel bagno) e la dinamica della superficie.

1.2.2 Sistema di coordinate

Le equazioni differenziali che governano il moto dei fluidi in FLOW-3D WELD sono formulate in coordinate cartesiane ortogonali (x, y, z). La particolarità della formulazione adottata dal software risiede nell'introduzione sistematica di funzioni di porosità di area e volume, secondo il metodo FAVORTM (Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method).

Il metodo FAVORTM consente di rappresentare regioni geometriche complesse senza la necessità di conformare la griglia computazionale alla geometria stessa. In questa formulazione, ogni cella della griglia è caratterizzata da due quantità adimensionali: la frazione di volume aperto al flusso (volume porosity) e le frazioni di area aperte al flusso su ciascuna faccia della cella (area porosities). Una frazione di volume unitaria indica che la cella è completamente aperta al flusso, mentre valori inferiori indicano la presenza di un ostacolo solido. Analogamente, le frazioni di area unitarie sulle facce indicano che il flusso può attraversare liberamente, mentre valori inferiori rappresentano ostacoli parziali o baffle porosi.

1.2.3 Equazione di Continuità della Massa

L'equazione di continuità della massa rappresenta il primo principio di conservazione fondamentale in fluidodinamica: la massa non può essere creata né distrutta, ma solo trasformata. In FLOW-3D WELD, questa equazione è formulata come:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{\text{DIF}} + R_{\text{SOR}} \quad (1.1)$$

Analizziamo i componenti di questa equazione nel contesto della saldatura. Il primo termine a sinistra, $V_F \frac{\partial \rho}{\partial t}$, rappresenta la variazione temporale della densità moltiplicata per la frazione di volume aperto al flusso. I tre termini successivi rappresentano i flussi di massa attraverso le facce della cella computazionale nelle tre direzioni coordinate: ciascuno è il prodotto della densità, della componente di velocità e della frazione di area aperta in quella direzione. La somma di questi flussi rappresenta il bilancio netto di massa che entra ed esce da ogni volume di controllo elementare. Sul lato destro dell'equazione, il termine R_{DIF} rappresenta la diffusione turbolenta della massa:

$$R_{\text{DIF}} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_\rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (1.2)$$

Questo termine modella il trasporto diffusivo di massa dovuto alle fluttuazioni turbolente ed è particolarmente rilevante nei processi di saldatura dove il bagno fuso presenta forti moti turbolenti. Il coefficiente di diffusione è proporzionale alla viscosità del fluido attraverso il numero di Schmidt turbolento, una proprietà universale dei flussi turbolenti. Il termine R_{SOR} rappresenta le sorgenti di massa: ad esempio, l'iniezione di fluido attraverso superfici porose o da altre sorgenti distribuite nel dominio.

Nel caso della saldatura, il regime dominante è incomprimibile. Quando la densità del fluido può essere considerata costante (o variabile molto lentamente con la temperatura), l'equazione di continuità si semplifica significativamente in quella che è nota come condizione di incomprimibilità:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho} \quad (1.3)$$

Questa forma esprime un concetto fisicamente importante: il flusso netto di fluido attraverso i confini di un volume di controllo deve eguagliare il tasso di generazione di massa da sorgenti interne. In altre parole, se non ci sono sorgenti di massa, il fluido che entra deve eguagliare il fluido che esce. Nel bagno fuso di una saldatura, questa condizione è quasi sempre soddisfatta perché il liquido è praticamente incomprimibile.

Sebbene rara nella saldatura, esistono situazioni dove è importante catturare la propagazione di onde acustiche (ad esempio nel collasso di bolle di gas nel bagno). In questi casi, FLOW-3D WELD implementa un modello di comprimibilità limitata che approssima la variazione temporale della densità con la variazione di pressione:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.4)$$

dove c è la velocità del suono nel mezzo (circa 4000–5000 m/s per metalli liquidi). Questa approssimazione è valida finché le variazioni di densità rimangono inferiori al 10% del valore medio. Sostituendo questa relazione nella forma generale, si ottiene:

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \frac{1}{\rho c^2} \left(u A_x \frac{\partial p}{\partial x} + v A_y \frac{\partial p}{\partial y} + w A_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho} \quad (1.5)$$

Questa formulazione consente al software di catturare transitori di pressione legati alla propagazione di onde, mantenendo al contempo la semplicità computazionale di un approccio essenzialmente incomprimibile.

1.2.4 Equazioni del Moto (Navier-Stokes)

Le equazioni di moto per le componenti di velocità del fluido (u, v, w) nelle tre direzioni coordinate sono le equazioni di Navier-Stokes, con l'aggiunta di alcuni termini supplementari necessari per il metodo FAVOR™:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho V_F} (u - u_w - u_s) \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho V_F} (v - v_w - v_s) \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho V_F} (w - w_w - w_s) \quad (1.8)$$

Queste equazioni rappresentano l'applicazione della seconda legge di Newton a un elemento fluido infinitesimale. Ogni termine ha un significato fisico distinto: il primo membro contiene la derivata temporale locale (accelerazione) e i termini di advezione (trasporto di quantità di moto); il secondo membro contiene tutte le forze agenti sul fluido per unità di massa.

I termini che compaiono sono:

- (G_x, G_y, G_z) sono le accelerazioni di corpo, principalmente dovute alla gravità, ma che possono includere anche accelerazioni non-inerziali in sistemi di riferimento accelerati;
- (f_x, f_y, f_z) sono le accelerazioni viscosi, che rappresentano la resistenza al moto dovuta alla viscosità del fluido;
- (b_x, b_y, b_z) sono le perdite di flusso in media porosa o attraverso baffle porosi, e gli ultimi termini rappresentano l'effetto dell'iniezione di massa da parte di una sorgente;
- $\mathbf{U}_w = (u_w, v_w, w_w)$ è la velocità della sorgente di massa, generalmente non nulla in caso di sorgenti mobili (General Moving Objects Model, GMO);
- $\mathbf{U}_s = (u_s, v_s, w_s)$ è la velocità del fluido sulla superficie della sorgente relativa alla sorgente stessa.

Per una viscosità dinamica variabile μ , le accelerazioni viscosi sono espresse come:

$$\rho V_F f_x = w s x - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) \right\} \quad (1.9)$$

$$\rho V_F f_y = w s y - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) \right\} \quad (1.10)$$

$$\rho V_F f_z = w s z - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \right\} \quad (1.11)$$

dove gli sforzi viscosi sono definiti come:

$$\tau_{xx} = -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \quad (1.12)$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \quad (1.13)$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \quad (1.14)$$

$$\tau_{xy} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \quad \tau_{xz} = -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \quad \tau_{yz} = -\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \quad (1.15)$$

Questi sforzi seguono la legge costitutiva di Newton per fluidi newtoniani, dove gli sforzi normali includono un termine di traccia sottratto per garantire la traccia corretta dello sforzo deviatorico. Nel contesto della saldatura, la viscosità del metallo liquido varia significativamente con la temperatura, diminuendo all'aumentare della temperatura e aumentando drasticamente nella zona mushy (miscela di solido e liquido).

Il termine \mathbf{U}_s rappresenta la velocità del fluido sulla superficie della sorgente relativa alla sorgente stessa, calcolata in ciascun volume di controllo come:

$$\mathbf{U}_s = \frac{dQ}{\rho_Q dA} \mathbf{n} \quad (1.16)$$

dove dQ è il tasso di flusso di massa, ρ_Q è la densità del fluido della sorgente, dA è l'area della superficie della sorgente nella cella, e \mathbf{n} è la normale esterna alla superficie. Quando $\delta = 0.0$ nella formulazione della sorgente, si ha una *stagnation pressure source*, dove il fluido entra nel dominio a velocità nulla e la pressione deve costruirsi per spingere il fluido lontano dalla sorgente. Quando $\delta = 1.0$, si ha una *static pressure source*, dove la velocità è calcolata direttamente dal tasso di flusso di massa. Nel caso di una sorgente statica a pressione, la velocità del fluido è calcolata dal tasso di flusso di massa e dall'area della superficie della sorgente. In questo caso, nessuna pressione supplementare è richiesta per spingere il fluido lontano dalla sorgente. Un esempio di tale sorgente è il fluido che emerge da un tubo diritto lungo. In questo caso, il momento del fluido emergente è creato lontano da dove la sorgente è localizzata. La distinzione tra questi due tipi di sorgenti è importante quando la forza agente dal fluido sulla componente della sorgente deve essere calcolata accuratamente, come nel caso di componenti accoppiati al movimento (GMO coupled-motion components). Si noti che la proprietà di pressione statica o di stagnazione non si applica alle sorgenti negative, cioè agli assorbitori.

Questi sforzi seguono la legge costitutiva di Newton per fluidi newtoniani, dove gli sforzi normali includono un termine di traccia sottratto per garantire la traccia corretta dello sforzo deviatorico. Nel contesto della saldatura, la viscosità del metallo liquido varia significativamente con la temperatura, diminuendo all'aumentare della temperatura e aumentando drasticamente nella zona mushy (miscela di solido e liquido).

Una caratteristica importante della formulazione FAVORTM è che gli sforzi di taglio a parete (τ_w) sorgono naturalmente dalle equazioni sopra. Se questi termini fossero omessi, non ci sarebbe sforzo di taglio a parete perché i termini rimanenti contenebbero le frazioni di area di flusso (A_x, A_y, A_z), che si annullano alle pareti (dove

non c'è flusso). Gli sforzi di taglio a parete sono modellati assumendo una velocità tangenziale nulla sulla porzione di area chiusa al flusso. I confini della mesh e gli ostacoli mobili (moving obstacles) costituiscono un'eccezione, poiché possono avere velocità tangenziali non nulle assegnate. In questo caso, il moto consentito del confine corrisponde a una traslazione rigida della parete parallela alla sua superficie. Per flussi turbolenti, FLOW-3D WELD implementa un profilo di velocità logaritmico (law-of-the-wall) nella regione vicino alla parete, che modifica l'ampiezza dello sforzo di taglio a parete. Questo approccio consente di catturare accuratamente la dinamica dello strato limite turbolento senza necessità di raffinare eccessivamente la mesh nella regione prossimale alla parete, riducendo significativamente il costo computazionale mantenendo l'accuratezza della soluzione.

1.2.5 Moto in Riferimenti Non-Inerziali

Per applicazioni che coinvolgono fluidi in movimento all'interno di contenitori mobili o rotanti, ad esempio, è utile modificare le equazioni del moto per includere una formulazione generale delle accelerazioni non-inerziali. La forma di tali accelerazioni agenti su un elemento fluido in posizione \mathbf{r} e che si muove con velocità \mathbf{u} è:

$$\mathbf{G} = \mathbf{g} - \left\{ \dot{\mathbf{U}} + \boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{r} - \mathbf{R}) + \boldsymbol{\Omega} \times \dot{\mathbf{R}} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} + \boldsymbol{\Omega} \times [\boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{r} - \mathbf{R})] \right\} \quad (1.17)$$

In questa espressione, \mathbf{g} è l'accelerazione gravitazionale costante e $\dot{\mathbf{U}}$ è l'accelerazione traslazionale del punto \mathbf{R} nel sistema di coordinate della mesh rispetto a un riferimento inerziale. L'equazione (16) è facilmente derivabile dall'Eq. 3.2.9 in [Bat83] mediante una traslazione dell'origine.

L'inclusione del vettore \mathbf{R} è utile in applicazioni con corpi rigidi, dove \mathbf{R} è spesso scelto come il centro di massa del corpo. Se questa scelta è fatta e nessuna forza esterna agisce sul sistema, allora $\dot{\mathbf{U}} = 0$. Frequentemente l'origine del sistema di coordinate fisso al corpo (mesh) è posizionata al centro di gravità, nel qual caso $\mathbf{R} = 0$. L'utente può specificare accelerazioni gravitazionali costanti attraverso il termine \mathbf{g} o accelerazioni traslazionali dipendenti dal tempo attraverso il termine $\dot{\mathbf{U}}$.

Per utilizzare questa opzione più generale o per accelerazioni più complesse, l'utente deve specificare le quantità $\dot{\mathbf{U}}$, $\boldsymbol{\Omega}$ e $\dot{\boldsymbol{\Omega}}$ nella subroutine riservata a questo scopo (*motion*). Queste quantità devono essere espresse nel sistema di coordinate fisso al corpo. Le componenti delle accelerazioni locali sperimentate dal fluido sono calcolate automaticamente dal programma a partire dalle nove componenti del moto di riferimento non-inerziale attraverso l'equazione (16). Questo è un calcolo completamente generale e non richiede intervento da parte dell'utente.

Per casi speciali, l'utente deve fornire una routine di *motion* per ogni nuova applicazione. La versione standard di *motion* può gestire un numero limitato di situazioni attraverso dati di input. Questi includono variazioni armoniche dei componenti di accelerazione e specificazioni tabulari, inclusi impulsi.

Un caso particolare speciale del riferimento non-inerziale è gestito dal modello di dinamica di corpo rigido accoppiato implementato in FLOW-3D WELD. Questo modello risolve le equazioni dinamiche per il movimento di un corpo rigido nel quale

il riferimento computazionale è incorporato.

1.2.6 Interfacce Fluide e Superfici Libere

Uno degli aspetti più critici della simulazione della saldatura è la corretta modellazione della superficie libera del bagno fuso, l'interfaccia tra il metallo liquido e l'atmosfera circostante (vapore, aria o gas protettivo). La forma e la dinamica di questa interfaccia determinano non solo l'aspetto finale della saldatura, ma anche fenomeni fisici fondamentali come il trasferimento termico verso l'ambiente, la formazione di difetti critici come il keyhole (cavità nel bagno), e l'interazione tra la sorgente di calore e il bagno fuso. FLOW-3D WELD impiega il metodo Volume of Fluid (VOF) per tracciare con precisione questa interfaccia senza ricorrere a mesh adattive, permettendo una simulazione robusta e accurata di geometrie complesse.

Le configurazioni fluide sono definite in termini di una funzione di frazione volumetrica di fluido (VOF), $F(x, y, z, t)$. Questa funzione rappresenta il volume di fluido 1 per unità di volume e soddisfa l'equazione di trasporto:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) \right] = F_{\text{DIF}} + F_{\text{SOR}} \quad (1.18)$$

dove il termine F_{DIF} rappresenta la diffusione della frazione fluida:

$$F_{\text{DIF}} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \right\} \quad (1.19)$$

Il coefficiente di diffusione è definito come $\nu_F = cF\mu/\rho$, dove cF è una costante il cui reciproco è talvolta indicato come il numero di Schmidt turbolento. Questo termine di diffusione ha significato fisico solo per il mixing turbolento di due fluidi la cui distribuzione è definita dalla funzione F .

Il termine F_{SOR} corrisponde al termine sorgente di densità R_{SOR} dell'equazione (1); F_{SOR} è il tasso di variazione temporale della frazione volumetrica di fluido 1 associato con la sorgente di massa per il fluido 1.

L'interpretazione di F dipende dal tipo di problema da risolvere. I problemi incomprimibili devono coinvolgere sia un singolo fluido con superficie libera, sia due fluidi senza superfici libere. Per un singolo fluido, F rappresenta la frazione volumetrica occupata dal fluido. Il fluido esiste dove $F = 1$, mentre le regioni vuote corrispondono a locazioni dove $F = 0$. Le "vuoti" sono regioni senza massa di fluido che hanno una pressione uniforme assegnata. Fisicamente, esse rappresentano regioni riempite con vapore o gas la cui densità è trascurabile rispetto alla densità del fluido.

Per problemi a due fluidi, la composizione può essere costituita da due fluidi incomprimibili oppure da uno incomprimibile e uno comprimibile. In entrambi i casi, F rappresenta la frazione volumetrica della componente fluida incompressibile, indicata come fluido 1. La regione complementare con frazione volumetrica $1 - F$ rappresenta il fluido 2 e può avere densità costante oppure la densità calcolata dall'equazione di stato del fluido comprimibile.

Nel contesto specifico della saldatura, il metodo VOF è impiegato per tracciare l'interfaccia tra il bagno fuso liquido ($F = 1$) e il vapore/aria circostante ($F = 0$). Questo tracciamento accurato è essenziale per diverse ragioni. Primo, la forma del bagno fuso è uno degli output più importanti e facilmente verificabili sperimentalmente della simulazione, permettendo di validare l'accuratezza complessiva del modello. Secondo, la dinamica della superficie influenza il trasferimento termico verso l'ambiente: una superficie piana ha proprietà radiative diverse da una superficie fortemente ondulata o coperta di ossidi. Terzo, in processi ad alta energia come la saldatura laser o con fascio di elettroni, la pressione di vapore sulla superficie può generare una cavità nel bagno (il fenomeno del keyhole), la cui stabilità e geometria sono critiche per la qualità della saldatura. Quarto, il tracciamento accurato della superficie libera consente di applicare correttamente le condizioni al contorno, come la tensione superficiale e le condizioni di trasferimento termico convettivo/radiativo all'interfaccia.

1.2.7 Equazioni dell'Energia del Fluido

Per problemi di flusso comprimibile o con trasferimento termico, l'equazione dell'energia interna è fondamentale per determinare il campo di temperatura nel dominio. Nel contesto della saldatura, questa equazione governa la distribuzione di calore nel bagno fuso ed è accoppiata alle equazioni del moto e della continuità attraverso la dipendenza della viscosità e della densità dalla temperatura.

L'equazione generale dell'energia interna è:

$$\begin{aligned} & V_F \frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho I u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho I v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho I w A_z)}{\partial z} = \\ & = -p \left(\frac{\partial(u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(w A_z)}{\partial z} \right) + R_{\text{DIF}} + T_{\text{DIF}} + R_{\text{SOR}} \end{aligned} \quad (1.20)$$

dove I è l'energia interna macroscopica specifica del fluido. Per problemi a due fluidi, l'equazione (19) è risolta separatamente per ciascun fluido. Per il fluido 1:

$$\rho I = F \rho_1 I_1 \quad (1.21)$$

e per il fluido 2:

$$\rho I = (1 - F) \rho_2 I_2 \quad (1.22)$$

dove F è la frazione volumetrica del fluido 1 e i pedici indicano quantità relative al fluido 1 o al fluido 2.

In generale, l'energia termica del fluido è assunta essere una funzione lineare piecewise della temperatura:

$$I(T) = C_V(T_1)T_1 + \sum_{i=2, N} 0.5[C_V(T_{i-1}) + C_V(T_i)](T - T_{i-1}) \quad (1.23)$$

dove T_i e $C_V(T_i)$ denotano temperature e valori di calore specifico nella definizione tabulare di $C_V(T)$, e N è tale che $T_{N-1} < T \leq T_N$.

