

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

**Sviluppo di piastre raffreddamento
batteria innovative attraverso
l'ottimizzazione topologica in 3D-CFD**

Relatori

Prof. Federico MILLO

Andrea BIANCO

Candidato

Giuseppe LOMBARDO

Anno accademico 2022-2023

Sommario

Il crescente impulso verso l'elettrificazione del settore della mobilità è accompagnato dallo sviluppo di nuove soluzioni tecniche volte a migliorare affidabilità e durata delle batterie, fattori indispensabili a garantire la sostenibilità della propulsione elettrica. Sebbene la totalità dei veicoli elettrici sia già dotata di un sistema per la gestione termica della batteria, miglioramenti significativi sono necessari per soddisfare i requisiti di controllo temperatura sempre più stringenti che caratterizzano le celle elettrochimiche. La ricerca scientifica in questo ambito è particolarmente concentrata sullo sviluppo di piastre di raffreddamento batteria sempre più ottimizzate e in grado di garantire l'ottimale funzionamento termico del sistema di accumulo dell'energia. Apporto fondamentale in quest'ottica è fornito dagli strumenti CAE, i quali consentono l'esplorazione di numerose configurazioni di design senza la necessità di prototipi fisici e test sperimentali, accelerando i tempi di sviluppo e riducendo i costi.

La tesi di laurea, realizzata in collaborazione con POWERTECH Engineering S.r.l., si propone di esplorare le potenzialità dell'ottimizzazione topologica applicata alla piastra di raffreddamento batteria di un generico veicolo. Attraverso l'utilizzo del software 3D-CFD StarCCM+, nel quale è stato recentemente integrato un ottimizzatore topologico, vengono condotte simulazioni con l'obiettivo di ottimizzare la distribuzione termica e la dissipazione del calore del pacco batterie. Inizialmente l'analisi si è concentrata su un sistema composto da due celle elettrochimiche, il cui design ottimale è stato validato con simulazioni dedicate, permettendo di ottenere una riduzione di 7°C di temperatura media, e di 5°C come massima differenza di temperatura sulle celle. Un'analisi di sensitività dei risultati alla dimensione della griglia di calcolo ed alle condizioni al contorno del modello ha permesso di ridurre le dimensioni del dominio, garantendo una riduzione drastica dei tempi di analisi che rende possibile l'utilizzo della metodologia in fase di sviluppo.

Successivamente è stata svolta un'analisi di sensitività ai parametri dell'algoritmo di ottimizzazione topologica, focalizzandosi sul passo di ottimizzazione, i coefficienti di sotto-rilassamento ed i vincoli di ottimizzazione.

L'attività di ricerca si è poi concentrata su un modulo di batteria contenente 12 celle, il cui design ottimizzato permette di limitare a 8°C l'escursione termica osservata sulla singola cella di batteria e porta a una temperatura media superficiale di 34°C.

In ultima analisi, al fine di valutare le potenzialità dell'ottimizzazione topologica senza l'esclusivo ricorso alla fabbricazione additiva, è stata modellata una piastra con circuito realizzabile tramite stampaggio, seppur ispirata ai risultati ottenuti con la topologica. I risultati ottenuti mostrano un degrado di prestazione termica

rispetto alla piastra risultante dall'ottimizzazione. I risultati confermano le enormi potenzialità dell'ottimizzazione topologica applicata alle piastre di raffreddamento batteria, per la realizzazione di design innovativi che consentano un preciso controllo delle condizioni termiche operative delle celle elettrochimiche. Le tecnologie realizzative delle piastre di raffreddamento, tuttavia, devono necessariamente coinvolgere l'adduzione di materiale (additive manufacturing), per permettere la realizzazione delle geometrie risultanti dal processo di ottimizzazione topologica

Indice

Elenco delle tabelle	III
Elenco delle figure	IV
1 Introduzione	1
1.1 Gestione termica delle batterie	1
1.2 Contesto e obiettivo della tesi	5
2 Modelli di simulazione	10
2.1 Geometria iniziale e caratteristiche dei materiali	10
2.2 Modello di piastra di raffreddamento per modulo batteria	13
2.3 Impostazioni di calcolo	14
2.3.1 Discretizzazione delle equazioni	15
2.3.2 Modello di scambio termico	18
2.4 Impostazioni di ottimizzazione topologica	22
2.4.1 Funzione di ottimizzazione	22
2.4.2 Solutore Adjoint	23
2.4.3 Modello fisico topologico	24
2.4.4 Modello di ottimizzazione topologica	26
2.4.5 Adaptive Mesh Refinement	27
3 Ottimizzazione della piastra di raffreddamento per due celle elettrochimiche	29
3.1 Simulazione di 2 celle elettrochimiche: Configurazione 1	29
3.1.1 Configurazione 1: validazione	37
3.2 Simulazione di 2 celle elettrochimiche: Configurazione 2	39
3.3 Simulazione di 2 celle elettrochimiche: Configurazione 3	44
3.3.1 Configurazione 3: validazione	46
3.3.2 Configurazione 3: validazione della geometria semplificata per processi produttivi tradizionali	49

4	Analisi di sensitività ai parametri del modello di ottimizzazione	53
4.1	Sensitività al fattore di scala	54
4.1.1	Variazione dei coefficienti di sotto-rilassamento	56
4.2	Configurazione con vincoli normalizzati	59
4.3	Sensitività al passo di ottimizzazione	62
5	Ottimizzazione della piastra di raffreddamento di un modulo di batteria	67
5.1	Impostazioni di simulazione	67
5.2	Simulazione di ottimizzazione della geometria	71
5.2.1	Confronto con differenti impostazioni del problema di otti- mizzazione	76
5.3	Validazione della geometria ottimizzata	80
5.3.1	Creazione di una geometria alternativa per la produzione tramite stampaggio	85
5.3.2	Confronto con geometria della piastra di raffreddamento realizzata con metodi di progettazione convenzionali	87
6	Conclusioni	90
	Bibliografia	96

Elenco delle tabelle

1.1	Principali caratteristiche delle più utilizzate tecnologie per le batterie.	1
2.1	Dimensioni modello.	11
2.2	Proprietà termofisiche dei materiali considerati nelle simulazioni.	12
2.3	Condizioni al contorno modello con 2 celle elettrochimiche.	13
2.4	Dimensioni del modello con 12 celle elettrochimiche.	14
3.1	Nodi di calcolo per regione.	30
3.2	Grandezze principali soluzione iniziale (primal flow) configurazione 1.	32
3.3	Nodi di calcolo per regione-configurazione 1 (simulazione di validazione della geometria).	38
3.4	Confronto parametri risultanti dall'ottimizzazione topologica (configurazione 1 e configurazione 2)	43
3.5	Confronto parametri risultanti dall'ottimizzazione topologica tra le tre configurazioni presentate	46
5.1	Sensitivà alle impostazioni della griglia di calcolo	69
5.2	Numero di celle per regione.	84

Elenco delle figure

1.1	Condizioni operative batteria [3].	2
1.2	Piastra di raffreddamento batteria (cooling plate).	4
1.3	Nissan Leaf (a) e relativo pacco batterie da 40 kWh (b)	5
1.4	BMW I3 e relativo pacco batterie costituito da 12 moduli con 8 celle ciascuno (42 kWh).	5
1.5	Hyundai Kona (a) e relativo pacco batterie da 64 kWh (b)	6
1.6	Porsche Taycan (a) e relativo pacco batteria da 94 kWh (b)	6
1.7	Ottimizzazione con metodo sperimentale ortogonale [6]	7
2.1	Geometria del modello.	12
2.2	Geometria del modello	13
2.3	Lunghezza d'ingresso per regime di flusso [9].	19
2.4	Flusso delle operazioni per l'ottimizzazione topologica.	25
2.5	Dettaglio di una zona di raffinamento automatico della griglia	28
3.1	Simulazione iniziale (primal flow) configurazione 1 - distribuzione di temperatura sulla superficie superiore della piastra di appoggio delle celle elettrochimiche	31
3.2	Soluzione iniziale (primal flow) configurazione 1 - velocità sezione x-y ($z=2,5$ mm)	31
3.3	Identificazione ostruzioni del flusso.	33
3.4	Andamento funzione obiettivo: configurazione 1.	34
3.5	Andamento dei vincoli di ottimizzazione: frazione in volume di solido sulla scala di sinistra e pressione in ingresso sulla scala di destra . .	34
3.6	Progressione della geometria ottimizzata: configurazione 1. In grigio le zone composte di solido (in trasparenza) ed in bianco le zone di fluido.	35
3.7	Confronto delle pareti ottenute con l'ottimizzazione con la geometria dei turbolatori	36
3.8	Criteri di estrazione della superficie finale.	37
3.9	Geometria estratta per la validazione-configurazione 1.	38