Il calore latente rilasciato durante la solidificazione e la fusione, fenomeno che può verificarsi solo nel fluido 1, è considerato con un termine aggiuntivo nell'equazione (22):

$$I(T, f_s) = I(T) + (1 - f_s)L \quad (1.24)$$

dove f_s è la frazione solida e L è il calore latente di trasformazione di fase. Nel contesto della saldatura, il calore latente rappresenta un fenomeno fisico critico. Quando il materiale solidifica, passando da liquido a solido, una quantità significativa di energia viene rilasciata (per l'acciaio, circa 260 kJ/kg). Questa energia deve essere dissipata nel materiale circostante affinché la solidificazione proceda. La mancata considerazione di questo calore latente porterebbe a stime completamente errate dei tempi di solidificazione, della velocità di raffreddamento, e della distribuzione di temperatura nel materiale base, influenzando tutte le previsioni metallurgiche della simulazione.

Il calore latente può essere definito in due modi. Il metodo più semplice consiste nel specificare la temperatura di solidus (T_S), la temperatura di liquidus (T_L) e l'energia specifica della trasformazione di fase che si verifica tra queste due temperature (L_{HT}). In questo caso il calore latente è applicato linearmente con la temperatura tra T_L e T_S . In molti materiali reali, tuttavia, il rilascio del calore latente non è una funzione lineare della temperatura. In questo caso, il calore latente può essere definito come funzione tabulare della temperatura. Ciò può essere fatto nella forma di energia specifica versus temperatura oppure di frazione solida versus temperatura.

Solo il fluido 1 può subire una trasformazione di fase liquido-solido o solido-solido. Sia la solidificazione che la fusione sono consentite. La contrazione di solidificazione è un'opzione separata che può essere attivata. È inoltre permesso avere $T_S = T_L$, il che implica una discontinuità nella relazione energia-versus-temperatura.

L'equazione dell'energia include due termini diffusivi sul lato destro. Il termine R_{DIF} rappresenta la diffusione turbolenta dell'energia dovuta alle fluttuazioni turbolente del fluido, analogo al termine già discusso nell'equazione di continuità. Il termine T_{DIF} rappresenta la conduzione termica molecolare governata dalla conducibilità termica del fluido:

$$T_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(kA_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kA_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kA_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1.25)$$

Nel bagno fuso di una saldatura, il trasporto di energia è dominato dall'advezione (il primo membro dell'equazione), cioè dal trasporto di calore dovuto al moto del fluido. La convezione accelera significativamente l'omogeneizzazione della temperatura nel bagno rispetto alla sola conduzione, distribuendo il calore lontano dalla sorgente di calore a distanze molto maggiori.

Il termine R_{SOR} rappresenta le sorgenti di energia nel dominio. Nelle simulazioni di saldatura, questo termine è di importanza cruciale poiché rappresenta la sorgente di calore (laser, arco elettrico, fascio di elettroni, o resistenza) che alimenta l'intero processo. A seconda del tipo di saldatura simulato, la sorgente di calore può essere

modellata come una distribuzione gaussiana di flusso termico sulla superficie del bagno, come una distribuzione volumetrica di generazione di calore, oppure attraverso modelli più sofisticati che includono la fisica dell'arco o del laser.

1.2.8 Diffusione Termica e Sorgenti

I due processi diffusivi inclusi nell'equazione (19) sono: il primo (R_{DIF}) rappresenta la diffusione turbolenta dell'energia interna, mentre il secondo (T_{DIF}) rappresenta la conduzione termica. Questi termini sono definiti come:

$$R_{\text{DIF}} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_I A_x \frac{\partial \rho I}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_I A_y \frac{\partial \rho I}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_I A_z \frac{\partial \rho I}{\partial z} \right) \quad (1.26)$$

$$T_{\text{DIF}} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k A_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k A_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k A_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1.27)$$

Come nel caso dell'energia in generale, la temperatura nell'equazione (25) è specifica per ciascun fluido in problemi a due fluidi. Il coefficiente ν_I è uguale a $c_I \mu / \rho$, dove c_I è il reciproco del numero di Prandtl turbolento. Nel termine di conduzione termica, la conducibilità termica k può essere specificata direttamente oppure il numero di Prandtl C_T può essere specificato, nel qual caso la conducibilità è calcolata come $k = \mu C_v / C_T$. Per problemi a due fluidi, le conducibilità termiche per ciascun fluido sono pesate localmente dalla frazione volumetrica di fluido F .

L'ultimo termine, R_{SOR} , sul lato destro dell'equazione (19) è un termine sorgente di energia. Le sorgenti possono essere associate alla sorgente di massa R_{SOR} dell'equazione di continuità, a meccanismi di trasferimento termico ai confini solidi, o a sorgenti di calore distribuite all'interno del fluido.

1.2.9 Equazione della Temperatura della Struttura

Se l'opzione di trasferimento termico è attivata nell'input ($\text{ITRC} > 0$), le temperature dinamiche delle strutture di calore possono essere valutate da FLOW-3D WELD. Le strutture termiche possono essere sia confini di pareti della mesh che ostacoli. L'equazione più generale risolta per le temperature dinamiche della struttura è:

$$\begin{aligned} (1 - V_F) \rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[k_w (1 - A_x) \frac{\partial T_w}{\partial x} \right] - \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left[k_w (1 - A_y) \frac{\partial T_w}{\partial y} \right] - \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left[k_w (1 - A_z) \frac{\partial T_w}{\partial z} \right] = T_{\text{SOR}} \end{aligned} \quad (1.28)$$

dove:

- T_w è la temperatura della struttura solida;
- ρ_w , C_w e k_w sono i valori del materiale solido di densità, calore specifico e conducibilità termica;

- T_{SOR} è un termine sorgente di energia specifica composto da contributi di sorgenti esterne specificate e dal trasferimento di calore solido-liquido.

La valutazione del trasferimento di calore è discussa nella documentazione dedicata al trasferimento termico di struttura.

Nel contesto della saldatura, questa equazione è cruciale perché governa come il calore dalla zona fusa si propaga nel materiale base. Il tasso di diffusione del calore dipende criticamente dalla conducibilità termica del materiale: acciai con alta conducibilità termica dissiperanno il calore più rapidamente, risultando in una zona termicamente alterata (Heat Affected Zone, HAZ) più ampia ma meno severa. Materiali con bassa conducibilità termica concentreranno il calore nella zona di saldatura, creando gradienti termici più acuti e una HAZ più ristretta. La corretta previsione della geometria e dell'intensità della HAZ è fondamentale per valutare la qualità metallurgica della saldatura e la sua resistenza meccanica.

Alcuni ostacoli o confini di pareti possono essere trattati con un modello di temperatura concentrata (lumped temperature model). In questo caso, l'intera struttura è assunta essere a una temperatura uniforme, il che elimina il termine di conduzione e risulta in:

$$M_w C_w \frac{dT_w}{dt} = IT_{\text{SOR}} \quad (1.29)$$

dove M_w è la massa della struttura e IT_{SOR} è il termine sorgente di energia integrato su volume e/o area.

Questo modello semplificato è utile quando la struttura è sufficientemente piccola o conduce il calore sufficientemente bene da mantenere una temperatura praticamente uniforme, oppure quando si desidera ridurre il costo computazionale senza perdere significativamente in accuratezza. Il modello di temperatura concentrata è particolarmente appropriato per strutture di supporto di piccole dimensioni o per utensili che non sono critici per la qualità della saldatura.

1.2.10 Equazione di Stato

Le equazioni di stato per fluidi comprimibili sono assunte avere la forma:

$$\rho = \rho(p, T) \quad (1.30)$$

Una singola energia di miscela generalmente non è sufficiente per determinare stati fluidi separati per problemi a due materiali. Pertanto, si assume che i due materiali abbiano la stessa temperatura, la quale partiziona l'energia tra i materiali. Un'equazione di stato per gas perfetto è disponibile per default in FLOW-3D WELD per fluidi comprimibili. Per flussi termicamente galleggianti, le densità del fluido sono funzioni della temperatura.

Nel caso di fluidi incomprimibili, questi generalmente hanno una densità costante e uniforme. Tuttavia, è possibile anche definire una densità non uniforme in un fluido incomprimibile.

1.2.11 Regioni Vuote e Flussi a Superficie Libera

Molti calcoli che coinvolgono il flusso di liquidi e gas possono essere idealizzati come flussi a "superficie libera". Questo tipo di flusso è analizzato trattando il gas come una regione di pressione e temperatura uniforme, il che libera l'utente dalla necessità di determinare la dinamica dettagliata del gas. Nei calcoli a superficie libera, FLOW-3D WELD identifica la regione occupata dal fluido come quella dove la funzione di frazione fluida è non nulla. I calcoli a superficie libera hanno regioni in cui la frazione fluida è nulla. Ciascuna di tali regioni è chiamata una "regione vuota" (o talvolta una "bolla"). Le regioni vuote possono essere separate l'una dall'altra da celle di fluido, ostacoli o baffle. Queste regioni rappresentano fisicamente volumi occupati da gas. L'algoritmo di soluzione VOF non risolve la dinamica del gas in queste regioni; invece, le tratta come regioni di pressione uniforme, il che rappresenta normalmente un'eccellente approssimazione. Alcuni calcoli possono combinare diversi modelli per regioni diverse o persino per la stessa regione vuota in tempi diversi. L'uso di una singola pressione per ciascuna regione vuota connessa presuppone che le onde sonore attraversino la regione in tempi molto più brevi di quelli associati a cambiamenti nella configurazione del fluido incomprimibile circostante, oltre a trascurare le variazioni di pressione associate al peso e all'inerzia del gas. Queste assunzioni sono, tuttavia, sufficientemente accurate per molti problemi di interesse pratico.

Nel contesto della saldatura, questo approccio è particolarmente rilevante. La regione vuota rappresenta l'atmosfera circostante il bagno fuso (aria, vapore, o gas protettivo), mentre il fluido rappresenta il metallo liquido. Trattando il gas come una regione di pressione uniforme, FLOW-3D WELD evita di dover simulare la complessa dinamica dell'atmosfera, che non è generalmente critica per la qualità della saldatura. Invece, il codice si concentra sulla dinamica del bagno fuso, che è il fenomeno fisicamente determinante. Questa semplificazione consente di ridurre significativamente il costo computazionale mantenendo l'accuratezza della simulazione nella regione di interesse. Tuttavia, in processi ad alta energia come la saldatura laser o con fascio di elettroni, la pressione di vapore sulla superficie del bagno diventa significativa e può influenzare la formazione del keyhole (cavità nel bagno). In questi casi, l'approccio della regione vuota a pressione uniforme rimane valido finché la pressione di vapore non è estremamente elevata, permettendo al modello di catturare gli effetti principali della vaporizzazione sulla dinamica del bagno.

1.2.12 Regioni Vuote a Pressione Costante

Quando le densità del fluido e del gas differiscono significativamente, allora le piccole variazioni di pressione all'interno del gas e l'inerzia del gas possono essere trascurate rispetto a quelle nel fluido. Ad esempio, il rapporto tra le densità dell'acqua e dell'aria è circa 1000. In questi casi, ciascuna regione vuota può essere trattata come una regione a pressione uniforme. In FLOW-3D WELD, tali flussi sono descritti con il modello mono-fluido con confini del gas trattati come superfici libere.

Se il gas non subisce cambiamenti di volume (cioè, compressione o espansione), allora si può inoltre assumere che la pressione delle regioni vuote sia costante nel tempo ("vuoti ventilati"). Il modello di regione vuota a pressione costante funziona

bene, ad esempio, per flussi in canali aperti dove il gas è aria a pressione atmosferica. Un altro esempio è il riempimento di uno stampo di sabbia con metallo liquido dove la porosità della sabbia assicura che l'aria nello stampo sfugga senza rimanere intrappolata.

Se il vuoto è connesso a un confine di pressione specificato, allora il vuoto assume la pressione specificata a quel confine, la quale può essere una funzione del tempo.

Nel contesto della saldatura, questa approssimazione è generalmente valida. Il rapporto tra la densità dell'acciaio liquido e dell'aria è circa 7000, rendendo completamente trascurabili gli effetti dell'inerzia e della compressione dell'aria. La pressione nelle regioni vuote intorno al bagno fuso è assunta essere praticamente costante (pressione atmosferica o pressione del gas protettivo, a seconda della configurazione). Questa semplificazione riduce significativamente il costo computazionale poiché non è necessario risolvere alcuna equazione per il gas, permettendo al codice di concentrare le risorse computazionali sulla soluzione accurata della dinamica del bagno fuso, che è la regione fisicamente determinante per la qualità della saldatura.

1.3 Descrizione dell'interfaccia utente

1.3.1 Struttura generale dell'interfaccia

L'ambiente grafico di FLOW-3D si organizza in una logica modulare che segue il flusso di lavoro tipico del lavoro al CFD. Si distinguono quindi 4 moduli principali, navigabili liberamente durante tutto il corso della simulazione:

- Simulation Manager: gestisce l'organizzazione dei progetti, l'esecuzione delle simulazioni e il monitoraggio dello stato di avanzamento
- Model Setup: contiene tutti gli strumenti per la definizione del modello fisico, della geometria, delle condizioni al contorno e dei parametri numerici
- Analyze: fornisce strumenti per l'analisi quantitativa dei risultati mediante grafici e curve temporali
- Display: permette la visualizzazione tridimensionale dei risultati, con rendering volumetrico e superficiale del flusso



Figura 1.1: Visualizzazione dei 4 moduli

Questa struttura permette all'utente di navigare in modo sequenziale attraverso le fasi di preparazione, esecuzione e post-elaborazione della simulazione, mantenendo sempre visibile lo stato del progetto e l'accesso immediato agli strumenti necessari.

1.3.2 Struttura e funzionalità del Model Setup

Il primo modulo che viene interessato dal flusso di lavoro dell'utente, è quello del Model Setup, il quale rappresenta l'ambiente in cui vengono definiti tutti gli aspetti del problema di simulazione. In Figura 1.2 viene mostrata la suddivisione del pannello grafico del modulo in:

- Zona di selezione dell'area di lavoro
- Scheda di definizione delle proprietà
- Pannello di visualizzazione grafica

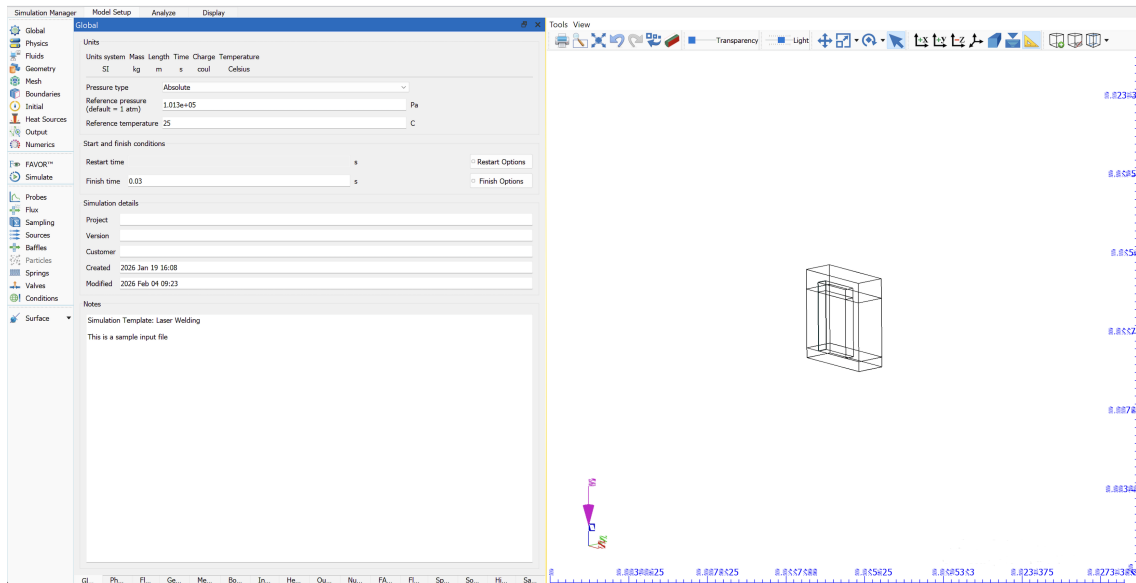


Figura 1.2: Interfaccia del modulo Model Setup mostrante la configurazione delle condizioni globali

All'interno di questa sezione si suddividono, a loro volta, più schede atte a definire in ciascuna di esse, una parte degli aspetti della simulazione.

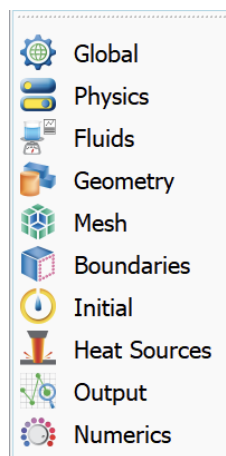


Figura 1.3: Selezione verticale delle schede

Per chiarezza, si descrive ogni pannello in una sua sezione dedicata.

Global

La sezione *Global* contiene le impostazioni fondamentali che definiscono il contesto generale della simulazione. Qui vengono definiti i parametri relativi a:

- Sistema di unità: scelta tra sistemi metrici (SI, CGS) o anglosassoni (Imperial), che determina automaticamente le unità di tutte le grandezze fisiche
- Costanti fisiche: gravità, temperatura di riferimento, pressione atmosferica
- Dimensionalità del problema: possibilità di forzare simmetrie bidimensionali o assialsimmetriche per ridurre il costo computazionale
- Opzioni temporali globali: definizione se il problema è stazionario (steady-state) o transitorio

Queste impostazioni hanno impatto su tutti gli altri moduli e devono essere definite prima di procedere con la configurazione dettagliata.

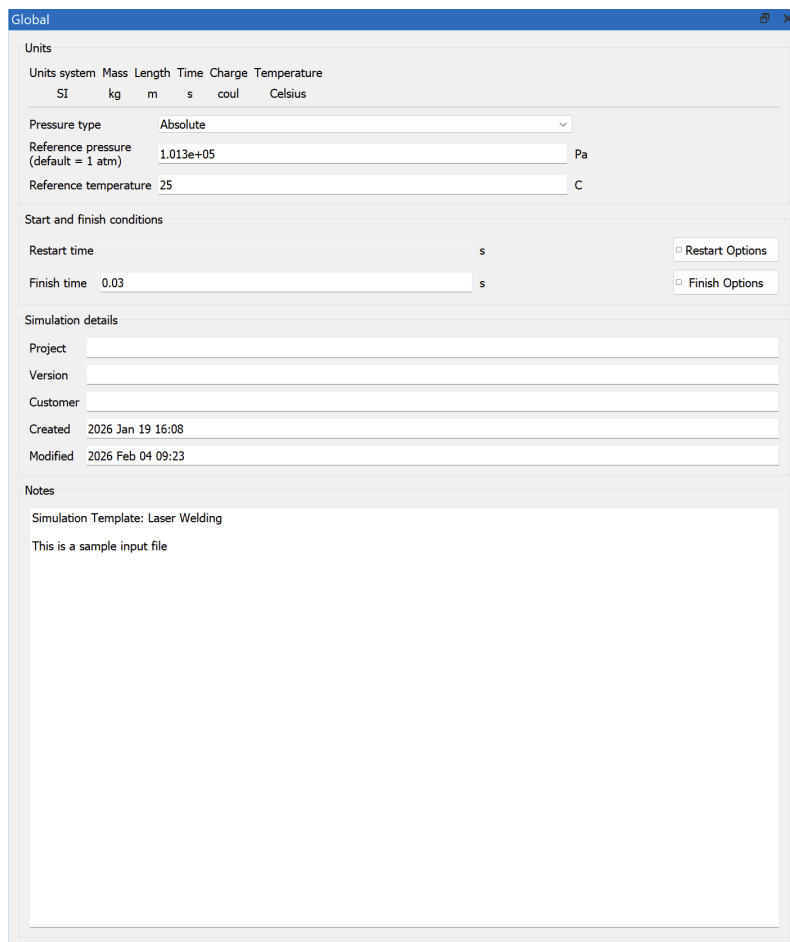


Figura 1.4: Interfaccia della scheda Global

Physics

In questa finestra, invece, si selezionano ed attivano, varie configurazioni dei modelli fisici caratteristici della simulazione che si vuole andare a sviluppare. Ciascun modello fisico, una volta attivato, espone un pannello di configurazione dedicato con i parametri specifici richiesti. L'interfaccia adotta una logica di divulgazione progressiva, dove vengono mostrate all'utente solo le opzioni dei vari modelli, utili alla configurazione specifica del problema fisico che si vuole ottenere.

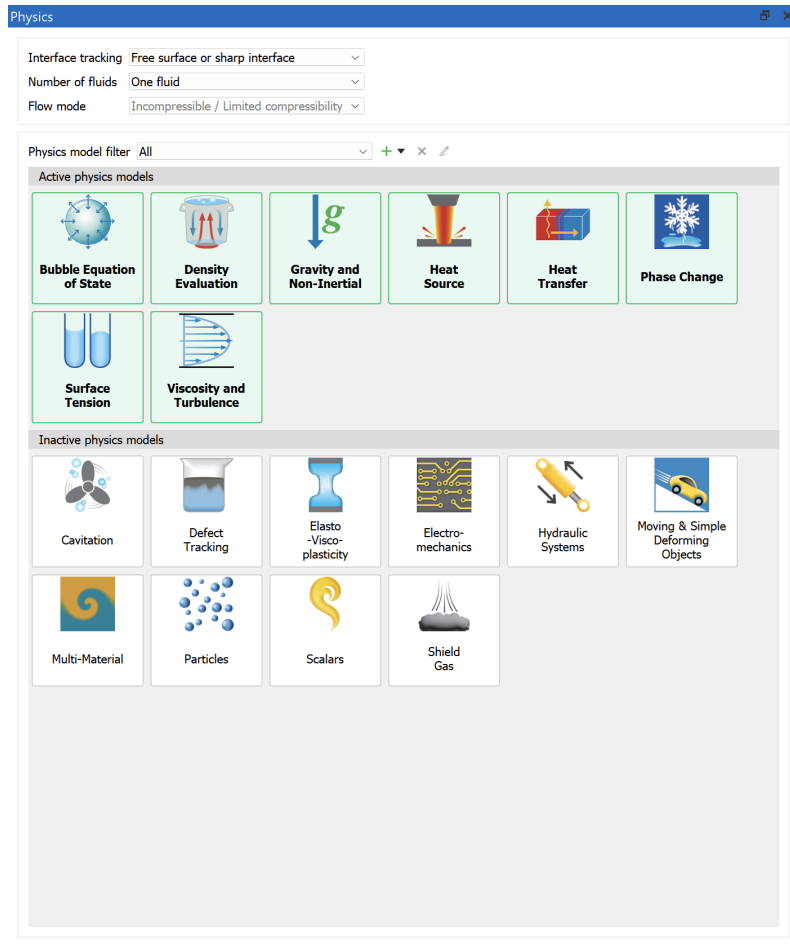


Figura 1.5: Interfaccia della scheda Physics

Come si può notare in Figura 1.5 le varie caratteristiche fisiche possono essere selezionate singolarmente, attraverso caselle, ed eventualmente anche disattivate nel caso in cui non vi sia la necessità di simulare certi fenomeni.

Possono essere abilitate le seguenti:

- **Modelli di turbolenza:** selezione tra modelli RANS (k- ϵ standard, RNG k- ϵ , k- ω) o LES
- **Trasferimento di calore:** attivazione dell'equazione dell'energia, con possibilità di includere conduzione, convezione e irraggiamento
- **Cambiamenti di fase:** modelli per solidificazione, fusione, evaporazione
- **Tensione superficiale:** attivazione degli effetti capillari con specificazione del coefficiente di tensione superficiale
- **Cavitazione:** modelli per la formazione e il collasso di bolle di vapore
- **Specie chimiche:** trasporto e diffusione di componenti multipli
- **Sedimentazione e drift:** modelli per particelle solide nel flusso

Fluids

La sezione *Fluids* permette di caratterizzare le proprietà appunto dei fluidi presenti nella simulazione, attraverso la definizione di parametri, range o definendo alcune caratteristiche un funzione di grandezze come temperatura o tempo.

FLOW-3D permette di sviluppare simulazioni monofase, ovvero caratterizzate da un singolo fluido, oppure bifase, cioè caratterizzate da due fluidi immiscibili.

Nel flusso di lavoro, questa può essere ritenuta come una delle fasi focali per garantire un risultato fedele ed efficiente, in quanto descrivere le proprietà del modello in modo erroneo o non accurato, può compromettere la simulazione. L'operatore andrà quindi a definire le seguenti specifiche:

- Proprietà termofisiche: densità, viscosità dinamica o cinematica, calore specifico, conducibilità termica
- Dipendenza dalla temperatura: possibilità di definire proprietà variabili mediante tabelle o correlazioni
- Modello di viscosità: fluido newtoniano o modelli non-newtoniani
- Comprimibilità: opzioni per fluidi debolmente comprimibili o gas ideali

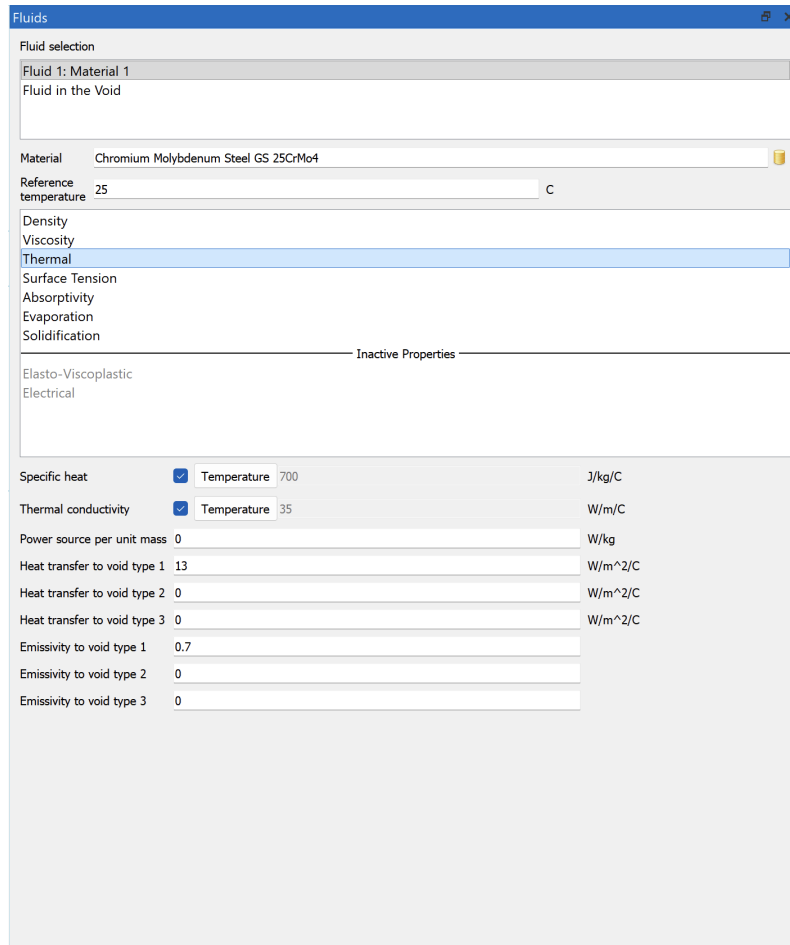


Figura 1.6: Interfaccia della scheda Fluids, durante la visualizzazione delle proprietà di tipo termico

La trattazione analitica delle specifiche per ogni pagina di questa sezione è demandata al capitolo seguente, al fine di prevenire ridondanze e consentire una digressione mirata sulla modellazione simulativa.

Mesh

La definizione della griglia computazionale avviene nella sezione Mesh. Come illustrato nei fondamenti tecnici, FLOW-3D utilizza griglie cartesiane strutturate attraverso il metodo FAVORTM, risultando in un modello più semplice e robusto, rispetto ad una mesh di tipo body-fitted. L'interfaccia fornisce un feedback immediato sulla qualità della griglia e sul costo computazionale stimato. Il pannello di meshing permette di:

- Definire i limiti del dominio: estensione nelle direzioni x, y, z del volume computazionale
- Specificare la risoluzione: numero di celle nelle tre direzioni, con possibilità di griglie uniformi o non uniformi
- Creare raffinamenti locali: blocchi di griglia annidati (nested meshes) o multipli (linked meshes) per concentrare la risoluzione in regioni di interesse
- Visualizzare statistiche: numero totale di celle, dimensione minima e massima degli elementi, rapporto di aspect ratio

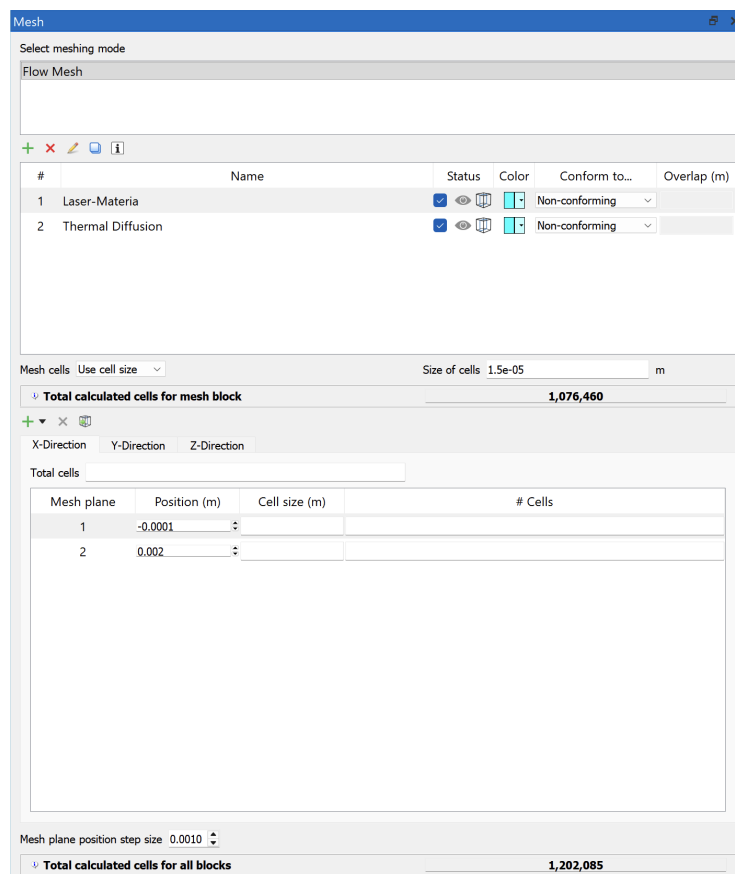


Figura 1.7: Interfaccia della scheda Mesh, con distinzione tra una zona diffusione termica e una di interazione con laser

Boundary Conditions

Le condizioni al contorno vengono inserite nell'omonima pagina, dove viene definito il dominio computazionale, ovvero un parallelepipedo rettangolo virtuale che possiede sei facce ($xmin$, $xmax$, $ymin$, $ymax$, $zmin$, $zmax$), per ciascuna delle quali l'utente definisce il tipo di condizione:

- Wall: parete impermeabile, con specificazione di rugosità e condizioni termiche
- Symmetry: piano di simmetria
- Outflow: uscita del flusso, con condizioni di continuità
- Pressure: pressione specificata, tipicamente utilizzata per ingressi o uscite
- Velocity: velocità prescritta, per ingressi con portata nota
- Volume flow rate: portata volumetrica specificata
- Wave: generazione di onde superficiali con parametri di altezza, periodo e direzione

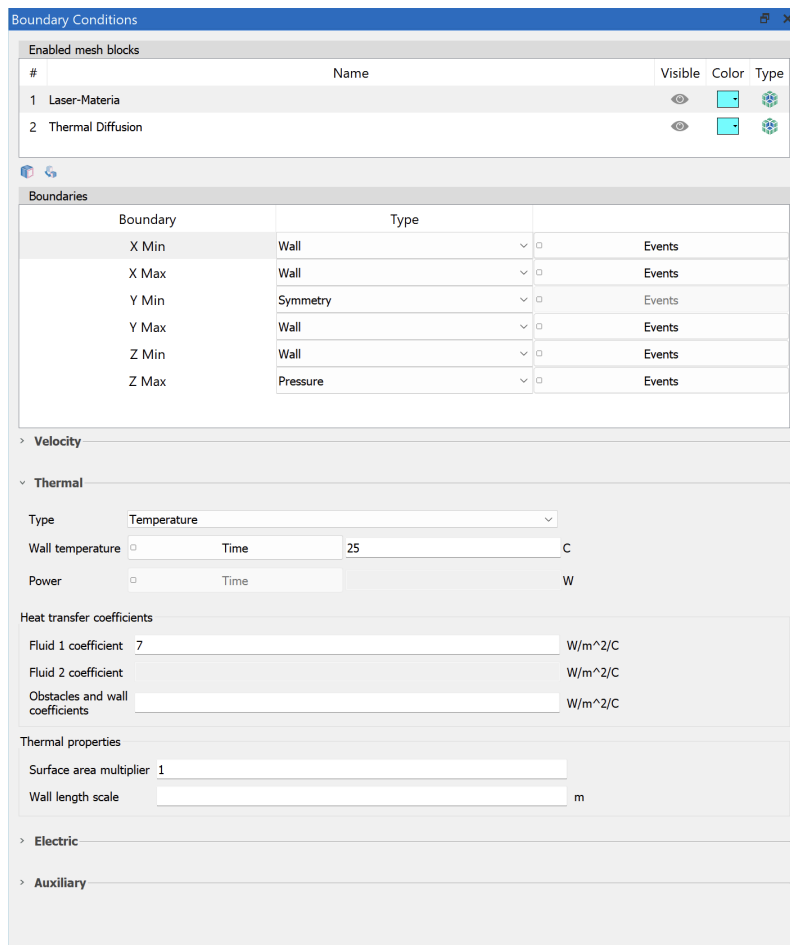


Figura 1.8: Interfaccia della scheda Boundary Conditions

Initial

La sezione *Initial* definisce lo stato iniziale del fluido nel dominio al tempo $t = 0$. L'operatore specifica:

- Configurazione del fluido: regione inizialmente occupata dal fluido, definita mediante primitive geometriche o funzioni
- Campo di velocità iniziale: velocità uniforme o distribuita spazialmente
- Temperatura iniziale: distribuzione termica iniziale, rilevante per problemi termici
- Pressione iniziale: pressione di riferimento o distribuzione spaziale (ad esempio idrostatica)

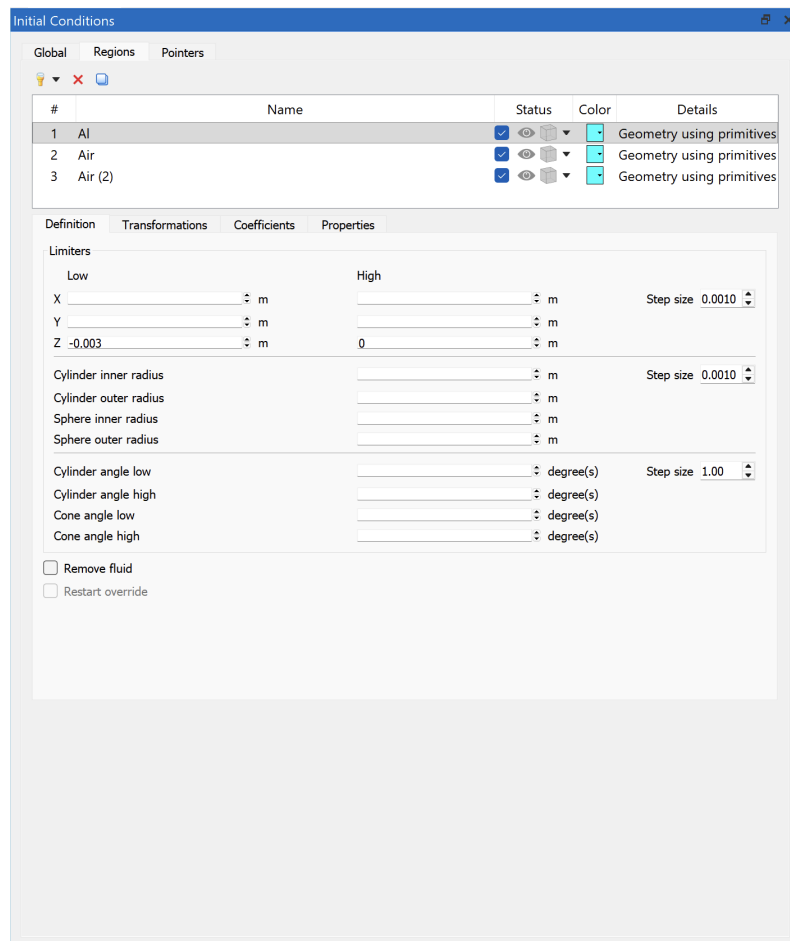


Figura 1.9: Interfaccia della scheda Initial Conditions

Heat Source

Come mostrato nella Figura 1.10, la sezione *Heat Sources* permette di definire sorgenti di calore. Qui vengono inseriti i dati di dimensione dello spot e distanza focale, così come i valori di potenza del laser nel caso del nostro studio e la sua velocità di avanzamento. In caso di presenze di moti specifici del laser quale wobbling ecc., questi possono essere inseriti in questa scheda.