3.10	Confronto tra le distribuzioni di temperatura sulla superficie della batteria tra simulazione di ottimizzazione e validazione: configurazione 1.	39
3.11	Parametri termici e fluidodinamici-configurazione 1.	40
3.12	Confronto tra le distribuzioni di temperatura sulla superficie delle celle della soluzione iniziale (primal flow)	41
3.13	Progressione della geometria ottimizzata-configurazione 2: linee di flusso	42
3.14	Distribuzione ottimale di temperatura sulla superficie delle celle al termine dell'ottimizzazione	43
3.15	Funzione obiettivo-configurazione 2.	44
3.16	Campo di temperatura sulla superficie delle celle: soluzione iniziale (primal flow)	45
3.17	Distribuzione di temperatura sulla superficie delle celle per la piastra risultante dall'ottimizzazione	45
3.18	Confronto della distribuzione delle linee di flusso per la geometria dei condotti risultante dall'ottimizzazione	46
3.19	Validazione configurazione 3: rifinitura della superficie estratta . . .	47
3.20	Validazione configurazione 3: dettaglio su operazioni di chiusura del dominio di ottimizzazione	48
3.21	Confronto distribuzione di temperatura sulla superficie della cella: configurazione 3	48
3.22	Parametri termici e fluidodinamici-configurazione 3	49
3.23	Geometria dei canali ottenuti per estrusione con la configurazione 3	50
3.24	Distribuzione di temperatura sulla superficie delle celle	51
3.25	Confronto risultati simulazioni di validazione della configurazione 3	52
4.1	Correlazione tra funzione obiettivo e vincolo di pressione	54
4.2	Derivata funzione lagrangiana con configurazione 3.	55
4.3	Sensitività al fattore di scala.	57
4.4	Sensitività coefficienti di sotto-rilassamento.	58
4.5	Sensitività geometria	59
4.6	Sensitività alla normalizzazione dei vincoli: funzione obiettivo . . .	61
4.7	Sensitività alla normalizzazione dei vincoli: SVR	61
4.8	Confronto geometria finale	62
4.9	Confronto distribuzioni di temperatura sulla superficie delle celle (risultati simulazione di validazione)	62
4.10	Confronto tra scostamento dei parametri (ottimizzazione e validazione) ottenuto con il caso base e la modifica sulla normalizzazione dei vincoli	63
4.11	Sensitività al passo di ottimizzazione	64

4.12	Andamento vincolo di pressione con modifica del passo di ottimizzazione	65
4.13	Confronto tra geometrie: sensitività al passo di ottimizzazione . . .	65
4.14	Confronto temperatura tra setup base e modifica del passo di ottimizzazione relativamente alle rispettive validazioni	66
4.15	Scostamento dei parametri (ottimizzazione/validazione) con la modifica del passo di ottimizzazione	66
5.1	Geometria del modello	68
5.2	Dettaglio della griglia di calcolo	68
5.3	Distribuzione di temperatura configurazione iniziale (primal flow) .	70
5.4	Distribuzione di velocità configurazione iniziale (primal flow)	70
5.5	Andamento della frazione in volume di solido	72
5.6	Andamento della funzione obiettivo	72
5.7	Andamento dei vincoli di deviazione standard della temperatura sulla superficie di ogni cella: la linea in rosso evidenzia il massimo valore ammissibile di 1,5°C	73
5.8	Andamento della temperatura media superficiale di ogni cella	73
5.9	Andamento del vincolo di temperatura media sulla superficie complessiva delle 12 celle: in rosso il valore massimo ammissibile	74
5.10	Andamento del bilancio di portata tra condotti di ingresso ed uscita	74
5.11	Progressione delle linee di flusso	75
5.12	Campo di temperatura geometria ottimizzata	76
5.13	Evoluzione temperatura del fluido lungo i condotti	76
5.14	Andamento della frazione in volume di solido: ottimizzazione 2 . . .	77
5.15	Andamento della funzione obiettivo: ottimizzazione 2	78
5.16	Andamento dei vincoli di deviazione standard della temperatura delle singole celle: ottimizzazione 2 (in rosso il valore limite ammissibile di 1,5°C)	78
5.17	Andamento del vincolo di temperatura media sulla superficie complessiva delle 12 celle: ottimizzazione 2	79
5.18	Campo di temperatura risultante dal processo di ottimizzazione con diversi valori di soglia del vincolo di temperatura media	79
5.19	Confronto distribuzione delle linee di flusso con diversi valori di soglia del vincolo di temperatura media	80
5.20	Andamento della funzione obiettivo: ottimizzazione 3	81
5.21	Andamento dei vincoli di deviazione standard della temperatura delle singole celle: ottimizzazione 3	81
5.22	Confronto distribuzioni di temperatura con diverse funzioni obiettivo	82
5.23	Confronto distribuzione delle linee di flusso con diverse funzioni obiettivo	82
5.24	Geometria dei condotti: piastra di raffreddamento ottimizzata . . .	83

5.25	Sezione della griglia di calcolo con dettaglio degli strati di prismi a parete: in azzurro ed in viola le due piastre a chiusura del volume di ottimizzazione, in rosa il volume solido all'interno del volume di ottimizzazione ed in marrone il volume fluido.	83
5.26	Validazione ottimizzazione: distribuzione di temperatura sulla superficie delle celle	84
5.27	Confronto tra soluzione iniziale, ottimizzazione topologica e validazione per i parametri termici e fluidodinamici	85
5.28	Modellazione della geometria ottimizzata per produzione mediante stampaggio	86
5.29	Validazione ottimizzazione: confronto distribuzione di temperatura tra geometria ottimizzata e geometria alternativa (stampaggio) . . .	87
5.30	Validazione ottimizzazione: confronto temperatura del fluido tra geometria ottimizzata e geometria alternativa (stampaggio)	87
5.31	88
5.32	Confronto distribuzione di temperatura tra ottimizzazione topologica e progettazione convenzionale	89
5.33	Confronto tra piastra di raffreddamento progettata mediante ottimizzazione topologica, suo adattamento alla produzione per stampaggio e piastra ottenuta con metodi di progettazione tradizionali (piastra di riferimento)	89

Capitolo 1

Introduzione

L'impiego delle batterie a ioni di litio, come mezzo di stoccaggio dell'energia a bordo dei veicoli elettrici ed ibridi, ha conosciuto nel corso degli ultimi decenni un notevole sviluppo. Le motivazioni del successo di questa tecnologia tra comunità scientifica e industria automobilistica sono legate ad alcune delle sue caratteristiche intrinseche, come l'elevata densità energetica, una buona capacità di ricarica, la lunga durata e un ridotto effetto memoria (Tab. 1.1). Dall'inizio della ricerca,

-	Acido/Piombo	Ni-MH	Ni-Cd	Li-ion
Densità energetica [$\frac{Wh}{kg}$]	30-50	<100	<50	100-250
Durata	Medio/bassa	Medio/bassa	Medio/bassa	Medio/alta
Velocità ricarica	Moderata	Moderata	Moderata	Moderata/alta
Effetto memoria	Elevato	Moderato	Elevato	Ridotto

Tabella 1.1: Principali caratteristiche delle più utilizzate tecnologie per le batterie.

verso la fine degli anni '90, numerosi progressi sono stati compiuti per migliorarne le prestazioni, l'affidabilità e la sicurezza. Diverse formulazioni chimiche, tra cui le varianti al litio-ferrofosfato (LiFePO_4), litio-manganese (LiMn_2O_4), litio-cobalto (LiCoO_2) e litio-nichel-manganese-cobalto (LiNiMnCoO_2), sono state sviluppate per ampliare le opzioni disponibili a soddisfare le specifiche esigenze delle applicazioni automobilistiche. Tuttavia, vi sono ancora diverse sfide da affrontare, tra cui l'aumento dell'autonomia, la riduzione dei costi, l'ottimizzazione del comportamento termico e il miglioramento della sicurezza delle batterie.

1.1 Gestione termica delle batterie

Una efficiente gestione termica delle batterie è di fondamentale importanza per garantire il corretto funzionamento delle celle elettrolitiche e la sicurezza del componente. Le batterie agli ioni di litio sono infatti caratterizzate da un ridotto campo

di temperatura operativa accettabile per il loro utilizzo (Fig. 1.1), dipendente dalle caratteristiche della specifica batteria, ma generalmente identificato con 15-35°C, in cui si previene la diminuzione delle prestazioni e il presentarsi di fenomeni irreversibili che portano ad un invecchiamento accelerato [1].

Il mantenimento della temperatura è fondamentale anche per mitigare il fenomeno del "thermal runaway", ossia un aumento incontrollato della temperatura che accelera ulteriormente il surriscaldamento della batteria, con conseguente aumento della pressione interna e possibile esplosione [2].