Per ciascuna sorgente, l'interfaccia richiede:

- Tipo di sorgente: volumetrica (potenza per unità di volume) o superficiale (flusso per unità di area)
- Geometria: regione spaziale in cui agisce la sorgente
- Intensità: potenza termica, con possibilità di dipendenza temporale
- Distribuzione spaziale: uniforme o con profilo gaussiano (tipico per fasci laser o archi elettrici)

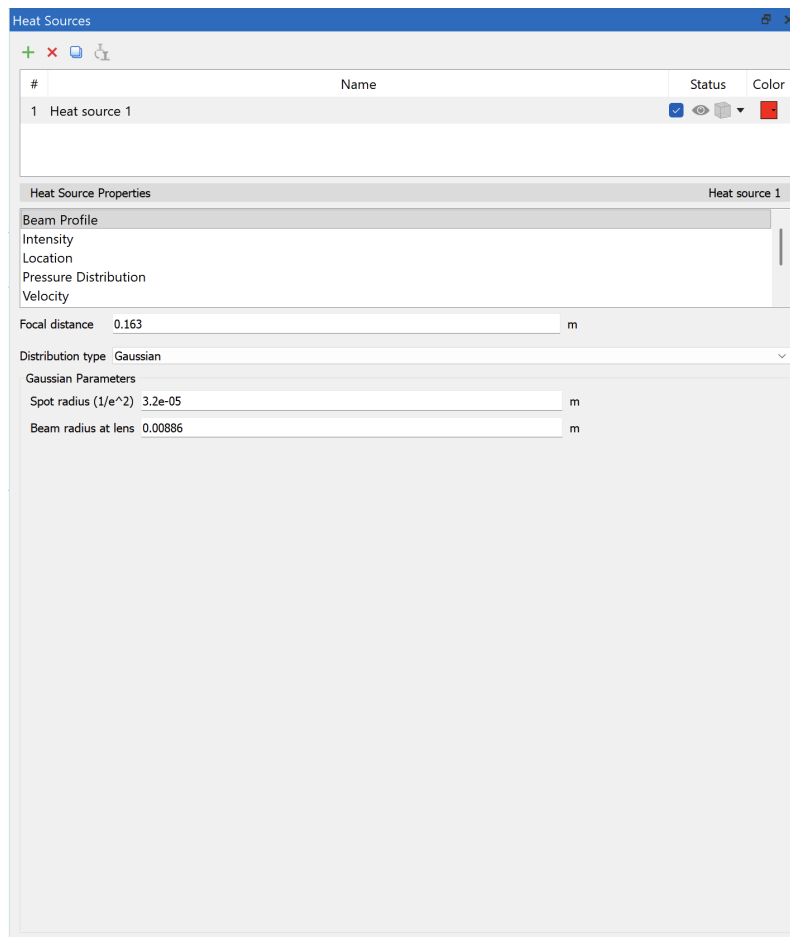


Figura 1.10: Interfaccia della scheda Heat Source

Output

La sezione *Output* controlla quali dati vengono salvati durante la simulazione e con quale frequenza. Le opzioni includono:

- Restart files: salvataggio periodico dello stato completo della simulazione per permettere riavvii
- Selected data: salvataggio di variabili specifiche (velocità, pressione, temperatura, frazione VOF) su file separati
- History data: registrazione temporale di grandezze in punti specifici o su superfici
- Frequenza di output: intervallo temporale o numero di passi tra salvataggi consecutivi

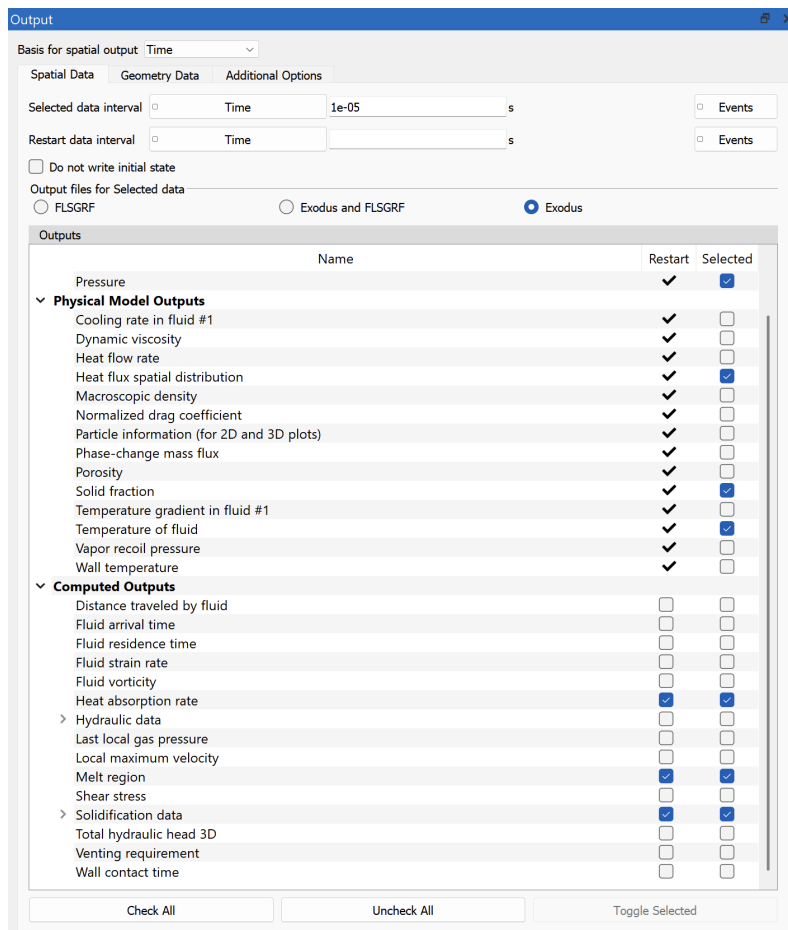


Figura 1.11: Interfaccia della scheda Output

1.4 Modulo Display

Il modulo *Display* è dedicato alla visualizzazione tridimensionale dei campi fisici calcolati dalla simulazione. Come mostrato nella Figura 1.12, l'interfaccia presenta un layout simile al *Model Setup*, con pannelli di controllo laterali e area di rendering centrale.

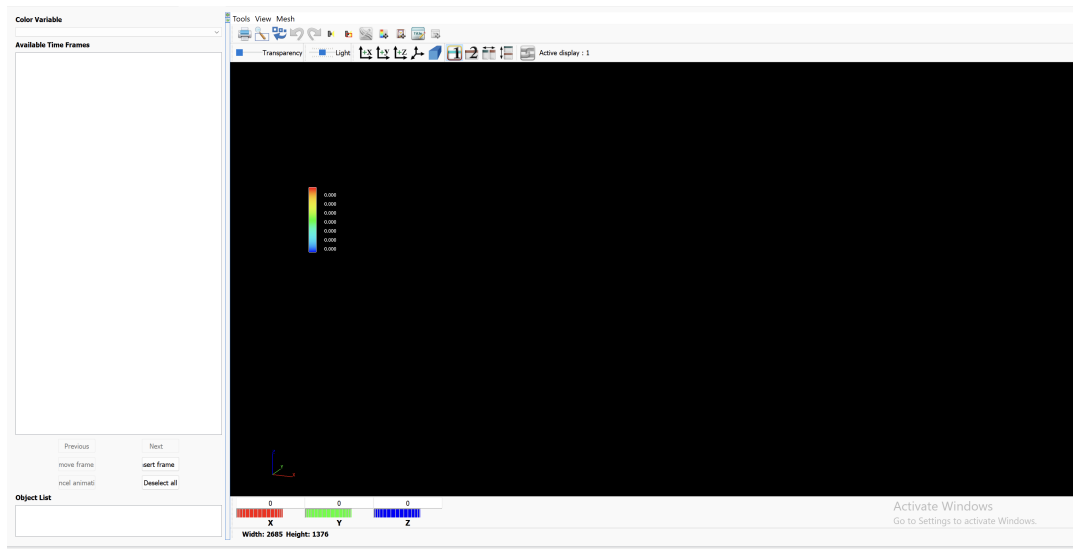


Figura 1.12: Modulo Display con area di rendering centrale (attualmente vuota, mostrando solo la scala cromatica) e pannelli di controllo per la selezione delle variabili da visualizzare e delle opzioni di rendering.

1.4.1 Pannello di selezione delle variabili

Il pannello sinistro del modulo *Display* permette la selezione delle variabili fisiche da visualizzare e il controllo temporale dell'animazione:

- Available Time Frames: lista dei time frames salvati durante la simulazione, navigabili mediante cursore temporale o pulsanti Previous/Next
- Color Variable: menu a discesa per selezionare la variabile da mappare sulla scala cromatica (frazione di fluido, pressione, velocità, temperatura, viscosità, ecc.)

La scala cromatica visibile nella Figura 1.12 mostra il range di valori della variabile selezionata, con mappatura da valori minimi (tipicamente blu/freddo) a massimi (rosso/caldo). L'utente può personalizzare la mappa cromatica, i limiti della scala e la modalità di normalizzazione.

1.4.2 Visualizzazione tridimensionale

L'area centrale di rendering visualizza i campi tridimensionali mediante tecniche di volume rendering o slicing.

Gli strumenti della toolbar superiore includono:

- Controlli di vista (rotazione, zoom, pan)
- Attivazione/disattivazione di elementi (trasparenza, illuminazione)
- Definizione di piani di taglio (slice planes) per ispezionare l'interno del dominio
- Modalità stereo per visualizzazione tridimensionale immersiva

1.5 Analyze

Il modulo *Analyze* fornisce strumenti per l'estrazione e la visualizzazione quantitativa dei dati di simulazione sotto forma di grafici, curve temporali e tabelle numeriche. In Figura 1.13 si possono apprezzare tutte le informazioni ottenibili dalla simulazione in questo modulo.

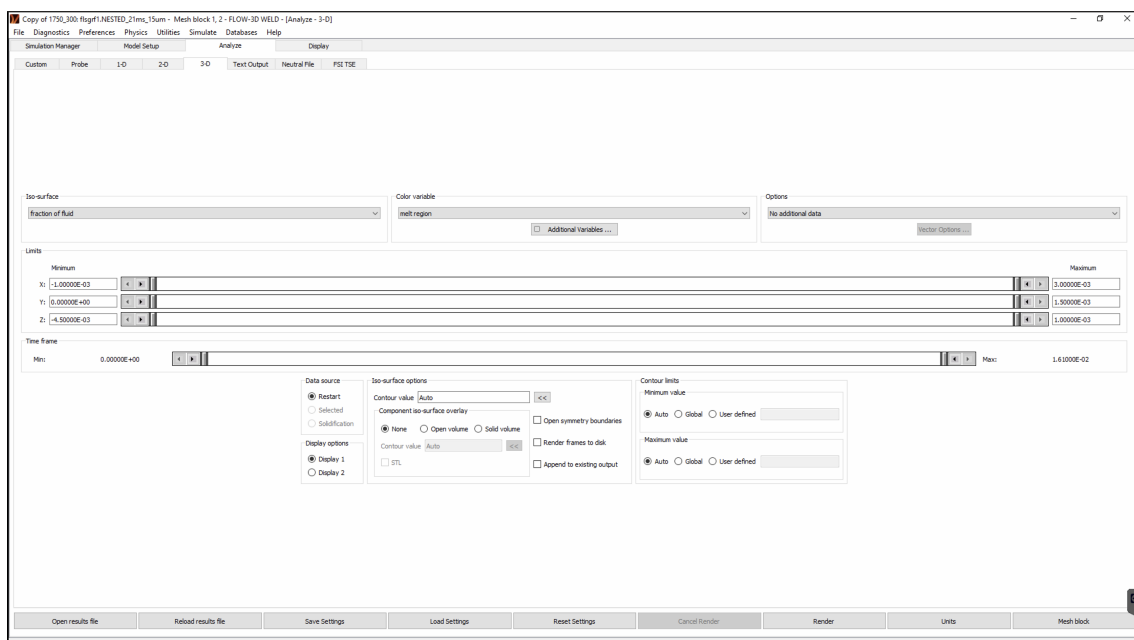


Figura 1.13: Interfaccia grafica del Modulo Analyze

Fra queste molto importanti sono le caratteristiche selezionabili nella finestra Color Variable, la quale permette di selezionare la grandezza di interesse che poi viene renderizzata con vari colori nella scheda di Display. Nella parte centrale compare anche la timeline della simulazione suddivisa in più time-frames che scandiranno poi nel Display, i vari tempi di acquisizione dei render 3D.

1.6 Area di visualizzazione geometrica

L'area centrale del *Model Setup* fornisce una rappresentazione grafica tridimensionale del dominio computazionale, della geometria solida e degli elementi di configurazione (sorgenti, punti di monitoraggio, ecc.).

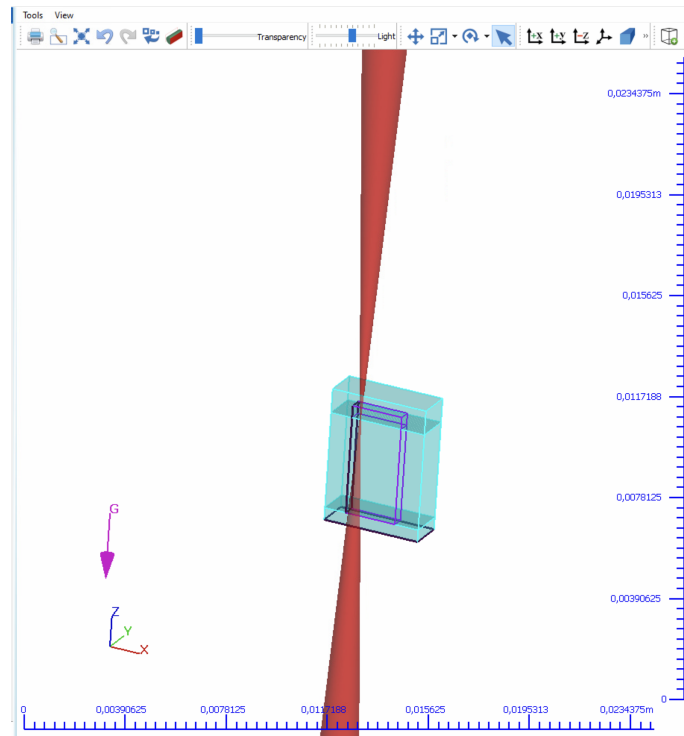


Figura 1.14: Interfaccia dell'area di visualizzazione geometrica

Come visibile nella Figura 1.14 gli strumenti di navigazione nella barra superiore permettono operazioni di zoom, pan, rotazione, e cambio di vista (proiezioni ortogonali lungo x, y, z o vista prospettica). La visualizzazione è interattiva: gli oggetti possono essere selezionati cliccando, evidenziati, e le loro proprietà modificate mediante il pannello destro o attraverso manipolatori grafici.

Un sistema di assi di riferimento nell'angolo inferiore sinistro orienta costantemente l'utente rispetto al sistema di coordinate globale. Le dimensioni del dominio sono indicate mediante scale graduate lungo gli assi, facilitando la verifica delle dimensioni geometriche.

1.7 Simulation Manager

Il modulo *Simulation Manager* gestisce l'organizzazione del portfolio di simulazioni e il lancio delle esecuzioni. L'interfaccia permette di:

- Creare nuove simulazioni o duplicare configurazioni esistenti
- Organizzare i casi di studio in strutture gerarchiche (cartelle, workspace)
- Lanciare simulazioni in locale o su cluster remoti
- Monitorare lo stato di avanzamento di simulazioni in esecuzione

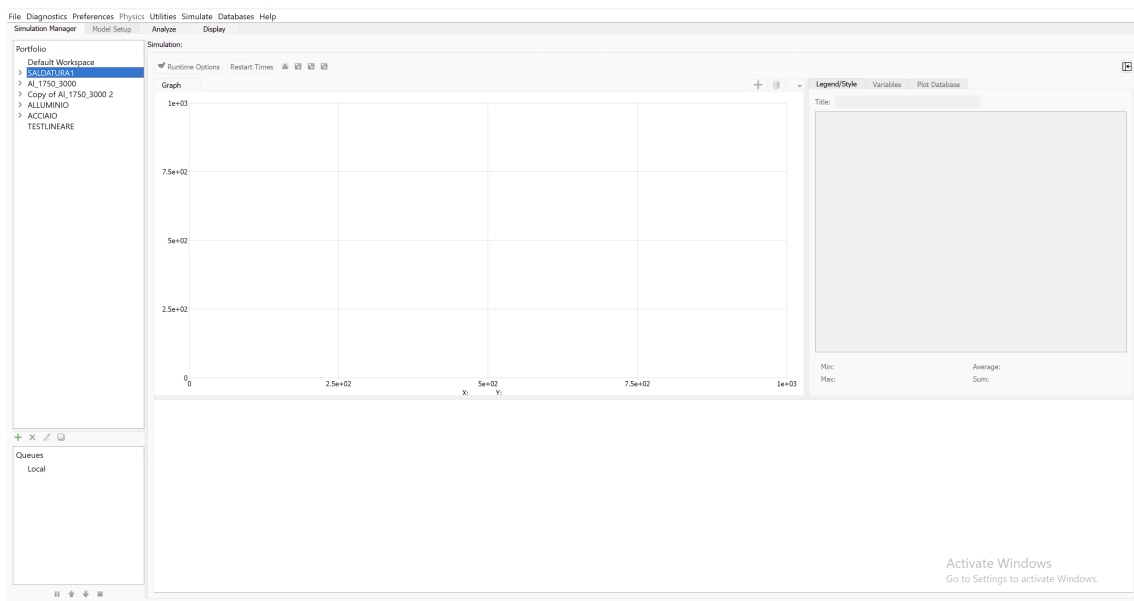


Figura 1.15: Interfaccia del Simulation Manager

Il pannello di sinistra (in basso) mostra la struttura del progetto con indicatori visivi dello stato di ciascuna simulazione (in attesa, in esecuzione, completata, fallita). Le opzioni di runtime permettono di mettere in pausa, riprendere o terminare simulazioni in corso.

Capitolo 2

Applicazione dei parametri sperimentali al software

2.1 Obiettivi e premesse sperimentali

Il presente capitolo vuole descrivere l'intero processo di simulazione numerica, condotta attraverso l'utilizzo del software FLOW-3D WELD, di una prova di riproduzione fedele di un processo di saldatura al laser su acciaio cromo-molibdeno 42CrMo4 (UNI EN 10083-3), lega molto utilizzata anche in campi aerospaziali ed automobilistici. L'approccio di questa attività è anche derivante dalla tendenza, anche in ambienti di produzione, di utilizzare questi strumenti, non più solo come una verifica di qualità, ma come veri e propri sistemi di supporto alle operazioni di progettazione e manifattura.