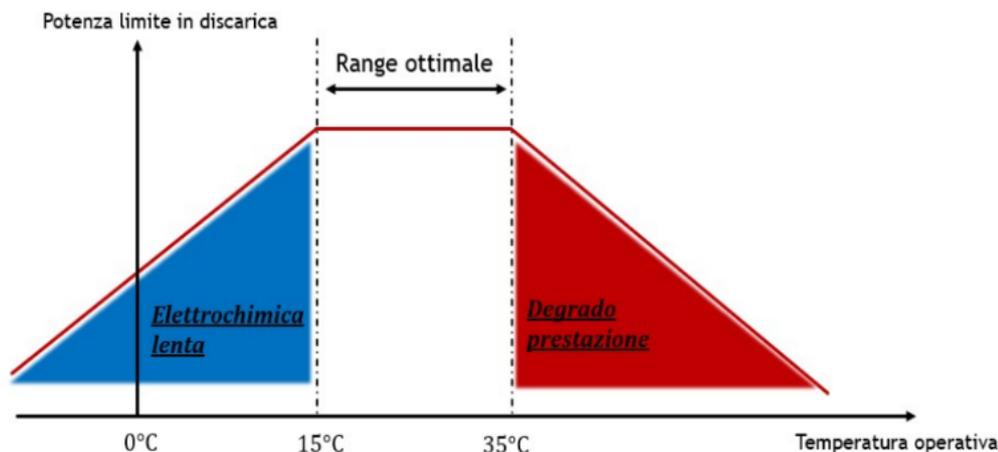


Figura 1.1: Condizioni operative batteria [3].

La problematica della gestione termica richiede quindi la progettazione di un apposito circuito di raffreddamento, che sia in grado di asportare efficacemente il calore generato dalle reazioni elettrochimiche e dalle perdite di energia dovute alle inefficienze del sistema.

A tal proposito, sono stati sviluppati alcuni modelli di calcolo, come quello proposto da Bernardi et al. [4], che permettono di stimare, noti i parametri caratteristici della batteria, il calore prodotto al variare delle condizioni esterne (temperatura) e di quelle operative (velocità del ciclo di scarica). Tali modelli, accoppiati con un dettagliata rappresentazione dei fenomeni di scambio termico, possono essere utilizzati per la caratterizzazione delle prestazioni termiche della batteria in fase di dimensionamento del circuito di raffreddamento.

Nell'ambito dell'industria automobilistica, diverse tipologie di sistemi di raffreddamento sono stati proposti, con lo scopo di individuare un buon compromesso tra specifiche richieste del veicolo e complessità/costo del sistema:

- **Sistemi basati su raffreddamento ad aria** - Possono essere attivi, se prevedono l'utilizzo di ventilatori/soffianti, o passivi, se utilizzano soltanto

dissipatori di calore. Questi sistemi hanno il vantaggio di una ridotta complessità, in quanto non richiedono circuiti aggiuntivi per il trasferimento del calore ma soltanto condotti atti a convogliare l'aria nelle zone critiche della batteria. Sono inoltre caratterizzati da elevata affidabilità e basso costo. Tra gli svantaggi è possibile evidenziare una ridotta efficienza termica: la capacità di scambio termico è infatti limitata dalla temperatura dell'aria esterna e dalla velocità di flusso. Inoltre questi sistemi sono caratterizzati da distribuzione non uniforme del calore e possibili problematiche di rumore e vibrazione nei sistemi attivi.

- **Sistemi a cambio di fase (Phase Change Material)** - Sono sistemi passivi che utilizzano materiali a cambiamento di fase per assorbire e rilasciare il calore in modo efficace. Questi sistemi hanno una discreta capacità di accumulo del calore, che gli permette di assorbire elevate quantità di calore senza significativi aumenti di temperatura, essendo così ideali per applicazioni in cui è richiesta elevata stabilità termica. Non richiedono inoltre componenti in movimento e quindi spesa energetica aggiuntiva per il loro funzionamento. Nonostante questi vantaggi, la limitata capacità di raffreddamento rispetto ad altri sistemi, l'aumento di ingombro e peso e l'elevato costo dei materiali PCM, ne rendono l'utilizzo per applicazioni veicolistiche molto limitato [5].
- **Sistemi ad evaporazione (heat pipe cooling)** - Questi sistemi sfruttano l'evaporazione di un fluido di lavoro (che può essere un liquido, un gas o una loro miscela) all'interno di un tubo di rame o alluminio per asportare il calore dalla sorgente calda e rilasciarlo attraverso una sezione di condensazione, in contatto con una superficie di raffreddamento. A differenza dei sistemi PCM hanno un'elevata efficienza termica ed una rapida dissipazione del calore, che ne favorisce l'uso per applicazioni dove sia richiesta una rapida e consistente asportazione di calore a spese però di un minor controllo dell'uniformità di temperatura
- **Sistemi a liquido** - Sono i sistemi al momento più utilizzati per le applicazioni automobilistiche in quanto offrono una serie di vantaggi notevoli in termini di elevata capacità di dissipazione del calore, uniformità e possibilità di regolazione della temperatura. Sono costituiti da un circuito di raffreddamento stampato (cooling plate) che può essere integrato nella struttura della batteria o posizionato esternamente, in cui scorre un fluido di raffreddamento (tipicamente acqua e glicole) che asporta il calore dalla batteria e lo trasferisce ad un circuito di scambio termico esterno (scambiatore aria-acqua o aria-aria) senza che avvenga passaggio di fase del liquido refrigerante. Richiedono inoltre la presenza di una pompa per la circolazione del fluido di lavoro e di un serbatoio di espansione per gestire l'espansione/contrazione del fluido con

le variazioni di temperatura. In Figura 1.2 è riportato un esempio di piastra raffreddamento batteria in condizioni di smontaggio, con evidenziato il canale di passaggio del fluido refrigerante. Questa è la tecnologia che verrà studiata nel corso della tesi.

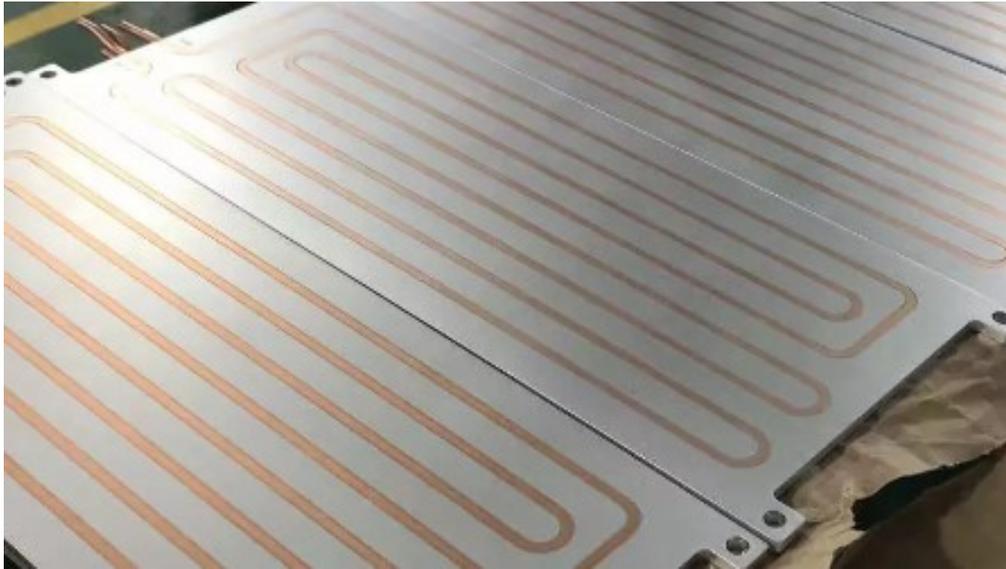


Figura 1.2: Piastra di raffreddamento batteria (cooling plate).

Attualmente i sistemi di raffreddamento a liquido sono in grado di garantire buone prestazioni in termini di gestione termica, permettendo di aumentare la vita utile delle batterie a cui sono accoppiati. Tra le auto di segmento medio, diverse case automobilistiche come Nissan (Figura 1.3), BMW (Figura 1.4), Hyundai (Figura 1.5) e Volkswagen, hanno raggiunto prestazioni consistenti in termini di controllo del campo di temperatura operativo delle celle batteria: le batterie del veicolo arrivano infatti ad operare in un ampio intervallo di temperatura, compreso tra -20°C e 50°C , mentre i sistemi di raffreddamento sono progettati per garantire una temperatura di funzionamento delle celle elettrochimiche compresa tra 20°C e 40°C .

Anche tra i veicoli ad alte prestazioni, come la Porsche Taycan (Figura 1.6), grazie a sistemi di raffreddamento ottimizzati a gestire condizioni operative più severe (potenze più elevate), si riesce a garantire un'elevata vita utile del pacco batterie, mantenendo la temperatura di funzionamento delle celle sempre all'interno dell'intervallo 20°C - 40°C .



(a)

(b)

Figura 1.3: Nissan Leaf (a) e relativo pacco batterie da 40 kWh (b)



Figura 1.4: BMW i3 e relativo pacco batterie costituito da 12 moduli con 8 celle ciascuno (42 kWh).

1.2 Contesto e obiettivo della tesi

Il continuo incremento delle prestazioni garantite dagli accumulatori e l'aumento della potenza elettrica installata su veicolo, per massimizzarne potenza e autonomia, pongono sempre più in risalto le problematiche di gestione termica delle celle elettrochimiche. In quest'ottica diventa indispensabile il ricorso a metodi di ottimizzazione della piastra di raffreddamento della batteria per massimizzarne la resa termica tenendo sotto controllo i vincoli legati al peso e all'ingombro.