I parametri di processo di riferimento per questo studio sono quelli schematizzati in tabella:

Materiale	Tipologia	Potenza	Velocità di avanzamento
42CrMo4	Laser	1500 W	100 mm/s

Tabella 2.1: Tabella dei parametri della simulazione in esame

Obiettivo Centrale della Simulazione

L'obiettivo centrale della simulazione è la riproduzione fedele della zona fusa (melt region) che si forma durante l'interazione del fascio laser con il substrato in 42CrMo4, con particolare attenzione alla caratterizzazione delle seguenti grandezze geometriche:

- Larghezza del cordone estensione trasversale della zona fusa a livello della superficie superiore del materiale base, indicativa della distribuzione laterale dell'apporto energetico sul flusso superficiale del bagno. Questa grandezza è direttamente confrontabile con le misure ricavate dalle sezioni macrografiche trasversali e costituisce uno dei parametri di validazione più immediati e robusti del modello

- Profondità di penetrazione estensione verticale della zona fusa misurata dalla superficie fino al fronte di solidificazione inferiore, parametro critico per valutare la modalità di saldatura attiva e per stimare la resistenza meccanica del giunto in termini di sezione utile saldata.

Il rapporto tra profondità e larghezza della melt region, comunemente definito aspect ratio, rappresenta inoltre un indicatore della modalità di saldatura e verrà considerato lungo il corso dell'analisi. Un aspect ratio prossimo all'unità o inferiore è generalmente associato al regime di conduzione, mentre la comparsa di valori di molto superiori, indicano l'esistenza di condizioni keyhole con anche la formazione di un canale di vapore, che modifica profondamente la geometria del bagno e soprattutto i meccanismi di trasferimento del calore. Mentre nel presente capitolo verrà trattato solo l'aspetto del flusso di lavoro della modellazione della simulazione, la sezione di trattazione sul confronto tra il cordone simulato e quello ottenuto sperimentalmente, è lasciato al capitolo successivo.

2.2 Definizione e fonti dei files di input

Volendo illustrare l'intero processo di sviluppo di un modello simulativo, è di fondamentale importanza riconoscere come una considerevole quantità di tempo venga spesa proprio per caratterizzare tutte le proprietà dei fluidi in gioco, specialmente quando si è in assenza di database proprietari per una grande quantità di materiali. Per il caso del 42CrMo4, le proprietà dello stesso, specialmente quelle di carattere termico, non sono sempre state di facile reperibilità nella letteratura scientifica, il che ha reso necessario integrare anche un processo di raccolta e valutazione delle varie fonti. Quelle che sono state inserite nel presente elaborato, sono esclusivamente quelle dalle quali sono stati estrapolati i dati utilizzati effettivamente ai fini della caratterizzazione delle varie proprietà.

2.2.1 Caratterizzazione delle proprietà del 42CrMo4

All'interno dell'ambiente di modellazione, è compito dell'operatore inserire il numero di fluidi presenti nella simulazione stessa. Nel caso della presente, quindi, sarà necessario definire dapprima le proprietà del materiale sul quale verrà compiuta l'effettiva saldatura, definendo tutti i parametri delle varie finestre già visionabili in Figura 1.6.

Densità

Per quanto riguarda la densità, questa è stata modellata attraverso dati ricavati dalla letteratura, in un range di temperatura da 20°C a 2000°C (omogeneo per tutte le proprietà inserite).

I valori di partenza sono stati per lo più raccolti dalle schede tecniche dei produttori siderurgici [6], prendendo a 20°C, 7830 Kg/m^3 . Con il crescere delle temperature, i valori di densità decrescono linearmente per tutta la prima fase solida dell'acciaio, sino a 1434°C. Questo tratto è stato caratterizzato attraverso interpolazioni dei valori già conosciuti, seguendo il trend generico dei comportamenti delle leghe cromo-molibdeno. Alla fusione, grazie all'espansione volumetrica del materiale, può essere notato un calo più repentino da 7250 kg/m^3 a 7160 kg/m^3 tra la temperatura di solidus e di liquidus, che rappresenta comunque una caratteristica generale degli acciai [2]. Sopra ai 1499°C, sono stati estrapolati i dati sperimentali di Dubberstein et al.[4], eseguiti su una lega identica all'acciaio da noi preso in esame ovvero AISI 4142. Gli autori hanno misurato tramite il metodo della massima pressione di bolla una densità di 6920 kg/m^3 a 1550°C con un coefficiente di temperatura di $-0.69 kg/m^3/°C$. Questi valori sono stati estrapolati fino a 2000°C mantenendo la relazione lineare. Di seguito si riportano sia la tabella dei valori inserita, sia il grafico derivante da essi.

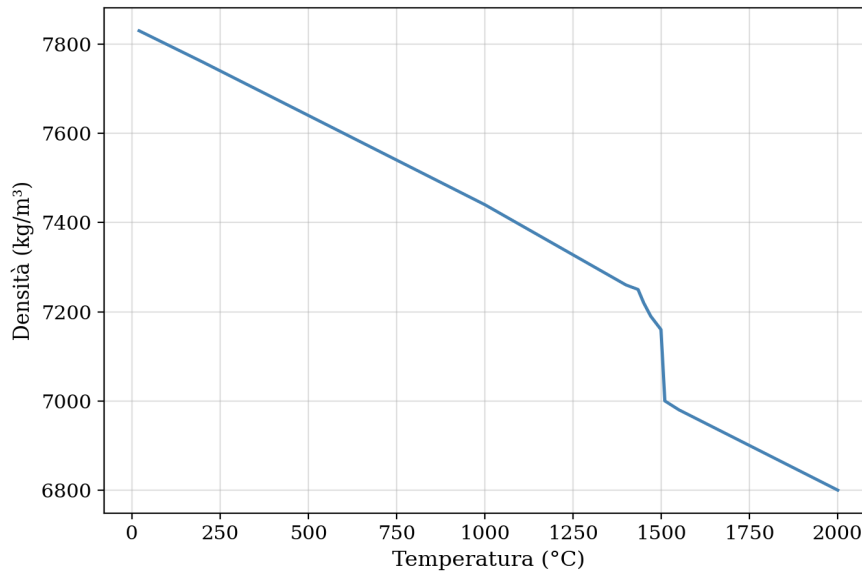


Figura 2.1: Valori della densità in funzione della temperatura

Temperatura (°C)	Densità (Kg/m ³)
20	7830
200	7760
400	7680
600	7600
800	7520
1000	7440
1200	7350
1400	7260
1434	7250
1450	7220
1470	7190
1499	7160
1510	7000
1550	6980
1600	6960
1700	6920
1800	6880
1900	6840
2000	6800

Tabella 2.2: Tabella di densità del 42CrMo4 applicata

Viscosità

Anche per la viscosità, questa è stata espressa come grandezza in funzione della temperatura, dalla prossimità di quella di solidus (1434°C), sino ai 2000°C . Tale proprietà, infatti, è specifica del bagno fuso e governa principalmente i fenomeni convettivi.

I dati hanno riportato un ovvio decremento della viscosità all'aumentare della temperatura, passando da un valore di $0.015 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ a 1434°C a $0.0032 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ a 2000°C . Nella zona intermedia tra solidus e liquidus, i valori mancanti sono stati ottenuti sempre tramite interpolazione dei dati già in nostro possesso, seguendo anche, come nel caso della densità, l'andamento caratteristico di questa grandezza per acciai al cromo-molibdeno [4] [7].

La tabella applicata in FLOW-3D è riportata di seguito.

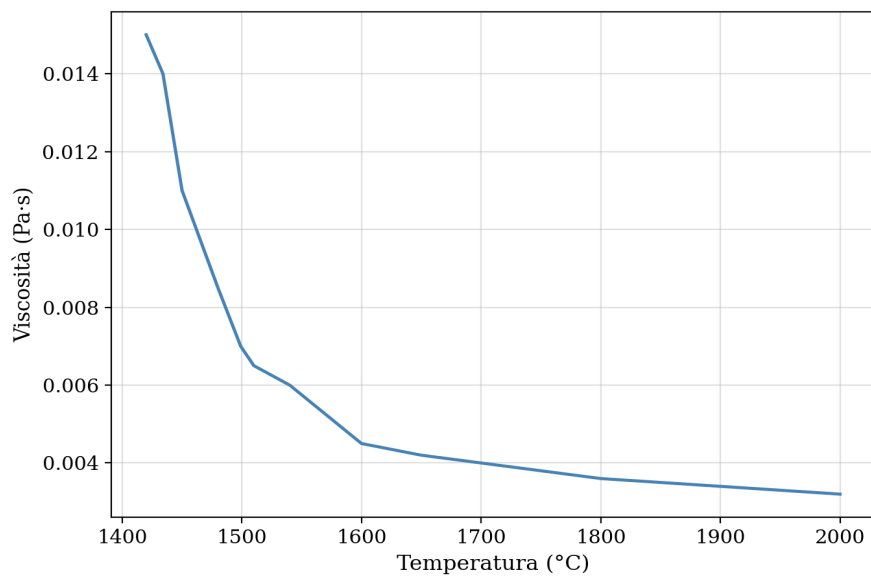


Figura 2.2: Valori della viscosità in funzione della temperatura

Temperatura (°C)	Viscosità (Pa·s)
1420	0.015
1434	0.014
1450	0.011
1480	0.0085
1499	0.007
1510	0.0065
1540	0.006
1600	0.0045
1650	0.0042
1700	0.004
1750	0.0038
1800	0.0036
1850	0.0035
1900	0.0034
1950	0.0033
2000	0.0032

Tabella 2.3: Viscosità vs temperatura 42CrMo4.

Thermal

Questa pagina richiede l'introduzione di una serie di dati tra i quali:

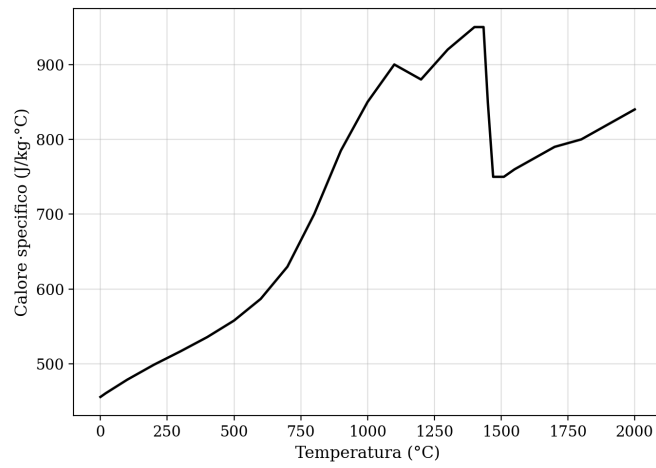
- Calore specifico e conducibilità termica in funzione della temperatura
- Tipologia di scambio termico al vuoto (nel nostro caso all'aria)
- Emissività

Per quanto riguarda il secondo e il terzo punto dell'elenco, queste costanti vengono quantificate rispettivamente in:

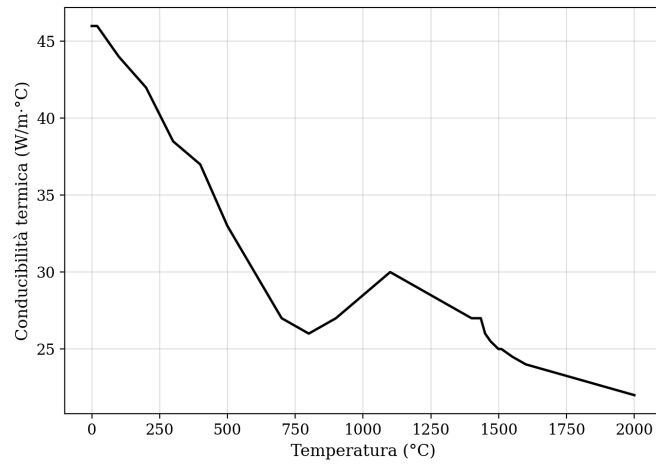
- $13 \text{ W/m}^2/\text{°C}$
- 0.7

Passando poi alle due proprietà in funzione della temperatura, il calore specifico è stato definito tra 0°C e 2000°C per necessità computazionali del software. Anche in questa evenienza, i valori più prossimi alla temperatura ambiente sono ottenuti dalle schede tecniche di acciaieria [6], mentre all'aumentare di questa, sono stati ricavati da pubblicazioni scientifiche [10] o da interpolazioni tra le due fonti. Sono anche state incluse, alcune variazioni non lineari dovute alle trasformazioni di fase magnetica (punto di Curie) e austenitica, che causano un picco locale intorno a 1100°C seguito da un leggero calo a 1200°C . Un aspetto critico della definizione del grafico del calore specifico, è stato quello di rimuovere il picco caratteristico comunemente riportato in letteratura, in quanto FLOW-3D utilizza per la sua energia il metodo entalpico, come già descritto nel capitolo precedente (vedi Cap. 1.2.7), porterebbe una sovrastima dell'energia richiesta[5][7]. La tabella finale è stata implementata in FLOW-3D come funzione tabulare, corredata pure del grafico ottenuto (Fig.2.3a e Tab.2.4)

Per quanto riguarda la conducibilità termica, invece, è stata sempre modellata nel range di temperature del calore specifico. A temperatura ambiente (20°C), il valore di partenza di $46 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ è stato adottato sulla base dei dati riportati da Dörrenberg Edelstahl [3] e Abrams Industries [1]. Per la fase solida, ovvero sino a 1200°C , l'andamento è stato costruito seguendo la forma della curva ottenuta da simulazioni JMatPro riportate in uno studio di deposizione laser su substrato $42\text{CrMo}4$ [10], che mostra un comportamento con un minimo molto visibile intorno a 800°C ed una successiva risalita. I valori assoluti sono stati calibrati sui dati certificati Lucefin [6] a bassa temperatura. Per la fase oltre i 1499°C , i valori sono stati ottenuti utilizzando dati sul ferro liquido [8], che indicano una conducibilità relativamente costante, con una leggera decrescita fino a 2000°C . Come per il calore specifico la tabella e il grafico sono riportati di seguito, vedi Figura 2.3 e Tabella 2.5



(a) Calore specifico



(b) Conducibilità termica

Figura 2.3: Valori delle tabelle nella sezione Thermal

Temperatura (°C)	Calore specifico (J/kg·°C)
0	456
20	461
100	479
200	499
300	517
400	536
500	558
600	587
700	630
800	700
900	785
1000	850
1100	900
1200	880
1300	920
1400	950
1434	950
1450	850
1470	750
1490	750
1499	750
1510	750
1550	760
1600	770
1700	790
1800	800
1900	820
2000	840

Tabella 2.4: Calore specifico vs temperatura 42CrMo4.

Temperatura (°C)	Conducibilità termica (W/m·°C)
0	46.0
20	46.0
100	44.0
200	42.0
300	38.5
400	37.0
500	33.0
600	30.0
700	27.0
800	26.0
900	27.0
1000	28.5
1100	30.0
1200	29.0
1300	28.0
1400	27.0
1434	27.0
1450	26.0
1470	25.5
1499	25.0
1510	25.0
1550	24.5
1600	24.0
1700	23.5
1800	23.0
1900	22.5
2000	22.0

Tabella 2.5: Conducibilità termica vs temperatura 42CrMo4

Surface Tension

La tensione superficiale del fluido è stata modellata da 1434°C a 2000°C, utilizzando i dati ricavati da Dubberstein et al.[4]. Come prima è stato utilizzato il metodo della massima pressione di bolla, che risulta essere il più efficace ed affidabile nella modellazione di questo tipo di risultati, specialmente per acciai come quello utilizzato nella simulazione in esame. La tensione superficiale ha, controintuitivamente, un andamento crescente in quanto la presenza di tensioattivi in questa tipologia di acciai, quali ad esempio lo zolfo. Questa caratteristica favorisce una penetrazione maggiore e un bagno più stretto e profondo.

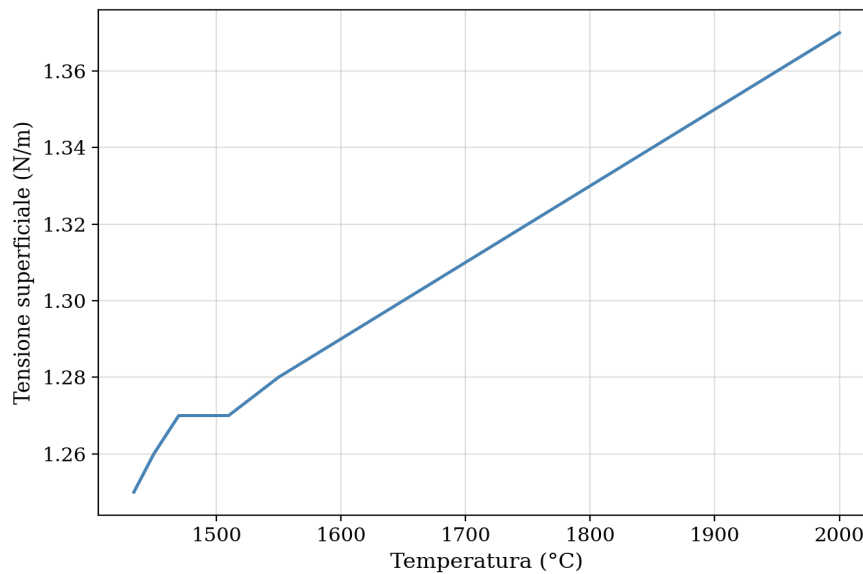


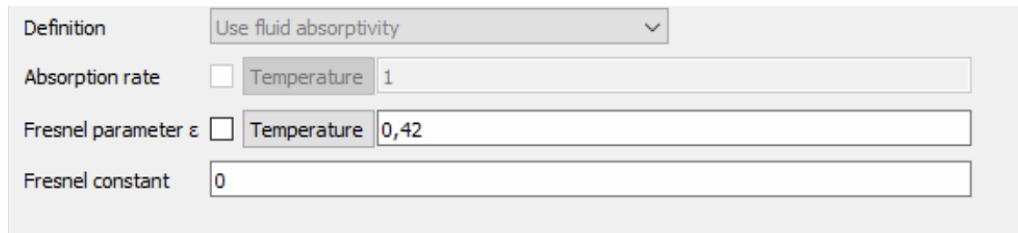
Figura 2.4: Valori della surface tension in funzione della temperatura.

Temperatura (°C)	Tensione superficiale (N/m)
1434	1.25
1450	1.26
1470	1.27
1499	1.27
1510	1.27
1550	1.28
1600	1.29
1650	1.30
1700	1.31
1750	1.32
1800	1.33
1900	1.35
2000	1.37

Tabella 2.6: Tensione superficiale vs temperatura 42CrMo4.

Absorptivity

Il coefficiente del materiale alla radiazione laser è stato modellato in FLOW-3D attraverso il parametro di Fresnel ε , che determina la frazione di energia laser effettivamente assorbita dal materiale. Questa scelta è basata su dati della letteratura per acciai al cromo-molibdeno sottoposti a saldatura laser, che indicano valori di assorbività effettiva nell'intervallo 0.35–0.50 per processi ad alta intensità [8] [11].



The image shows a software interface for defining absorptivity parameters. It consists of a dropdown menu for the definition, followed by three input fields for the absorption rate, Fresnel parameter ε , and Fresnel constant. Each input field has a radio button and a text box.

Parameter	Value
Definition	Use fluid absorptivity
Absorption rate	1
Fresnel parameter ε	0,42
Fresnel constant	0

Figura 2.5: Immagine della pagina di absorptivity con i dati di simulazione

Evaporation

L'evaporazione del materiale nella zona del bagno fuso è stata modellata in FLOW-3D attraverso i parametri termodinamici della transizione liquido-vapore. La temperatura di saturazione è stata fissata a 2900°C, corrispondente alla temperatura di ebollizione dell'acciaio alla pressione atmosferica, mentre la pressione di saturazione è stata impostata a 1.013×10^5 Pa. Un parametro critico per il regime keyhole ad alta intensità è il coefficiente di accomodamento per l'evaporazione, fissato a 0.55, che rappresenta la frazione di molecole che effettivamente evaporano dalla superficie liquida.

Phase change	
Saturation pressure	1,013e+05 Pa
Saturation temperature	2900 C
Exponent for saturation curve	
Superheat temperature	-273,15 C
Supercooling temperature	-273,15 C
Partial pressure of vapor in void	0 Pa
Latent heat of vaporization	6,2e+06 J/kg
Accommodation coefficient for evaporation	0,55
Accommodation coefficient for condensation	

Evaporation Pressure	
Evaporation recoil pressure	Use coefficients
A	55715
B	7,44924
Upper limit	1,0e+06
	Calculate
	Calculate

Plume Force	
Force due to plume	Off
X direction	0
Y direction	0
Z direction	1
Plume radius	0 m
Plume pressure magnification factor	1

Figura 2.6: Scheda di evaporation

Solidifications

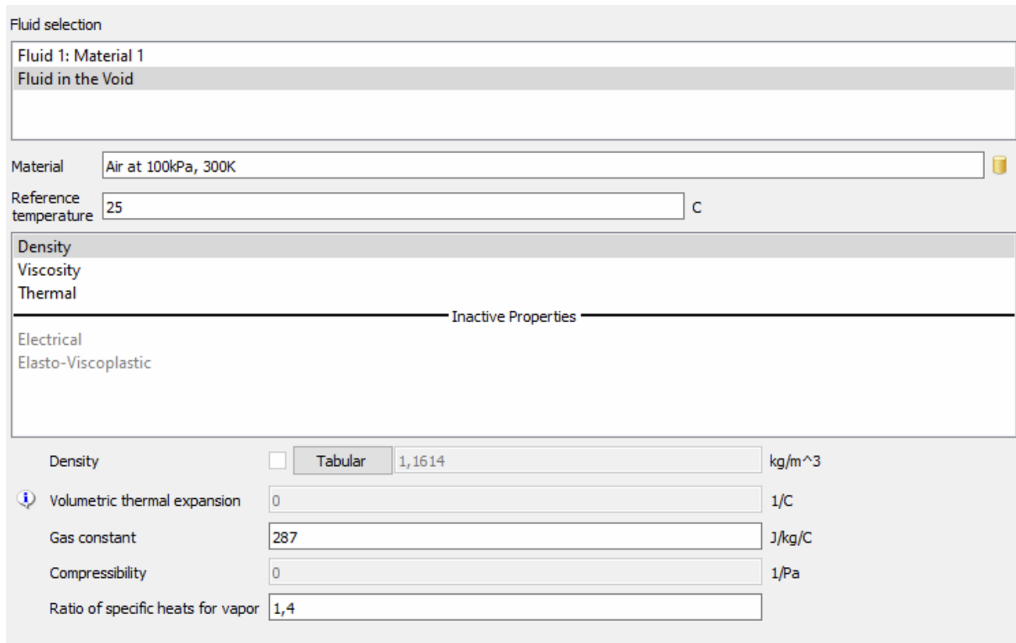
La solidificazione del bagno fuso è stata modellata in FLOW-3D specificando le temperature caratteristiche di transizione di fase e il calore latente di fusione. La temperatura di liquidus è stata fissata a 1499°C e la temperatura di solidus a 1434°C . Il calore latente di fusione è stato impostato a $2.56 \times 10^5 \text{ J/kg}$, valore caratteristico per gli acciai al cromo-molibdeno [7]; questo parametro viene gestito da FLOW-3D come contributo separato all'entalpia totale, come già descritto nella fase di inserimento dei dati del calore specifico. Altri parametri sono stati mantenuti ai valori di default del software, così come le pressioni di evaporazione che vengono calcolate in automatico dal software.

Liquidus temperature	1499	C
Solidus temperature	1434	C
Latent heat of fusion	2,56e+05	J/kg
Solidified Latent Heat Release		
Density	7779	kg/m ³
Viscosity	1	kg/m/s
Specific heat	638	J/kg/C
Thermal conductivity	40	W/m/C
Volumetric thermal expansion	0	1/C
Solidification drag coefficient	1	1/s
Shrinkage adjustment	1	
Critical solid fraction	1	
Coherent solid fraction	0	
Bulk modulus of liquid phase	1,0e+11	Pa
Bulk modulus at critical solid fraction	2,1e+11	Pa
Elastic properties		
Compute from	Elastic modulus and Poisson's ratio	
Elastic modulus	<input type="checkbox"/> Temperature	Pa
Poisson's ratio	<input type="checkbox"/> Temperature	
Yield stress	<input type="checkbox"/> Temperature	Pa

Figura 2.7: Scheda dei dati di solidification

2.2.2 Caratterizzazione delle proprietà dell'aria

Il fluido all'interno della sezione void è stato modellato come aria a pressione atmosferica. Le proprietà termofisiche della stessa sono state importate direttamente dalla libreria proprietaria di FLOW-3D e mantenute costanti durante l'intera simulazione, assumendo che le variazioni di temperatura nell'atmosfera circostante abbiano un impatto trascurabile sui fenomeni di trasferimento di calore dominanti nel processo di saldatura laser, quindi un sostanziale ambiente a capacità termica infinita.



Fluid selection

Fluid 1: Material 1
Fluid in the Void

Material: Air at 100kPa, 300K

Reference temperature: 25 C

Density
Viscosity
Thermal

----- Inactive Properties -----

Electrical
Elasto-Viscoplastic

Density: Tabular 1,1614 kg/m³

Volumetric thermal expansion: 0 1/C

Gas constant: 287 J/kg/C

Compressibility: 0 1/Pa

Ratio of specific heats for vapor: 1,4

Figura 2.8: Pagina di inserimento dati dell'aria

2.3 Esecuzione della simulazione numerica

La presente sezione mira a descrivere la procedura di sviluppo dell'intera simulazione, dalla definizione delle unità di misura nella scheda *Global*, sino ad arrivare al render 3D finale del cordone.

2.3.1 Fase preliminare di modellazione

Nella scheda *Global* è richiesto si inseriscano tutte le informazioni preliminari, utili al corretto svolgimento della simulazione come il sistema di unità di misura adottato, che nel caso della simulazione svolta corrisponde al SI (Sistema Internazionale di unità di misura). Successivamente vengono definiti i parametri temporali richiesti dal calcolatore, tra i quali compaiono:

- L'istante finale del processo (nel caso della presente 40 ms)
- Gli intervalli di campionamento dei dati, che solitamente, l'applicazione del loro valore è demandato al calcolatore stesso

Questi costituiscono un insieme di parametri fondamentali, senza i quali il calcolo della simulazione non verrebbe fatto iniziare da parte del sistema ed inoltre rappresentano il primo pilastro della corretta caratterizzazione e acquisizione del bagno fuso.

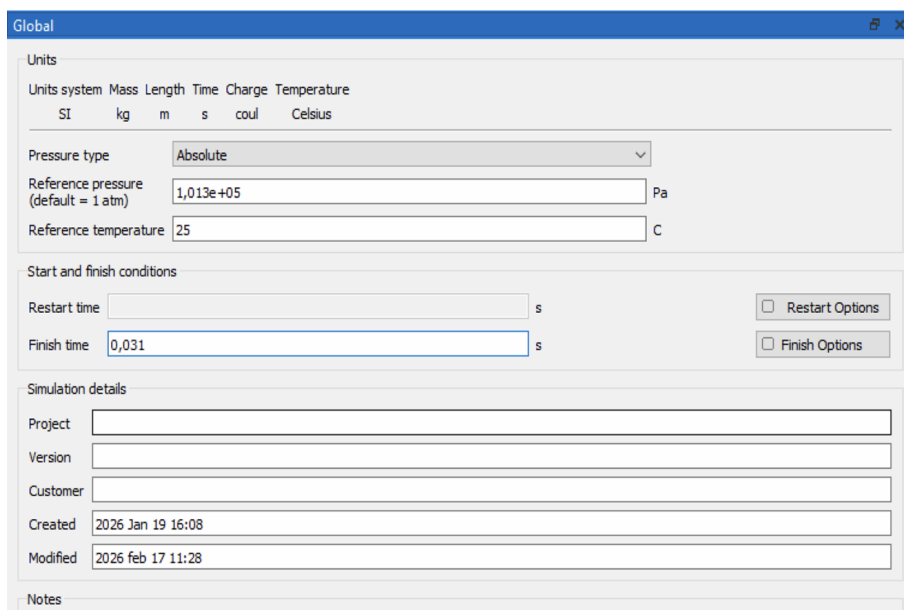


Figura 2.9: Global di simulazione

Si arriva poi alla scheda *Physics*, la quale costituisce il nucleo della simulazione, in quanto consente di modificare l'insieme dei modelli coinvolti nel processo di saldatura. Qui vengono inseriti, nel nostro caso i modelli di:

- Equazione di stato della bolla, il quale viene adottato per descrivere il comportamento della fase gassosa presente nel dominio di calcolo, in quanto vapore metallico e gas disciolti nel bagno potrebbero formare cavità e flussi all'interno dello stesso
- Valutazione della densità, che viene applicato alla maggior parte delle simulazioni per determinare se questa rimanga costante lungo tutto il tempo di calcolo oppure vari in funzione di altre quantità come nel nostro caso (temperatura)
- Gravità e moti convettivi, dove i due vengono generalmente caratterizzati insieme dato il loro stretto legame, specialmente per quanto riguarda la descrizione di fenomeni come l'effetto Marangoni Il modello di gravità inoltre, è anche considerato come termine della forza gravitazionale agente sul bagno, che altrimenti si disperderebbe in tutto il fluido di void
- Sorgente di calore, il quale mira a riprodurre il gradiente termico tra il fronte di avanzamento e la scia posteriore del fascio energetico del laser
- Trasferimento di calore che governa la propagazione dell'energia sia all'interno del bagno fuso che nella zona termicamente alterata dell'acciaio, ancora solido, circostante.
- Cambiamento di fase, esso è fondamentale per descrivere correttamente le transizioni tra una fase e un'altra (solido-liquido, liquido-solido) e tiene conto del calore latente di fusione, la cui corretta gestione influenza in misura significativa l'estensione del bagno fuso, i gradienti termici in prossimità del fronte di solidificazione e i tempi di raffreddamento
- Tensione superficiale
- Viscosità e turbolenze, ovvero proprietà viscosose del metallo fuso definite in funzione della temperatura, consentendo di modulare la resistenza del fluido al moto nelle zone di transizione solido-liquido, dove la viscosità aumenta rapidamente al diminuire della temperatura, inoltre la dinamica del bagno di fusione può presentare carattere turbolento, in particolare ad elevate velocità di saldatura o per processi ad alta densità di potenza

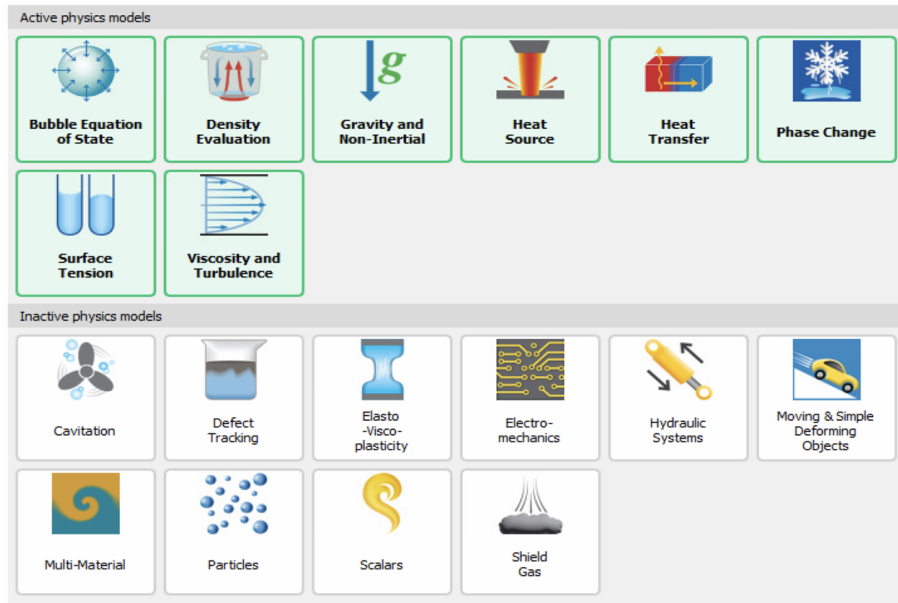
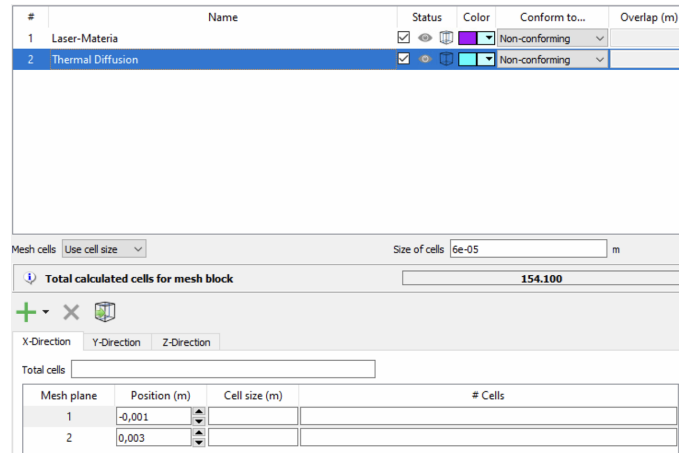


Figura 2.10: Modellazione della pagina physics nella simulazione

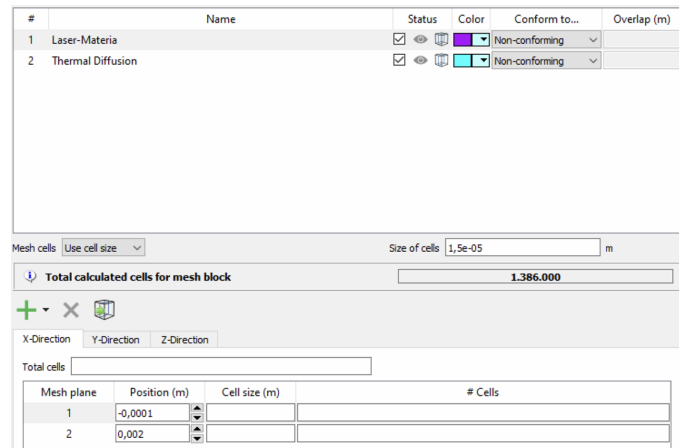
Nella scheda *Fluids* vengono inserite tutte le proprietà termo-fisiche del materiale oggetto di simulazione, i cui valori di riferimento sono stati discussi nella sezione precedente dell'elaborato. Le grandezze definite comprendono la densità, il calore specifico, la conducibilità termica, la viscosità dinamica, il calore latente di fusione, le temperature di solidus e liquidus, il coefficiente di tensione superficiale. Ciascuna proprietà è stata introdotta, ove la disponibilità dei dati lo consentisse, come funzione della temperatura, al posto di valori costanti. Tale approccio aumenta significativamente la fedeltà della simulazione, poiché molte proprietà descritte subiscono variazioni rilevanti nell'intervallo termico compreso tra la temperatura ambiente e quella di fusione.

Per definire la geometria del volume di lavoro, si utilizza la pagina *Mesh* al posto di quella di *Geometry*, principalmente per semplicità sia computazionale che operativa. Come già descritto in precedenza, la presente viene utilizzata anche per migliorare l'efficienza in termini di tempo e risolvibilità dei calcoli sviluppabili all'interno della simulazione, attraverso la distinzione di due volumi di fluido, i quali caratterizzeranno una zona di interazione con il laser ed una in cui verrà diffuso l'apporto termico di quest'ultima. Visto lo sforzo computazionale non indifferente di un volume di materiale base totale (considerando l'intero cordone), si può ipotizzare un cordone simmetrico lungo il proprio asse z , il che permette di dimezzare il dominio di volume da calcolare. Si caratterizzerà il volume di lavoro, come in Figura 2.11, definendo anche la dimensione in termini di posizionamento rispetto agli assi cartesiani e all'origine da noi precedentemente selezionata. Si è quindi preso in esame un volume totale di materiale con altezza (z) 5.5 mm, larghezza (x) 3 mm e profondità (y) 1.5 mm con dimensione di mesh di $60 \mu m$ (Thermal Diffusion), al quale viene poi definito internamente, un volume minore con dimensioni 4.5 mm (z), 2 mm (x), 0.5 mm (y) e mesh di $15 \mu m$. Per separare l'acciaio di simulazione dall'aria del void, aggiungiamo piani perpendicolari all'asse z , creando 3 livelli con lo

schema (dall'alto) aria-materiale-aria, per simulare le condizioni di posizionamento del provino durante la prova sperimentale.



(a) Mesh di interazione



(b) Mesh di diffusione del calore

Figura 2.11: Foto delle mesh di simulazione.