(a)

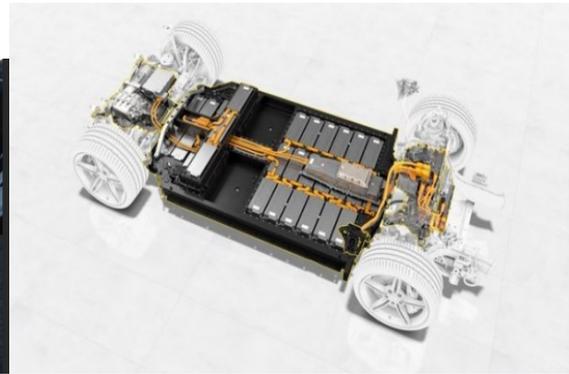


(b)

Figura 1.5: Hyundai Kona (a) e relativo pacco batterie da 64 kWh (b)



(a)



(b)

Figura 1.6: Porsche Taycan (a) e relativo pacco batteria da 94 kWh (b)

Nella letteratura scientifica è possibile trovare numerose ricerche che si pongono come obiettivo la progettazione di sistemi di raffreddamento sempre più efficienti, ma la maggior parte di queste utilizza metodi di ottimizzazione parametrica, in cui si cerca di individuare la migliore geometria per un dato set di parametri di input. Tra le tipologie di ottimizzazione maggiormente usate per questi scopi si può fare riferimento al metodo di progettazione sperimentale ortogonale (**orthogonal experimental design**), che permette di ridurre il numero di simulazioni necessarie per l'analisi di sensitività ai diversi parametri. Identificando all'interno di una matrice i fattori di influenza della prestazione ed i loro livelli di variazione, che definiscono un numero limitato di combinazioni, si procede a valle delle singole simulazioni ad un'analisi statistica dei dati che permetta di individuare la geometria ottimale. Ye et al. [6] utilizzano questo metodo, combinato alla simulazione fluidodinamica

(Computational Fluid Dynamics CFD), per individuare la combinazione ottimale di sezione trasversale dei canali, numero di canali e gap tra le celle di batteria, avendo come obiettivi la minimizzazione delle cadute di pressione introdotte dal circuito e la differenza di temperatura risultante sulla superficie della batteria. I risultati di questo lavoro portano ad una riduzione di temperatura massima sulle celle di circa 4°C rispetto ad una geometria di riferimento, insieme ad un'ottimizzazione della spesa energetica.

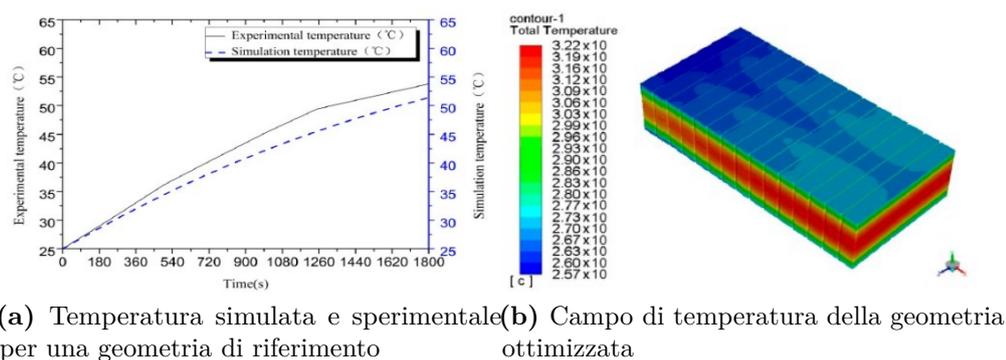


Figura 1.7: Ottimizzazione con metodo sperimentale ortogonale [6]

Un'altra tipologia molto utilizzata è l'ottimizzazione basata su modelli surrogati (**surrogate model-based optimization**), la quale presenta il vantaggio di un ridotto costo computazionale e quindi tempistiche ridotte rispetto al metodo di progettazione sperimentale ortogonale, introducendo però un'approssimazione che può influire sulla qualità del risultato. Il primo passo del metodo prevede la creazione di un insieme di dati di addestramento, individuato valutando, per un dato numero di variabili indipendenti, la risposta della funzione obiettivo. Successivamente i dati di addestramento vengono utilizzati per costruire un modello matematico semplificato, attraverso regressioni o reti neurali, che approssimi la funzione obiettivo. Infine questo modello viene utilizzato per eseguire l'ottimizzazione con ridotti tempi di calcolo a spese di una approssimazione del risultato dipendente dalla validità del modello surrogato.

Un esempio di applicazione di questo processo di ottimizzazione è stato proposto da Chen et al. [7] per un'ottimizzazione multi-obiettivo dipendente da parametri geometrici dei canali.

In questo contesto, si inserisce una nuova frontiera della ricerca sui metodi di ottimizzazione, che prevede l'utilizzo dell'ottimizzazione topologica (**topology optimization**), già ampiamente utilizzata in ambito strutturale, ma ancora poco esplorata per i problemi termofluidodinamici. Questa tecnica propone l'utilizzo di un opportuno algoritmo di ottimizzazione per individuare, all'interno di un volume

di controllo, la distribuzione di materiale più adatta a minimizzare/massimizzare la funzione obiettivo scelta. Tale metodo presenta notevoli vantaggi rispetto alle tecniche oggi usate: elimina infatti la necessità di dover utilizzare una geometria già definita da ottimizzare sulla base dei parametri scelti, lasciando totale libertà all'ottimizzatore di trovare la geometria congeniale per gli scopi prefissati. Permette inoltre di minimizzare l'incertezza sulla reale identificazione di ottimo globale e non locale, e di ridurre l'approssimazione introdotta con il metodo basato su modelli surrogate, aumentando però il costo computazionale.

Diverse problematiche hanno rallentato lo sviluppo delle tecniche di ottimizzazione topologica per i problemi fluidodinamici, a differenza del largo impiego di cui gode in campo strutturale. Una delle ragioni è sicuramente la maggior complessità e quindi gli elevati tempi di calcolo richiesti per la risoluzione iterativa delle equazioni alle derivate parziali, che rendono proibitiva l'integrazione con un modello di ottimizzazione topologica, senza un'elevata potenza di calcolo. Inoltre la complessa interazione dei modelli fisici, che si verifica con le equazioni di Navier-Stokes e la necessità di una accurata descrizione dello strato limite per simulazioni di fenomeni termici e fluidodinamici, aumenta sensibilmente la già elevata complessità del modello di ottimizzazione. Un ulteriore aspetto è legato all'attuale impossibilità di applicare modelli di turbolenza, la cui presenza è tutt'altro che trascurabile in molte applicazioni, limitando molto le possibili applicazioni di questo tipo di ottimizzazione. Attualmente la continua crescita della potenza di calcolo offerta dai processori e il continuo sviluppo e miglioramento delle prestazioni offerte dai software di fluidodinamica computazionale stanno rendendo possibile l'esplorazione dell'ottimizzazione topologica anche in questo ambito.

L'obiettivo della tesi consiste in un'indagine sulle potenzialità dell'ottimizzazione topologica applicata ad una piastra di raffreddamento batteria per applicazioni automotive. Tale indagine viene realizzata usufruendo di un software commerciale di fluidodinamica computazionale (**Star CCM+**) su cui tale metodo è stato di recente implementato. Nel successivo capitolo 2 viene introdotta una descrizione della geometria iniziale e delle relative approssimazioni fatte per i due casi di studio analizzati: un primo caso semplificato e di dimensioni ridotte utilizzato in fase di sviluppo del progetto ed il secondo rappresentativo di una reale applicazione su veicolo. Vengono inoltre presentati tutti i modelli matematici utilizzati nelle simulazioni, dai solutori della fisica del problema fino ad una dettagliata descrizione dello schema di ottimizzazione topologica.

Nel capitolo 3 viene presentata una prima fase preliminare di indagine dell'algoritmo di ottimizzazione topologica, realizzata sul modello di piastra di raffreddamento semplificato, rappresentativo del circuito di raffreddamento di una batteria costituita da due sole celle. I risultati di ottimizzazione ottenuti su tale modello semplificato sono stati validati con simulazioni dedicate, confermando le prestazioni termiche attese. Viene discussa inoltre un'analisi di sensitività alle condizioni al

contorno e alle dimensioni della griglia di calcolo, con il duplice scopo di ridurre ulteriormente i tempi di calcolo, e cercare di adattare la geometria ottenuta alle tecniche di produzione convenzionali.

Il capitolo 4 presenta un resoconto delle simulazioni realizzate, al fine di analizzare le variazioni di andamento delle grandezze caratteristiche conseguenti ad alcune modifiche introdotte ai parametri dello schema di calcolo dell'ottimizzatore.

Nel capitolo 5, viene infine aumentata la complessità della geometria iniziale al fine di renderla rappresentativa di una reale applicazione per veicoli. Vengono quindi forniti i risultati dell'ottimizzazione ottenuti con questo modello di partenza, attenționando le simulazioni di validazione sia della geometria ottenibile per fabbricazione additiva che del caso 'adattato' alle tecniche di produzione convenzionali. Viene infine presentato un confronto tra i precedenti design ed una geometria, comunemente utilizzata sulle piastre di raffreddamento attualmente utilizzate per queste applicazioni, simulata nelle stesse condizioni di funzionamento.

Capitolo 2

Modelli di simulazione

La fluidodinamica computazionale viene utilizzata come strumento di simulazione per descrivere i fenomeni fisici che avvengono all'interno del fluido di lavoro nelle piastre di raffreddamento batteria, incluso lo scambio termico tra il fluido e le pareti dei componenti a contatto con esso. In questo capitolo viene presentata la geometria base di piastra di raffreddamento inizialmente considerata per definire lo spazio a disposizione dell'ottimizzatore topologico. A seguire vengono introdotti sinteticamente i modelli di simulazione utilizzati nel corso dell'attività di analisi, riassumendo la configurazione delle simulazioni svolte in Star-CCM+. Viene infine presentata la geometria iniziale anche per il modello di simulazione del modulo di batteria, analizzato nella parte conclusiva della tesi.

2.1 Geometria iniziale e caratteristiche dei materiali

Il solutore di ottimizzazione topologica (**topology optimization**) richiede la definizione di un volume di ottimizzazione rappresentativo del dominio da ottimizzare (**design space**).

Il volume di ottimizzazione in questo studio è stato definito come lo spazio racchiuso tra due piastre rappresentative dello spessore superiore ed inferiore della piastra di raffreddamento batteria, tra le quali saranno contenuti i condotti di raffreddamento generati dall'ottimizzazione topologica.

La geometria inizialmente realizzata è stata generata allo scopo di rappresentare un sistema di raffreddamento per un gruppo di due celle elettrochimiche. A tale scopo sulla superficie della piastra superiore del sistema di raffreddamento sono stati ricavati due rettangoli rappresentativi della zona di contatto con le celle batteria (Fig. 2.1). In questo modo, le celle non vengono modellizzate direttamente,

ma si considera solo la loro impronta sulla superficie della piastra.

Come risultato di questa semplificazione, si trascura la distribuzione di temperatura lungo l'asse verticale della cella e si approssima la temperatura di tutte le sue superfici con quella ottenuta nella zona di contatto con la piastra, con un notevole guadagno in termini di dimensioni del dominio e del costo computazionale della simulazione.

Si tratta di una semplificazione tipicamente adottata in fase di impostazione della geometria della piastra di raffreddamento batteria, scopo di questa indagine.

Simulazioni più dettagliate, che tengano conto anche della geometria delle celle, sono svolte in fasi di progetto più avanzate, come validazione dei risultati termici attesi.

Nome	Lunghezza	Larghezza	Altezza
Volume di ottimizzazione	336 mm	164 mm	5 mm
Piastra superiore	336 mm	164 mm	2 mm
Piastra inferiore	336 mm	164 mm	1 mm
Condotto ingresso	50 mm	25 mm	5 mm
Condotto uscita	100 mm	25 mm	5 mm
Superficie celle	128 mm	84 mm	-

Tabella 2.1: Dimensioni modello.

La geometria viene ultimata aggiungendo due condotti, rispettivamente di ingresso e di uscita, di collegamento tra il circuito primario di distribuzione del fluido ed il volume di ottimizzazione.

Una rappresentazione su più viste della geometria completa, le cui dimensioni sono fornite in tabella 2.1, viene riportata in figura 2.1: il volume di ottimizzazione (design space) nelle condizioni iniziali viene considerato come riempito unicamente da fluido.

Come fluido di lavoro, si sceglie di utilizzare acqua, con le proprietà termofisiche definite in tabella 2.2, e ricavate dal database dei materiali presente nel software.

La scelta di considerare acqua pura nelle simulazioni, invece che una miscela acquaglicole tipicamente usata in ambito automotive, è stata dettata dalla volontà di semplificare e velocizzare il calcolo, evitando il ricorso a tabelle per l'interpolazione delle proprietà della miscela. La scelta delle proprietà del materiale per le due piastre ricade su alluminio puro, sempre allo scopo di utilizzare i valori di riferimento già forniti dal database del software e riportati in tabella 2.2. In tabella 2.3 vengono riepilogate le diverse condizioni al contorno introdotte su tutte le superfici che delimitano il dominio.

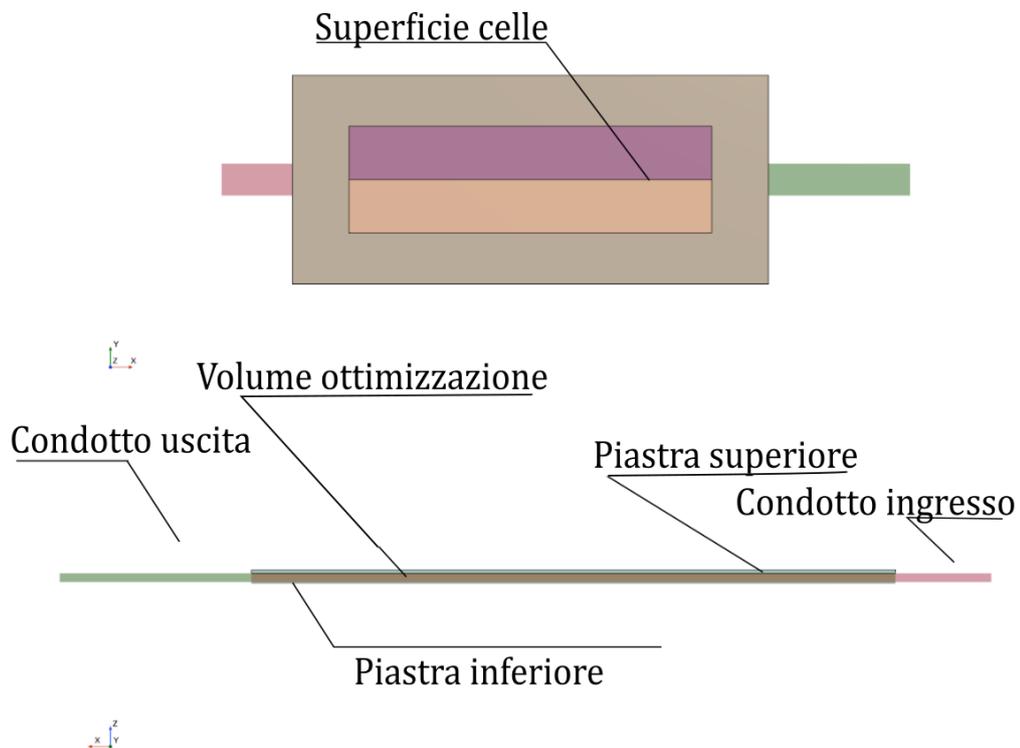


Figura 2.1: Geometria del modello.

Proprietà	Acqua	Alluminio
Densità [$\frac{kg}{m^3}$]	997.6	2702
Viscosità dinamica [$Pa \cdot s$]	$8.9 \cdot 10^{-4}$	-
Calore specifico [$\frac{J}{kg \cdot K}$]	4182	903
Conduttività termica [$\frac{W}{m \cdot K}$]	0.62	237

Tabella 2.2: Proprietà termofisiche dei materiali considerati nelle simulazioni.

Superficie (Regione)	Condizione al contorno
Sezione ingresso (Canale ingresso)	Portata $Q = 1 \frac{l}{min}$
Sezione ingresso (Canale ingresso)	Temperatura $T_{inlet} = 25 \text{ } ^\circ C$
Sezione uscita (Canale uscita)	Pressione $p_{out} = 1 \text{ bar}$
Superficie cella (Piastra superiore)	Potenza termica $\dot{q} = 60 \text{ W}$
Pareti (Piastre e Volume ottimizzazione)	Adiabatiche

Tabella 2.3: Condizioni al contorno modello con 2 celle elettrochimiche.

2.2 Modello di piastra di raffreddamento per modulo batteria

Al termine dello studio sul dominio di ridotte dimensioni, è stato realizzato un modello rappresentativo di un modulo di 12 celle elettrochimiche, sfruttando una configurazione tipica del pacco batteria utilizzato per gli autoveicoli.

Il modello in figura 2.2 è costituito dal volume di ottimizzazione, sulle cui estremità

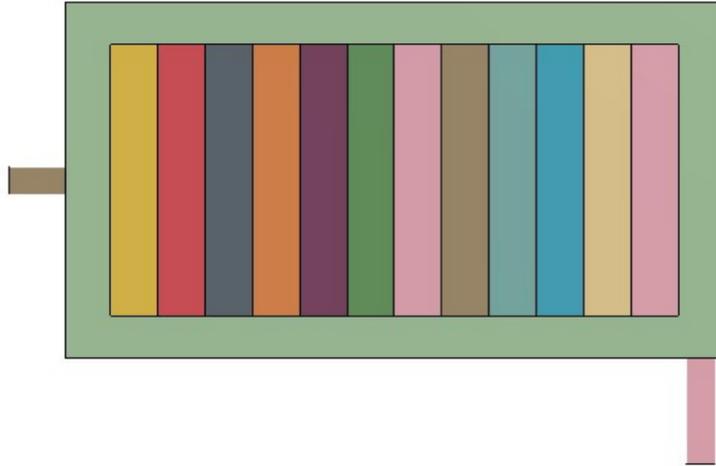


Figura 2.2: Geometria del modello

vengono inserite le due piastre di raffreddamento, necessarie a modellizzare la superficie di appoggio delle celle elettrochimiche e lo spazio che racchiude il volume di ottimizzazione. Diversamente dal caso di studio descritto nel paragrafo 2.1 le celle elettrochimiche sono però disposte in direzione ortogonale rispetto all'ingresso del fluido. La geometria dei canali di ingresso ed uscita è la stessa del paragrafo 2.1, viene però modificata la disposizione del canale di uscita che si trova adesso sulla superficie laterale (inclinazione di 90 gradi rispetto all'asse del condotto di ingresso). Un riepilogo delle dimensioni del dominio è fornito in tabella 2.4.