Le facce di questi due volumi, interagiscono tra di loro secondo le condizioni che vengono determinate nella sezione *Boundaries* (condizioni al contorno). Questa parte del flusso di lavoro consiste nel caratterizzare le proprietà delle stesse, attraverso i parametri già descritti nel capitolo precedente (vedi Cap. 1.3.2). Nelle sezioni di wall vengono applicati:

- Il coefficiente di scambio termico convettivo tra il metallo fuso e l'ambiente circostante pari a $7 \text{ W/m}^2/\text{°C}$
- Il moltiplicatore di superficie pari a 1 (la dimensione dell'area corrisponde a quella calcolata)

Nel caso della presente prova simulativa, sono stati usate come osservabile in Figura 2.12a e Figura 2.12b

Boundary	Type		Events
X Min	Wall	<input type="checkbox"/>	Events
X Max	Wall	<input type="checkbox"/>	Events
Y Min	Symmetry	<input type="checkbox"/>	Events
Y Max	Wall	<input type="checkbox"/>	Events
Z Min	Wall	<input type="checkbox"/>	Events
Z Max	Pressure	<input type="checkbox"/>	Events

> Velocity

Thermal

Type: Temperature

Wall temperature: Time: 25 C

Power: Time: W

Heat transfer coefficients

Fluid 1 coefficient: 7 W/m²/C

Fluid 2 coefficient: W/m²/C

Obstacles and wall coefficients: W/m²/C

Thermal properties

Surface area multiplier: 1

Wall length scale: m

> Electric

> Auxiliary

(a) Condizione al contorno del materiale di interazione

#	Name	Visible	Color	Type
1	Laser-Materia	<input type="checkbox"/>	Red	
2	Thermal Diffusion	<input type="checkbox"/>	Blue	

Boundaries

Boundary	Type		Events
X Min	Wall	<input type="checkbox"/>	Events
X Max	Wall	<input type="checkbox"/>	Events
Y Min	Symmetry	<input type="checkbox"/>	Events
Y Max	Wall	<input type="checkbox"/>	Events
Z Min	Wall	<input type="checkbox"/>	Events
Z Max	Pressure	<input type="checkbox"/>	Events

> Velocity

> Thermal

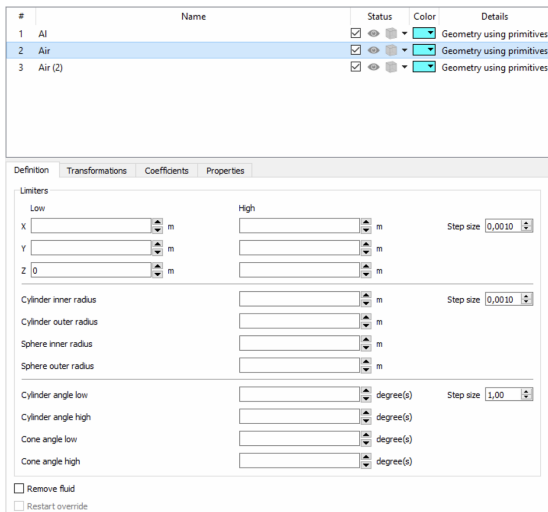
> Electric

> Auxiliary

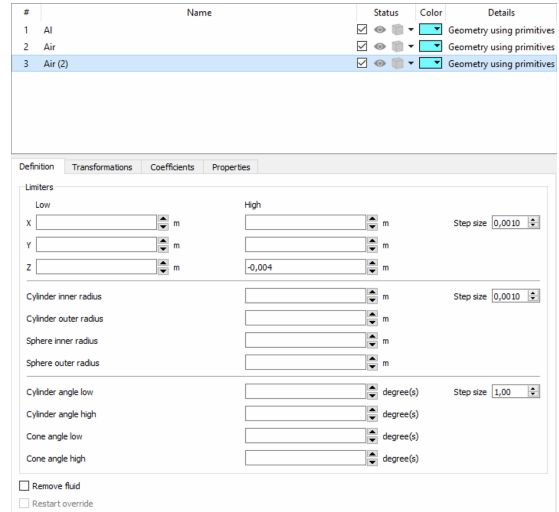
(b) Zona limite di diffusione

Figura 2.12: Immagini boundary

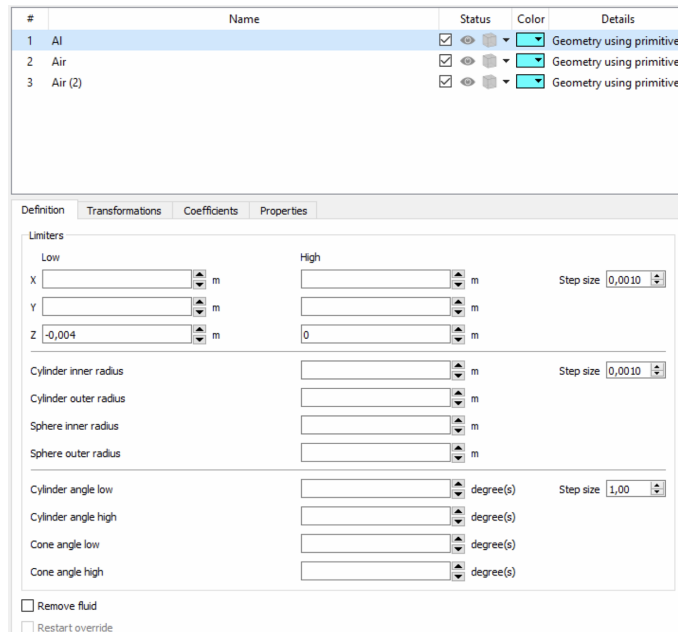
Per specificare le proprietà dei vari volumi, invece, servirà definire le altezze di ogni sezioni di fluido selezionato nella scheda *Initials*. Ciò significa che, mantenendo lo schema aria-materiale-aria, sarà necessario caratterizzare le tre estensioni lungo z degli stessi, mentre non sarà necessario definire gli altri assi, in quanto il software autocompilerà questi spazi come il massimo occupabile in quella determinata direzione, come visionabile nelle Figure 2.13a, 2.13b e 2.13c



(a) Aria sovrastante



(b) Aria sottostante



(c) Acciaio

Figura 2.13: Varie region definite nei tratti

Eventualmente, nelle sezioni di void, sarebbe stato possibile utilizzare, al posto delle region, i pointers, i quali, se all'interno di quel volume, caratterizzano l'intero void. Tali condizioni vengono messe in relazione al fatto che tale pagina, definisca le condizioni iniziali ovvero quelle al tempo $t=0$ sia come distribuzione dei fluidi, che dell'entità dimensionale sia del gradiente di temperatura che quello di velocità.

La prima scheda da configurare nel pannello *Heat Source* è Beam Profile, che descrive come l'energia del fascio laser si distribuisca sulla superficie del materiale saldato. La tipologia di distribuzione è impostata come una gaussiana, cercando di rappresentare il più fedelmente possibile il comportamento del laser reale. Il campo di distanza focale, rappresenta la distanza tra la lente di focalizzazione ed il piano di fuoco, ovvero la superficie del substrato di acciaio ($z=0$), con valore di 0.163 m. Posizionare il fuoco esattamente sulla superficie garantisce che la densità di potenza irradiata sia massima nel punto di interazione laser-materiale, riproducendo la condizione operativa reale. Da questo poi, può essere anche determinato il raggio dello spot che corrisponde a $32 \mu m$. Il Beam radius at lens è impostato a $8860 \mu m$ o 8.86 mm ed indica il raggio del fascio laser collimato in ingresso alla lente di focalizzazione, prima che il sistema ottico lo concentri nello spot focale. Questo parametro, insieme alla distanza focale, determina completamente la geometria di focalizzazione del fascio.

La scheda Intensity consente di specificare la potenza totale emessa dalla sorgente laser, consentendo di caratterizzare anche come si comporti la stessa in funzione del tempo come in Figura 2.14.

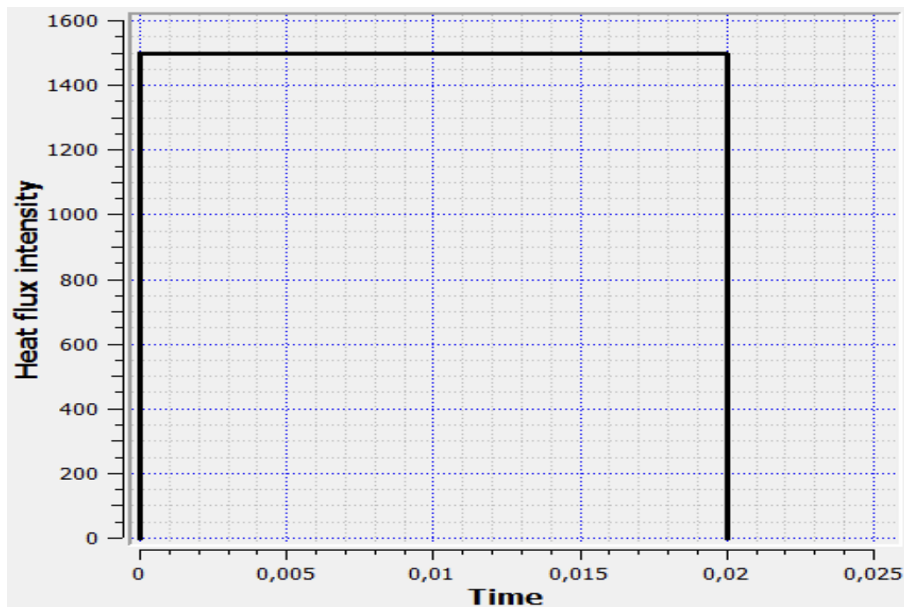


Figura 2.14: Definizione di intensità

La pagina Location definisce dove si trova la sorgente laser nello spazio e in quale direzione è orientato il fascio. L'interfaccia è divisa in due riquadri:

- Source Position, che specifica le coordinate xyz del punto di emissione
- Heat Source Direction, che specifica il verso dell'asse ottico

La posizione della sorgente laser è definita nel sistema di riferimento cartesiano del dominio attraverso le coordinate della Source Position: $x = 0.00025$ m, $y = 0$ m, $z = 0.163$ m. La coordinata z corrisponde alla distanza focale già specificata nella scheda Beam Profile, in modo che venga garantita la coerenza tra il punto di emissione ed il piano di messa a fuoco del fascio. La coordinata x è leggermente traslata rispetto all'origine per tenere conto dello spot, mentre $y = 0$ colloca il laser sul piano di simmetria longitudinale del cordone. La direzione dell'asse ottico è definita tramite la Heat Source Direction, impostata con componenti $x = 0$, $y = 0$, $z = -1$. Questo vettore indica che il fascio laser è orientato verticalmente verso il basso, coerentemente con l'impostazione reale del processo in cui la sorgente è posta al di sopra del materiale ed il fascio lavora perpendicolarmente sulla superficie del materiale. All'interno dell'area velocity, inoltre, è definita la velocità di avanzamento pari a 0.1 m/s.

La scheda Output permette di specificare quali grandezze fisiche il software deve salvare durante l'esecuzione della simulazione e con quale cadenza temporale, determinando così il contenuto dei file di risultati del post-processing. Sono stati selezionati quindi i seguenti parametri:

- Fluid fraction: frazione volumetrica del fluido, necessaria per la ricostruzione dell'interfaccia libera tramite il metodo VOF
- Fluid velocities: campo vettoriale della velocità del fluido
- Pressure: distribuzione spaziale del campo di pressione
- Heat flux spatial distribution: distribuzione spaziale del flusso di calore
- Solid fraction: frazione solida locale, utile per il monitoraggio della transizione di fase
- Temperature of fluid: campo di temperatura del fluido
- Heat absorption rate: tasso di assorbimento del calore nel dominio di calcolo
- Melt region: identificazione della regione fusa, utile per la valutazione geometrica del bagno di fusione
- Solidification data: dati relativi al processo di solidificazione, tra cui la velocità del fronte di solidificazione e il gradiente termico locale

2.3.2 Svolgimento della simulazione e il Simulation Manager

Successivamente alla preparazione del Model Setup, si procede ad avviare l'effettiva simulazione tramite la pagina di Simulation Manager. Sarà necessario eseguire una compilazione di Pre-processing, che verifichi il corretto stato del modello e ne quantifichi l'impegno computazionale della macchina, per poi eseguire la fase in cui il Solver computi l'intero volume considerato. In Figura 2.15, viene rappresentata una stringa del log del Solver durante la simulazione presa in esame per la presente dissertazione.

progress		time step		pressure		heat transfer		fluid #1			solidification		performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	volume	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
2.99185E-03	15072	2.01E-07	2.62E-07/cv	3	6.42E-03	2	3.14E-04	2.4297E-08	+2.05E-03	0.728	2.4246E-08	0.998	03:29:04	55	14:57:42	1:18:05:21

Figura 2.15: Riga di log di una delle simulazioni presenti nell'elaborato

Qui compaiono tutte le informazioni utili e necessarie al monitoraggio della simulazione stessa, riportando all'utente:

- Il tempo della simulazione calcolato sino a quel punto (sim _ time)
- Informazioni sul minimo time step calcolabile
- Il valore di pressione agente sul bagno in quel momento
- Il trasferimento di calore
- Il volume di fluido, la frazione e la percentuale dello stesso perso
- La frazione di solidificazione
- Le prestazioni della simulazione in termini di tempo trascorso dall'inizio della simulazione, dell'orario al momento del calcolo e del tempo rimanente al completamento della stessa

Durante il run, l'avanzamento temporale è stato seguito tramite i grafici diagnostici, che forniscono informazioni su efficienza numerica e stabilità del calcolo. In particolare sono stati monitorati i tempi di CPU, utili per valutare la convergenza e individuare eventuali instabilità. I messaggi di runtime, invece, hanno consentito di verificare l'assenza di errori critici e di confermare il corretto avanzamento fino al tempo finale impostato [9].

2.4 Analisi post-processing e visualizzazione dei risultati

Per verificare l'accuratezza della simulazione della saldatura, è stata utilizzata la funzione di rendering avanzata di FLOW-3D WELD, che consente una rappresentazione realistica del cordone saldato. Questa feature ha permesso di generare immagini del profilo del cordone, evidenziando dettagli come il rinforzo superficiale, la diluizione laterale e la penetrazione nella radice, confrontabili visivamente con fotografie macroscopiche del provino sperimentale. Concluso il calcolo, è stato utilizzato FLOW-3D POST per analizzare la sezione trasversale del cordone di saldatura. È stato creato un piano di sezione 2D ortogonale all'asse x, posizionato al tempo finale della simulazione, per poi andare a visualizzare la parte interessata da questo processo come quella in Figura 2.16 Sulla sezione estratta sono state misurate

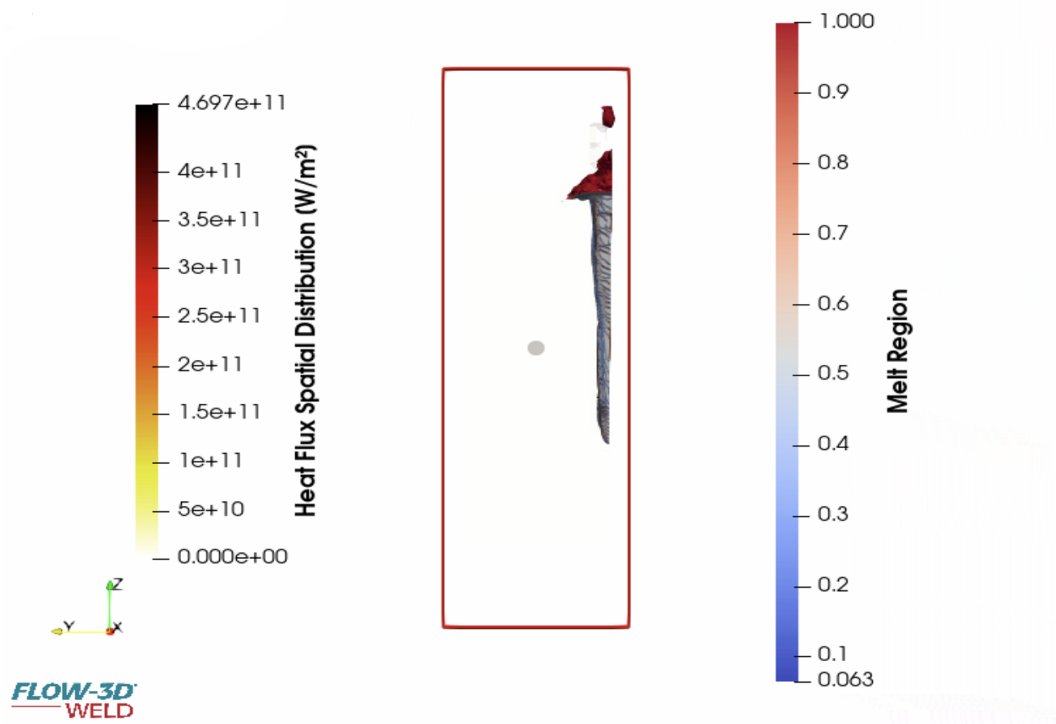


Figura 2.16: Immagine di una sezione di cordone ottenuto, dove può anche essere vista la tecnica della divisione simmetrica del cordone per necessità computazionali

le dimensioni chiave del cordone, ovvero la larghezza superiore, la profondità di penetrazione, utilizzando gli strumenti di misura integrati del post-processor. Le dimensioni geometriche estratte, rappresentano i risultati principali di questa analisi numerica e saranno sottoposte a confronto con le misure ottenute dalla metallografia del provino sperimentale nel capitolo successivo, al fine di validare l'accuratezza del modello di FLOW-3D WELD.

2.5 Raccolta dei risultati

La simulazione presa in esame in questo elaborato, così come i suoi risultati, è stata oggetto di un lungo processo evolutivo. La prima prova di calcolo eseguita, è difatti estremamente diversa rispetto a quelle presenti di seguito, in quanto inizialmente, la modellazione delle proprietà era acerba o molto semplificata. Lungo il corso dell'elaborazione del lavoro trattato, sono state apportate numerose modifiche, sia in termini di sviluppo delle proprietà caratteristiche del processo come, per esempio, i tempi ed i parametri dello stesso, così come le caratteristiche dei fluidi e la loro dipendenza da altre grandezze in gioco. Una volta ottenuto un risultato che, seppur ancora non perfettamente, garantisse una stabilità computazionale sufficiente e un'aderenza accettabile ai comportamenti reali del processo, si è proceduto ad ottimizzare il lavoro affinché i dati di output, convergessero progressivamente verso i risultati della prova sperimentale.

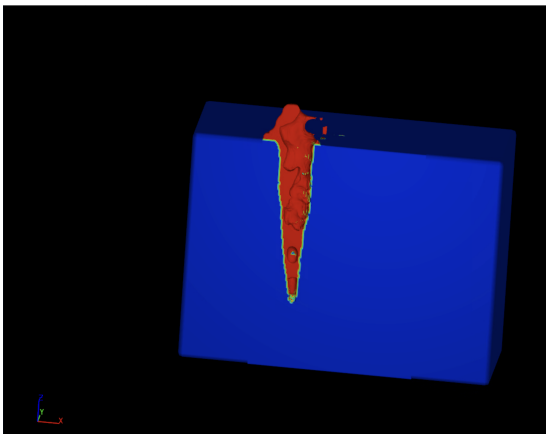
2.5.1 Risultati simulazione 1

La prima simulazione è stata condotta adottando proprietà termofisiche parzialmente semplificate rispetto alla caratterizzazione completa descritta precedentemente. In particolare, le proprietà inserite in funzione della temperatura sono state: densità, viscosità dinamica, tensione superficiale ecc. con andamenti reali derivati dalla letteratura. Il calore specifico è stato invece mantenuto costante al valore di riferimento del software, mentre la conducibilità termica è stata approssimata con un andamento lineare semplificato. Questa semplificazione, pur riducendo la fedeltà fisica del modello, ha permesso di ottenere una prima soluzione stabile e di stabilire un riferimento dimensionale iniziale per le iterazioni successive.