Nome	Lunghezza	Larghezza	Altezza
Volume di ottimizzazione	584 mm	336 mm	5 mm
Piastra superiore	584 mm	336 mm	2 mm
Piastra inferiore	584 mm	336 mm	1 mm
Condotto ingresso	50 mm	25 mm	5 mm
Condotto uscita	100 mm	25 mm	5 mm
Superficie celle	504 mm	128 mm	-

Tabella 2.4: Dimensioni del modello con 12 celle elettrochimiche.

Le proprietà del fluido e del materiale per le piastre solide fanno sempre riferimento alla tabella 2.2. Anche per le condizioni al contorno è possibile far riferimento alla tabella 2.3 del modello geometrico precedente, con l'unica variazione della portata in ingresso adesso incrementata ad un valore di $1,5 \left[\frac{l}{min} \right]$ per fronteggiare il maggior flusso termico causato dalla presenza della potenza termica prodotta dalle 12 celle (60 Watt per ciascuna cella).

2.3 Impostazioni di calcolo

In questo e nei successivi paragrafi vengono presentati i modelli utilizzati per tutte le simulazioni svolte. L'elenco di seguito presentato riassume e descrive brevemente la funzionalità dei singoli solutori, necessari a descrivere la fisica del problema ed implementare lo schema di ottimizzazione:

- **Stazionario:** - definisce come viene realizzata la discretizzazione temporale (metodo esplicito o implicito) delle equazioni di conservazione.
- **Coupled Flow e Constant density:** - modello di risoluzione delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto per il fluido di lavoro. Il modello 'Constant density' elimina la variabile densità, trattandosi di un liquido.
- **Coupled Energy e Coupled Solid Energy:** - modelli che risolvono l'equazione di conservazione dell'energia per il fluido e per il solido.
- **Laminare:** - modello che definisce il regime di flusso.
- **Adjoint (Fluido e Solido):** - modello di valutazione dei gradienti delle grandezze rispetto alle variabili di ottimizzazione. Richiede l'uso esclusivo del solutore 'Coupled' per i flussi.
- **Ottimizzazione topologica:** - modello di ottimizzazione della geometria.

- **Griglia adattiva:** - modello di raffinamento automatico della griglia di calcolo basato su specifico criterio.

Maggiori dettagli sugli aspetti fondamentali di ogni specifico solutore vengono forniti nei successivi paragrafi e sottoparagrafi di questo capitolo.

2.3.1 Discretizzazione delle equazioni

La predizione delle caratteristiche del flusso nel dominio di calcolo (**design space**), prevede la risoluzione del sistema di equazioni di conservazione della massa, quantità di moto ed energia. Tutte le equazioni possono essere scritte, applicando il teorema di Gauss, nella forma integrale dell'equazione di trasporto della proprietà scalare ϕ definita in 2.1.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho \phi \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int_S \nu \nabla \phi \cdot \vec{n} dS + \int_V S_\phi dV \quad (2.1)$$

I quattro termini esprimono rispettivamente, da sinistra a destra:

- **Termine transitorio:** - definisce la velocità di variazione nel tempo della proprietà nel volume di controllo.
- **Termine convettivo:** - definisce velocità di variazione della proprietà dovuto al trasporto convettivo attraverso la superficie del volume di controllo.
- **Termine diffusivo:** - definisce la velocità di variazione della proprietà dovuto al trasporto diffusivo attraverso la superficie del volume di controllo. Il coefficiente ν è il coefficiente di diffusione della proprietà scalare " $\vec{\phi}$ ".
- **Termine sorgente:** - definisce il tasso di generazione/distruzione della proprietà scalare dovuto alla presenza di sorgenti o pozzi nel volume di controllo.

Il calcolo dei termini convettivo, diffusivo e sorgente richiede la discretizzazione spaziale dei flussi delle grandezze fisiche nel dominio di calcolo, mentre il calcolo del termine transitorio richiede la discretizzazione temporale delle grandezze.

Discretizzazione spaziale

La discretizzazione con il metodo dei volumi finiti permette di trasformare il modello matematico di equazioni alle derivate parziali in un set di equazioni algebriche discrete (del tipo in 2.2), risolvibili, per via della non linearità delle equazioni, con un processo iterativo.

$$\frac{d}{dt}(\rho\phi V)_0 + \sum_f [\rho\vec{v}\phi]_f = \sum_f [\nu\nabla\phi \cdot \vec{n}dS]_f + S_{\phi 0}V_0 \quad (2.2)$$

Gli integrali di volume vengono quindi approssimati con il prodotto tra valore medio della grandezza a centro cella ed il volume della cella. I termini di flusso, convettivi e diffusivi, vengono approssimati con la sommatoria delle grandezze sulle facce della cella. Lo schema numerico utilizzato per la ricostruzione dei flussi può essere variato all'interno del programma di calcolo Star-CCM+ sulla base delle preferenze dell'utente, scegliendo ad esempio tra [8]:

- **metodo upwind 1st o 2nd order:** risultano indicati per flussi direzionali o con elevati gradienti di velocità. Il metodo al 1° ordine risulta molto stabile, ma introduce elevata approssimazione in presenza di discontinuità del campo di moto per la sua natura dissipativa. Nel caso di elevate discontinuità nel campo di velocità o nelle proprietà del fluido risulta più accurato il metodo al 2° ordine.
- **Hybrid MUSCL 3rd order/central-differencing:** è uno schema ibrido che combina il metodo MUSCL (3° ordine di precisione upwind) con il metodo delle differenze centrate (3° ordine di precisione), garantendo così minori approssimazioni rispetto a schemi del 2° ordine con una buona stabilità di calcolo.

Per lo studio in esame, si sceglie di mantenere il metodo upwind del secondo ordine, in quanto compatibile con i fenomeni fisici che avvengono all'interno della piastra di raffreddamento batteria, ed essendo di precisione adeguata la discretizzazione dei flussi risultante dal calcolo.

L'insieme delle variabili di trasporto costituisce il sistema lineare espresso dall'equazione discreta 2.3 per la generica proprietà scalare " $\vec{\phi}$ "

$$\frac{\alpha_p}{\omega} \Delta\phi_p + \sum_n \alpha_n \Delta\phi_n = r \quad (2.3)$$

In 2.3 il " Δ " della variabile di trasporto è definito come differenza tra i valori all'iterazione k e $k+1$, il pedice " n " indica le celle vicine alla cella " p ", " α_p " e " α_n " sono specifici coefficienti di discretizzazione, " ω " è il fattore di sotto-rilassamento e " r " è il residuo. Quest'ultimo si riferisce alla forma discreta della 2.1 e per sua definizione diventa zero quando l'equazione discreta viene soddisfatta esattamente: è infatti considerato come principale parametro per la valutazione della convergenza della soluzione approssimata.

La 2.3 può essere riscritta in forma matriciale per tutte le variabili di stato del sistema.

$$[A] \vec{\phi} = \vec{r} \quad (2.4)$$

con "A" matrice dei coefficienti discreti, " $\vec{\phi}$ " vettore delle variabili di trasporto e " \vec{r} " vettore dei residui.

La progressione della soluzione viene controllata attraverso due cicli iterativi, uno interno ed uno esterno, che agiscono rispettivamente sulla soluzione del sistema lineare e su quella delle equazioni discrete di bilancio.

Per il ciclo interno si ricorre al solutore lineare multigriglia (Algebraic MultiGrid solver AMG [8]), che si occupa di risolvere l'equazione discretizzata su griglie di calcolo di diversa dimensione: in prima istanza vengono considerate griglie virtuali con celle più grossolane della dimensione desiderata. Successivamente le soluzioni ottenute vengono riportate progressivamente su griglie più raffinate fino a raggiungere esattamente la dimensione finale richiesta. Questo artificio matematico viene usato poichè la soluzione iterativa è in grado di ridurre efficacemente le componenti dell'errore numerico che hanno lunghezza d'onda confrontabile con le dimensioni caratteristiche delle celle (componenti ad alta frequenza): l'utilizzo di scale più grossolane permette di rendere le dimensioni delle celle confrontabili con la lunghezza d'onda delle componenti di bassa frequenza, riducendo così efficacemente anche questa componente di errore numerico. Il sistema, una volta depurato di tutte le componenti di errore, viene riscaldato alla sua dimensione originaria.

Discretizzazione temporale

Per le equazioni di conservazione si utilizza il solutore 'Coupled Flow', risolvendo le tre equazioni di conservazione accoppiate come unica equazione vettoriale: l'equazione della quantità di moto permette di valutare il campo di velocità, con l'equazione di continuità si calcola la pressione, ottenendo poi la densità mediante l'equazione di stato del fluido. Il campo di temperatura viene invece valutata mediante l'equazione di energia.

Dal punto di vista della discretizzazione temporale, nella presente attività sono state simulate esclusivamente condizioni di funzionamento stazionarie, in quanto nello studio del circuito di raffreddamento si è scelto di focalizzarsi sul comportamento a regime del pacco batteria. Di conseguenza per rappresentare la batteria vengono considerate delle sorgenti termiche costanti, rappresentative dell'energia rilasciata dalle celle elettrochimiche in condizioni di utilizzo continuativo.

Questo specifico solutore, anche nel caso di simulazione stazionaria, performa un'integrazione nel tempo, realizzando quello che tecnicamente viene denominato un calcolo pseudo-transitorio. Lo schema di discretizzazione temporale utilizzato implementa il metodo di Eulero implicito: il metodo implicito garantisce maggiore stabilità e permette di scegliere il valore del time-step, a discapito però di un maggior costo computazionale.

La scelta del passo temporale, realizzata mediante il controllo della condizione di Courant-Friedrichs-Lewis (CFL), può essere impostata manualmente, come valore costante o come incremento lineare, oppure nel caso di questo studio controllato automaticamente dal solutore. Questa seconda soluzione richiede comunque di inserire limite inferiore e superiore, che definiscono i valori di CFL consentiti: nel presente studio si è scelto di mantenere i valori 1 e 100'000, così da garantire, ove consentito, il massimo delle prestazioni in termini di velocità di convergenza.

Il solutore permette anche di impostare il valore del fattore di rilassamento esplicito (**explicit relaxation**), tecnica utilizzata per accelerare la convergenza della soluzione iterativa, controllando la quantità d' influenza della soluzione precedente su quella corrente. Anche in questo caso si utilizza un controllo automatico, attraverso l' impostazione '**Line search**' con range di variazione tra 0,2 e 0,8. Il controllo automatico permette di ottimizzare il bilancio tra stabilità e velocità nel raggiungimento della convergenza.

2.3.2 Modello di scambio termico

Lo studio di ottimizzazione di una piastra di raffreddamento batteria richiede necessariamente la definizione di un modello di scambio termico adatto a descrivere il trasferimento di energia tra fluido e solidi, che sia il più possibile accurato. Questo modello riveste un ruolo fondamentale: la corretta valutazione del campo di temperatura, svolta al termine di ogni ciclo di ottimizzazione, serve a verificare la validità dei risultati forniti dall'ottimizzatore, influenzando quindi i risultati dei cicli successivi. Un elemento importante per un' accurata stima del fenomeno è una corretta ipotesi sul regime di flusso che caratterizzerà il dominio di simulazione, analizzato nella prima parte del paragrafo. Da questa scelta dipenderà infatti la struttura dello strato limite termico modellizzato, che riveste un ruolo di fondamentale importanza nella descrizione dello scambio termico fluido-solido. La seconda parte della sezione sarà dedicata a fornire dettagli relativamente all'effettivo modello di scambio termico utilizzato, alla sua configurazione nel dominio di calcolo con Star CCM+ e a dettagli sulle equazioni che governano il processo.

Regime di flusso

Il flusso di liquido refrigerante che attraversa il volume di ottimizzazione può essere laminare o turbolento, a seconda del numero di Reynolds che lo caratterizza. Tuttavia, dato che la geometria dei condotti risultante dal ciclo di ottimizzazione non può essere conosciuta a priori, risulta impossibile prevedere la natura del flusso a contatto con le piastre di raffreddamento batteria. L'unica informazione nota è infatti la velocità nella sezione a monte del canale d'ingresso, che può essere ricavata imponendo la portata " Q " che la pompa di distribuzione dovrà erogare

secondo la 2.5

$$Q = \int_{A_{inlet}} \vec{v} dA = 1 \frac{l}{min} \quad (2.5)$$

Considerando la sola componente di velocità lungo l'asse longitudinale e conoscendo la sezione di ingresso, si ricava la velocità del fluido con la 2.6

$$v_{inlet} = \frac{Q}{A_{inlet}} = 0.134 \frac{m}{s} \quad (2.6)$$

Noto il diametro idraulico del condotto di ingresso $d_{h,inlet} = 8,33mm$, si può stimare il numero di Reynolds del flusso in ingresso con la 2.7:

$$Re_h = \frac{v_{inlet} \cdot d_{h,inlet}}{\nu} = 1867 \quad (2.7)$$

Il valore critico del numero di Reynolds, che segna l'inizio della transizione a flusso turbolento in condotte a sezione circolare, si attesta tra i 2200-2400, quindi almeno nelle condizioni iniziali il flusso che attraverserà il volume di ottimizzazione sarà di natura laminare. In realtà, anche qualora la topologia dovesse provocare netti incrementi della velocità nel volume di ottimizzazione, affinché il flusso possa considerarsi pienamente sviluppato è necessario che il flusso abbia percorso una distanza pari alla "lunghezza di entrata" (entrance length) a partire dalla sezione di ingresso del dominio di calcolo.

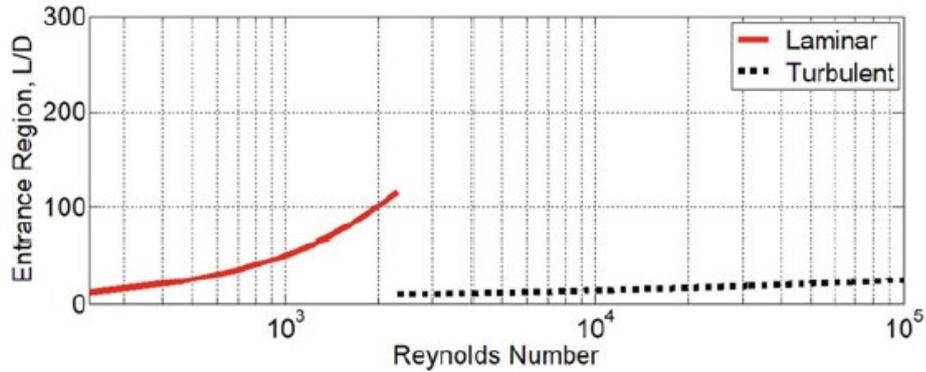


Figura 2.3: Lunghezza d'ingresso per regime di flusso [9].

La figura 2.3 mostra gli andamenti delle lunghezze d'ingresso ottenuti con delle relazioni sperimentali facilmente reperibili in letteratura scientifica:

- **Laminare:**

$$\frac{L}{D_h} = 0.5 + 0.05 \cdot Re_h \quad (2.8)$$

• **Turbolento:**

$$\frac{L}{D_h} = 1.36 \cdot Re_h^{\frac{1}{4}} \quad (2.9)$$

Riscrivendo la 2.7 con l'introduzione della viscosità dinamica "μ" si ottiene la 2.10:

$$Re_h = \frac{\rho \cdot v_{inlet} \cdot d_{h,inlet}}{\mu} \quad (2.10)$$

Imponendo l'uguaglianza della portata 2.5 tra sezione rettangolare e sezione circolare equivalente 2.11:

$$Q = v_{inlet} \cdot A_{inlet} = k \cdot v_{inlet} \cdot \pi \cdot \frac{d_{h,inlet}^2}{4} = 1 \frac{l}{min} \quad (2.11)$$

Si ricava quindi la costante di proporzionalità ("k") attraverso la 2.12:

$$k = \frac{4 \cdot Q}{v_{inlet} \cdot \pi \cdot d_{h,inlet}^2} = 2,295 \quad (2.12)$$

L'equazione 2.10 può essere riformulata, facendo comparire la sezione circolare equivalente e la costante di proporzionalità, nella forma alternativa di 2.13:

$$Re_h = \frac{\rho \cdot v_{inlet} \cdot k \cdot d_{h,inlet}^2}{k \cdot \mu \cdot d_{h,inlet}} = \frac{\rho \cdot Q}{k \cdot \mu \cdot d_{h,inlet}} \quad (2.13)$$

A questo punto noto quindi il numero di Reynolds critico, la portata e le proprietà del fluido in ingresso è possibile stimare di quanto l'ottimizzatore dovrebbe ridurre il diametro della sezione circolare equivalente (equazione 2.14) affinché, localmente, si instauri un flusso turbolento:

$$d_{h,crit} = \frac{\rho \cdot Q}{k \cdot \mu \cdot Re_{crit}} = 3,7 \text{ mm} \quad (2.14)$$

L'adozione di un modello laminare di flusso appare quindi realistica, e viene confermata dal fatto che tipicamente nelle piastre di raffreddamento batteria ottenute tramite stampaggio si verifica effettivamente l'instaurarsi di un flusso laminare. Qualora l'ottimizzazione topologica portasse all'instaurarsi di condizioni di flusso turbolento, localmente, l'utilizzo di un modello di flusso termico laminare porterebbe ad una sovrastima conservativa delle temperature di cella, in quanto non verrebbe correttamente descritto l'aumento di flusso termico fluido-solidi dovuto alla presenza di turbolenza.