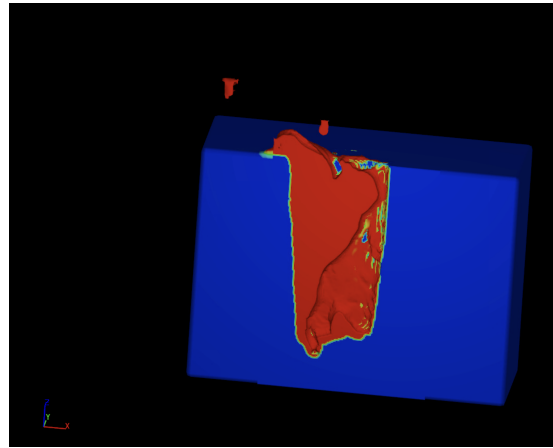
Si è ottenuta quindi una saldatura che graficamente risultante come le Figure 2.17a, 2.17b e 2.17c a 3 diversi time-steps (l'ultima foto equivale alla fine del processo) Da questo primo tentativo sono stati raccolti i valori dimensionali presenti in Tabella 2.7

Tabella 2.7: Risultati dimensionali della Simulazione 1

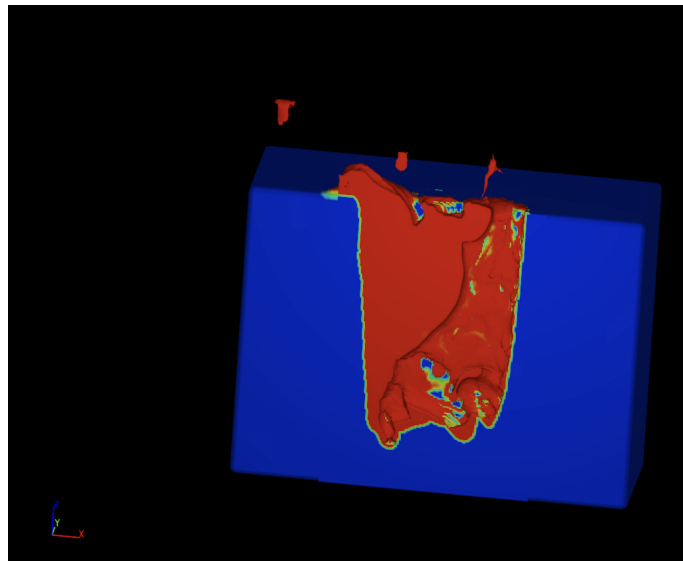
Parametro	Sim. 1
Larghezza (μm)	464
Profondità (μm)	2686
Rapporto P/L	5.78



(a) Fase iniziale



(b) Fase intermedia



(c) Risultato finale

Figura 2.17: Evoluzione della simulazione 1, seguendo i timesteps presenti nel visualizzatore render

2.5.2 Risultati simulazione 2

Nel tentativo successivo, sono state completamente riviste tutte le proprietà termofisiche dei fluidi coinvolti nella simulazione, con l'obiettivo di calibrarle su un modello il più aderente possibile alla realtà fisica, analogamente a quanto descritto nelle sezioni precedenti relative alla caratterizzazione sperimentale dei materiali. Rispetto alla simulazione 1, le modifiche principali hanno riguardato:

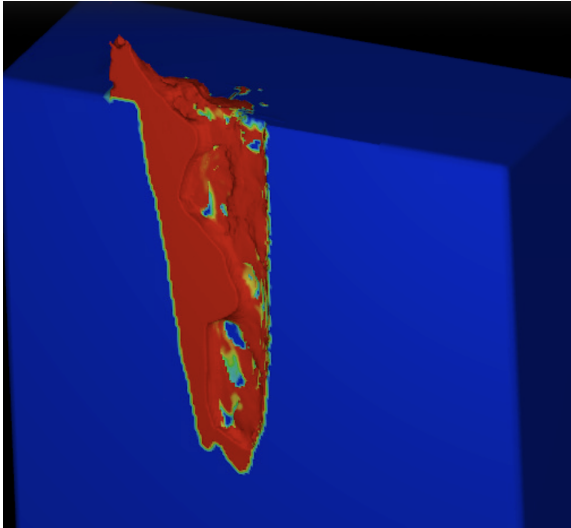
- Calore specifico: introdotto come funzione tabulare della temperatura, includendo le variazioni non lineari dovute alle trasformazioni di fase, con il picco intorno a 1100°C e la discontinuità alla fusione
- Conducibilità termica: sostituita con la curva completa in funzione della temperatura, che include il minimo a 800°C e la successiva risalita fino alla fusione;
- Tensione superficiale: inserita come funzione crescente della temperatura da 1434°C a 2000°C
- Densità e viscosità: mantenute con gli stessi andamenti della simulazione 1, già rappresentativi del comportamento reale del materiale.

Dopo questa revisione si è osservato un netto miglioramento della stabilità del modello. Tuttavia, parallelamente a questo progresso, si è registrato un aumento dei tempi di calcolo di circa il 300%, attribuibile principalmente alla maggiore accuratezza del modello fisico e alla conseguente più complessa risoluzione dello stesso. Nelle Figure 2.18a, 2.18b e 2.18c è possibile visualizzare i risultati in termini di volume ottenuti, mentre nella Tabella 2.8 i valori dimensionali.

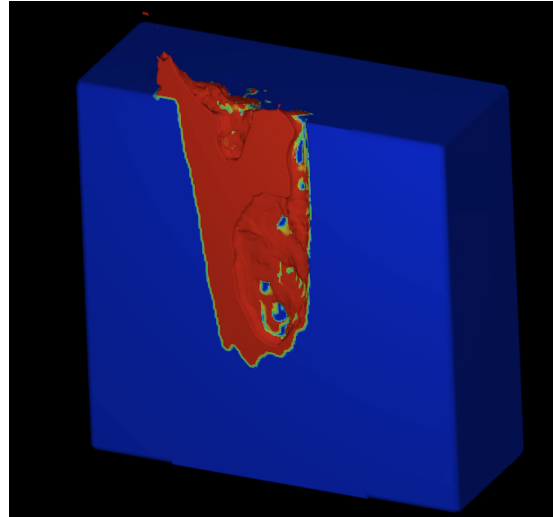
Tabella 2.8: Risultati dimensionali della Simulazione 2

Parametro	Sim. 2
Larghezza (μm)	614
Profondità (μm)	2860
Rapporto P/L	4.66

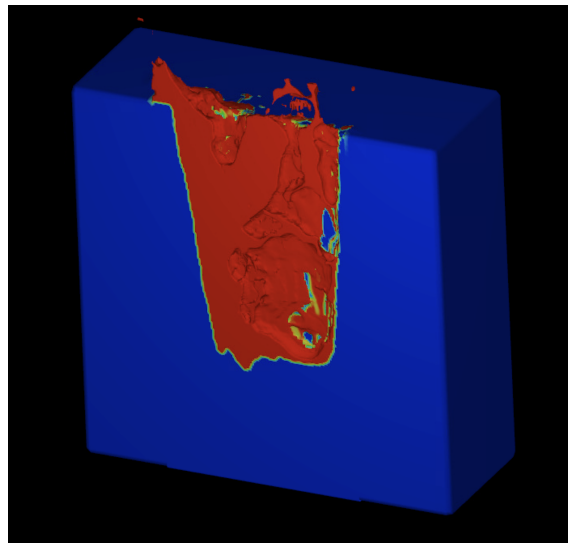
Questi, rispetto al caso precedente, appaiono più convergenti al caso sperimentale, specialmente per quanto riguarda il valore della larghezza, mentre è variato di poco quello della profondità.



(a) Fase iniziale



(b) Fase intermedia



(c) Risultato finale

Figura 2.18: Evoluzione della simulazione 2, seguendo i timesteps presenti nel visualizzatore render

Capitolo 3

Esecuzione sperimentale e validazione del modello numerico

3.1 Procedura di saldatura laser

Nel presente elaborato la saldatura sperimentale è stata eseguita su provini in acciaio 42CrMo4,. Il sistema di saldatura utilizzato è un laser multimodale nel vicino infrarosso, con lunghezza d'onda pari a $1.6 \mu m$, potenza massima di 3000W e distanza focale di 0.163m. I parametri di processo adottati sono stati: potenza laser $P = 1500 W$, velocità di avanzamento $v = 100 mm/s$, in regime di saldatura keyhole.

Al termine della saldatura, per analizzare la geometria della sezione trasversale del cordone, il blocchetto di acciaio è stato sezionato perpendicolarmente alla direzione di avanzamento del laser mediante una troncatrice a disco. La sezione così ottenuta è stata successivamente inglobata in resina, quindi levigata con carte abrasive a granulometria progressivamente crescente e lucidata a specchio con paste diamantate. L'acquisizione dell'immagine è stata effettuata tramite una fotocamera ad alta risoluzione su microscopio ottico; l'immagine finale mostrata in Figura 3.1 è stata ottenuta componendo più acquisizioni mediante stitching in Photoshop, al fine di coprire l'intera estensione del cordone mantenendo un'elevata risoluzione spaziale.

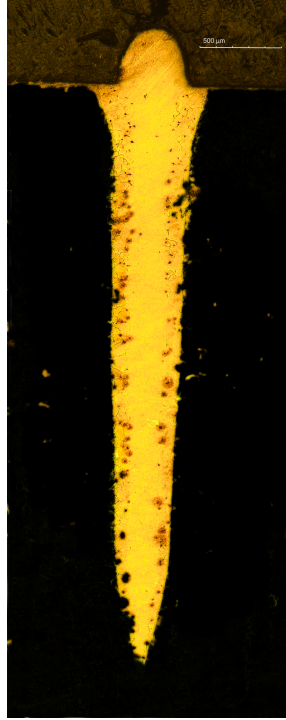


Figura 3.1: Foto ad alta risoluzione della sezione del cordone di saldatura ottenuto sperimentalmente, con una maschera nera applicata nella regioni di materiale base

3.2 Confronto numerico-sperimentale dei risultati ottenuti

Si reputa fondamentale verificare come i risultati simulati abbiano poi una certa affidabilità e precisione, rispetto ai valori dimensionali ottenuti dalla prova sperimentale, per validare la bontà del lavoro svolto in fase di modellazione del calcolo e la sua eventuale spendibilità in operazioni future. I risultati ottenuti dalle due simulazioni mostrano un progressivo avvicinamento ai valori misurati sperimentalmente, in particolare, la seconda simulazione restituisce una larghezza del cordone di $614 \mu m$ e una profondità di $2860 \mu m$, riducendo sensibilmente gli scarti rispetto alla prima iterazione semplificata, che aveva prodotto una larghezza di $464 \mu m$ e una profondità di $2686 \mu m$, rispetto ai valori sperimentali di riferimento, ovvero una larghezza di $640 \mu m$ e una profondità di $3600 \mu m$.

Mentre la larghezza è già ben riprodotta dalla simulazione 2, con uno scarto relativo inferiore al 4%, la profondità presenta ancora una sottostima di circa il 20%. Questo andamento è tipico dei modelli termici laser, dove la geometria laterale del cordone, governata principalmente dalla conduzione termica radiale, converge rapidamente, mentre la profondità di penetrazione è più sensibile alla modellazione della cavità di vapore e alla pressione di recoil, fenomeni che risultano molto più complessi da riprodurre numericamente. Il rapporto profondità/larghezza (P/L), che descrive la forma complessiva del cordone, passa da 5.78 (Sim.1) a 4.66 (Sim.2), il che evidenzia come la profondità simulata pecca di una sottostima nella modellazione dei parametri da cui essa è influenzata.

Tabella 3.1: Confronto tra risultati sperimentali e simulazioni numeriche

Parametro	Sperimentale	Sim. 1	Sim. 2
Larghezza (μm)	640	464	614
Profondità (μm)	3600	2686	2860
Rapporto P/L	5.63	5.78	4.66

La convergenza delle dimensioni simulate verso il dato sperimentale è evidente per la larghezza sin da subito, mentre per la profondità il modello tende a convergere successivamente, vista la tendenza a sottostimare il valore misurato. Ciò indica che il lavoro svolto durante la campagna sperimentale portata avanti è stato indirizzato correttamente verso la direzione dell'aderenza alle caratteristiche fisiche reali. In termini di errore percentuale, la Tab.3.2, mostra gli errori (già precedentemente introdotti) delle varie grandezze rispetto ai dati ottenuti dalla prova sperimentale.

Tabella 3.2: Confronto in termini percentuali dell'errore dei risultati di simulazione

Parametro	Errore % Sim. 1	Errore % Sim. 2
Larghezza	27.5 %	4.5 %
Profondità	25.4 %	20.6 %
Rapporto P/L	+2.7 %	17.2 %

Come si può notare, il rapporto P/L, passa dall'essere sovrastimato per la Sim. 1 al contrario, per la seconda iterazione, mentre tutti i valori sono da intendersi come sottostime del caso sperimentale.

3.3 Conclusioni finali ed eventuali sviluppi futuri

Le simulazioni condotte su acciaio 42CrMo4 mediante FLOW-3D hanno dimostrato una progressiva convergenza verso i valori sperimentali di riferimento, confermando la validità dell'approccio iterativo adottato nella fase di modellazione. La larghezza del cordone risulta già ben riprodotta dalla seconda simulazione, con uno scarto relativo inferiore al 5% rispetto al dato misurato di $640 \mu\text{m}$, mentre la profondità di penetrazione, pur presentando ancora una sottostima di circa il 21% rispetto ai $3600 \mu\text{m}$ sperimentali, mostra un chiaro miglioramento rispetto alla prima iterazione.

Il rapporto P/L passa da 5.78 nella prima simulazione a 4.66 nella seconda, allontanandosi dal valore sperimentale di 5.63. Questo peggioramento dell'indice di forma non è però indice di un peggioramento globale. Esso riflette infatti, una maggiore convergenza sulla dimensione della larghezza, piuttosto che quella della profondità, la quale rimane la grandezza più difficile da riprodurre numericamente, su cui tra l'altro sarà necessario concentrare gli sforzi nelle iterazioni successive, in vista degli sviluppi futuri del presente lavoro. Tale comportamento è definibile come coerente rispetto a quanto tipicamente riscontrato nella modellazione di processi laser in modalità keyhole, dove la geometria laterale del cordone, governata principalmente dalla conduzione termica radiale, converge rapidamente, mentre la profondità di penetrazione è più sensibile alla modellazione della cavità di vapore e della pressione

di recoil, fenomeni complessi da riprodurre con precisione in modellazioni a carico computazionale relativamente ridotto. Al fine di ridurre la sottostima della profondità di penetrazione, è possibile individuare alcune ipotesi di sviluppo per migliorare l'aderenza del modello alla realtà.

La prima riguarda il raffinamento delle proprietà termofisiche del materiale, in particolare, puntando a migliorare ulteriormente la caratterizzazione della conducibilità termica nella fase liquida e il calore specifico nella fase di transizione solido-liquido. Una conducibilità termica del bagno fuso sovrastimata tenderà a disperdere lateralmente il calore, favorendo l'allargamento del cordone a scapito della penetrazione. Una revisione di questi valori, anche con l'aiuto di misure sperimentali sul 42CrMo4 ad alta temperatura, potrebbe contribuire significativamente a correggere lo scarto dimensionale fra il modello e la prova sperimentale.

La seconda riguarda la modellazione della sorgente di calore. La distribuzione gaussiana adottata, descrive correttamente il profilo superficiale del fascio, ma non cattura la penetrazione volumetrica dell'energia in regime keyhole. L'introduzione di un modello che meglio descrive l'effettivo comportamento di tali fenomeni, consentirebbe di depositare energia a profondità maggiori, avvicinando il profilo simulato a quello sperimentale.

La terza, sempre legata alla dinamica del keyhole, è relativa alla modellazione della pressione di evaporazione attraverso l'equazione di Clausius-Clapeyron. Una calibrazione più accurata dei parametri di evaporazione, in particolare del coefficiente di accomodamento e della pressione di saturazione in funzione della temperatura, permetterebbe di riprodurre più fedelmente la pressione di recoil che sostiene il keyhole aperto, principale responsabile della profondità di penetrazione in regime ad alta densità di potenza.

In prospettiva, i principali sviluppi futuri riguardano quindi, il perfezionamento della modellazione della pressione di recoil e della dinamica del keyhole, al fine di ridurre la sottostima della profondità e correggere di conseguenza il rapporto P/L. Un ulteriore margine di miglioramento può essere quello dell'introdurre un'estensione del modello a diverse condizioni operative (che già sono state simulate), variando parametri quali potenza del laser e velocità di avanzamento, così da costruire una mappa di processo e ridurre il ricorso alla sperimentazione, rendendo quasi automatica la caratterizzazione di una saldatura di questo tipo, con un'affidabilità e riproducibilità intrinseca più elevata di quella attuale.

Bibliografia

- [1] Abrams Industries. *AISI 4140/4142 Alloy Steel Technical Data*. Technical Documentation. Abrams Industries, 2020.
- [2] M. J. Assael et al. “Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Aluminum and Liquid Iron”. In: *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 35.1 (2006), pp. 285–300. DOI: 10.1063/1.2149380.
- [3] Dörrenberg Edelstahl GmbH. *Material Data Sheet 42CrMo4 (1.7225)*. Technical Data Sheet. Engelskirchen, Germany: Dörrenberg Edelstahl GmbH, 2015.
- [4] T. Dubberstein et al. “Surface Tension and Density Data for Fe–Cr–Mo, Fe–Cr–Ni, and Fe–Cr–Mn–Ni Steels”. In: *Journal of Materials Science* 50.21 (2015), pp. 7227–7237. DOI: 10.1007/s10853-015-9277-5.
- [5] Flow Science Inc. *FLOW-3D User Manual, Version 12.0 - Heat Transfer and Phase Change*. Flow Science Inc. Santa Fe, NM, USA, 2023.
- [6] Lucefin S.p.A. *Technical Data Sheet 42CrMo4 (1.7225) According to Standards EN 10269*. Technical Report. DIN SEW 310. Esine, Italy: Lucefin S.p.A., 2012. URL: https://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/42crmo4astmen.pdf.
- [7] K. C. Mills. *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2002. ISBN: 978-1-85573-569-9.
- [8] K. C. Mills et al. “Marangoni Effects in Welding”. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 356.1739 (1998), pp. 911–925. DOI: 10.1098/rsta.1998.0196.
- [9] NASA Glenn Research Center. *CFD Analysis Process*. 2020. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/tutorial/process.html>.
- [10] “Thermal Study of a Cladding Layer of Inconel 625 in Directed Energy Deposition (DED) Process Using a Phase-Field Model”. In: *ResearchGate* (2021). DOI: 10.13140/RG.2.2.29889.66400.
- [11] Xometry Europe. *AISI 4140 Steel Properties and Applications*. Materials Database. Munich, Germany, 2021. URL: <https://xometry.eu>.