L'adozione di un flusso termico laminare comporta alcuni vantaggi, in quanto non sono necessari modelli che descrivano il comportamento del fluido nello strato limite turbolento, con conseguente risparmio dal punto di vista computazionale.

Tuttavia i gradienti di velocità in prossimità delle pareti restano tipicamente elevati e pertanto è necessario utilizzare una griglia di calcolo che sia sufficientemente raffinata in direzione normale alle pareti.

Lo strato limite laminare sarà caratterizzato da una preponderanza del meccanismo di conduzione, mentre ridotti saranno i contributi legati sia alla convezione, che alla diffusione termica, per il maggior peso degli effetti viscosi. Questo comporta che la temperatura del fluido in prossimità della parete sarà molto prossima a quella della parete stessa, e che il gradiente termico lungo la direzione normale alla parete sarà mediamente più elevato rispetto al caso turbolento.

Interazione termica solido-liquido

Vista la discretizzazione delle geometria precedentemente descritta, la sorgente di calore rappresentante l'energia dissipata dalle celle sarà concentrata nella porzione di superficie della piastra in contatto con la batteria. La sorgente di calore viene modellata tramite una condizione al contorno, la quale esprime una potenza termica (espressa in Watt) rappresentativa del calore generato dalle celle. Questa potenza termica, costituisce il termine sorgente dell'equazione di conservazione dell'energia 2.15 che il modello **Coupled Solid Energy** permette di risolvere su tutto il dominio solido.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho_s C_{p,s} T_s dV = - \int_A \dot{q}_s \cdot \vec{n} dA + \int_V S_u dV \quad (2.15)$$

Il termine di flusso termico dipende sia dal flusso condotto attraverso il solido stesso, valutabile con la legge di Fourier 2.16, che da quello scambiato all'interfaccia con il fluido circostante. Per questo secondo termine, Star CCM+ permette di definire un'interfaccia di contatto tra le due fasi in cui implementare un ulteriore modello di scambio termico, questa volta coniugato (**Conjugate Heat Transfer**), che permette di valutare il flusso termico all'interfaccia e le temperature del solido e del liquido a parete, tenendo conto dei contributi dovuti alla conduzione e alla convezione.

$$\dot{q}_s = -k_s \nabla T_s \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} \dot{q}_0 = \dot{q}_1 \\ \dot{q}_0 = A_0 + B_0 \cdot T_{c0} + C_0 \cdot T_{w0} \\ \dot{q}_1 = A_1 + B_1 \cdot T_{c1} + C_1 \cdot T_{w1} \end{cases} \quad (2.17)$$

La 2.17 esprime il sistema lineare utilizzato dal modello di scambio termico coniugato [8], "T_w" indica la temperatura di parete, con pedice 0 e 1 per i due lati

dell'interfaccia (solido e liquido), T_c è invece la temperatura nell'ultima cella prossima all'interfaccia. I coefficienti A, B, C , denominati Linearized Heat Flux Coefficients, dipendono dalle caratteristiche del materiale e dal tipo di scambio termico (convettivo o conduttivo). Si trascura, per il caso in esame, il contributo legato alla radiazione termica.

2.4 Impostazioni di ottimizzazione topologica

Lo scopo dell'ottimizzatore topologico è di far evolvere un' equazione di livello (**level set equation**), avente come variabile di stato la funzione ϕ utilizzata per parametrizzare le curve di livello della superficie di risposta finchè non viene individuata la distribuzione di materiale all'interno del volume di ottimizzazione (design space) che massimizza/minimizza la funzione obiettivo considerata. Ad ogni ciclo di ottimizzazione, l'andamento del residuo dell' equazione 2.18 fornisce indicazioni relativamente alla convergenza della configurazione considerata.

$$\frac{d\phi}{d\tau} + F \cdot |\nabla\phi| = 0 \quad (2.18)$$

In 2.18 τ è la dimensione del passo di ottimizzazione, che definisce l'avanzamento temporale della soluzione tra i diversi cicli, F è la velocità all'interfaccia tra solido e liquido. La distribuzione di materiale χ (material indicator), viene associata per mezzo della funzione tangente iperbolica, come mostrato in 2.19, così da ottenere un campo di variazione compreso tra [0,1]. Il valore 1 indica la fase primaria (fluida), mentre 0 la fase secondaria (solida).

$$\chi = 0.5 \cdot (1 + \tanh(\frac{\phi}{\delta})) \quad (2.19)$$

δ è un parametro che definisce lo spessore dell'interfaccia: è tipicamente un parametro di calibrazione, il cui valore di partenza è pari a 0,056 [8].

2.4.1 Funzione di ottimizzazione

La funzione di ottimizzazione, denominata **funzione lagrangiana**, viene valutata attraverso il metodo dei moltiplicatori di Lagrange. Questo metodo si basa sul principio secondo cui l'esistenza di una soluzione ottimale è soggetta all'esistenza di un punto stazionario della funzione lagrangiana che soddisfa le condizioni KKT (Karush-Kuhn-Tucker) [10]. Tali condizioni richiedono che le derivate parziali della funzione rispetto alle variabili di progettazione e ai moltiplicatori di Lagrange siano uguali a zero. Integrando questa formulazione matematica con il metodo della funzione lagrangiana aumentata (Augmented Lagrangian Function [11]), il problema di ottimizzazione della funzione obiettivo $f(x)$ soggetta ai vincoli c_i

espresso dalla 2.20, in cui "n" è il numero di vincoli totali, viene risolto come un problema non vincolato, passando attraverso una nuova formulazione formalizzata nella 2.21, dove ("L") è appunto la funzione lagrangiana incrementata [8].

$$\begin{cases} \text{minimizza/massimizza } f(x) \\ \text{soggetto a } c_i \leq 0 \text{ (con } 0 \leq i \leq n) \end{cases} \quad (2.20)$$

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^n \psi_i \quad (2.21)$$

In 2.21, la funzione lagrangiana viene incrementata del termine "ψ", per tenere conto dei vincoli, "λ" è il moltiplicatore di Lagrange dell' i-esimo vincolo. I moltiplicatori, in analogia con i controlli in retroazione, influenzano il processo di ottimizzazione in base alle informazioni che derivano dai vincoli, guidando iterativamente la soluzione ottimale attraverso un compromesso tra questi fattori. La formulazione analitica di "ψ" è fornita in 2.22.

$$\psi_i = \begin{cases} \lambda_i^k \cdot c_i + \frac{\mu}{2} \cdot c_i^2 & \text{se } c_i > 0 \\ \lambda_i^k \cdot c_i & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2.22)$$

in cui μ è il fattore di penalizzazione (penalty factor), che regola quanto aggressivamente il solutore debba soddisfare i vincoli, ed il cui aggiornamento può essere gestito dall'utente. L'utilizzo ideale del fattore di penalizzazione prevede di partire con un basso valore, così che inizialmente l' influenza dei vincoli sia bassa, per poi aumentare progressivamente con il crescere del numero di cicli di ottimizzazione. Anche il valore del moltiplicatore di Lagrange viene aggiornato tra due cicli successivi k e k + 1 con una legge, definita in 2.23, che ne provoca una crescente riduzione d'influenza, fino ad annullarla, non appena la condizione "c_i ≤ 0" (vincolo rispettato) risulta verificata.

$$\lambda_i^{k+1} = \max(0, \lambda_i^k + \mu^k \cdot c_i^k) \quad (2.23)$$

2.4.2 Solutore Adjoint

Il 'metodo congiunto' (Adjoint) performa un'analisi di sensitività delle funzioni obiettivo considerate rispetto alle variabili di progetto, attraverso una sequenza di operazioni, definite dalla 2.24, tramite cui si calcolano le sensitività rispetto ai nodi di calcolo ed alla soluzione fisica:

$$X(D) \rightarrow Q(X) \rightarrow L(Q, X) \quad (2.24)$$

Dove "X" rappresentano i nodi di calcolo, "D" le variabili di progetto, "Q" la soluzione fisica del modello. Il risultato del calcolo è quindi la sensitività della

funzione obiettivo "L", fornita come parametro, rispetto alle variabili di progetto. Il modello di ottimizzazione topologica lavora in sinergia con il 'metodo congiunto', da cui riceve l'indicazione sul valore del gradiente della funzione obiettivo rispetto all'unica variabile di progetto considerata (la distribuzione di materiale). Il risultato del calcolo del gradiente, formalizzato con la 2.25, viene in seguito utilizzato dal modello di ottimizzazione topologica per far evolvere la distribuzione di materiale fino al raggiungimento della condizione di minimo (o massimo).

$$\frac{dL}{d\chi} = \frac{dL}{dX} \cdot \frac{dX}{d\chi} = \left(\frac{\partial L}{\partial X} + \frac{\partial L}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial X} \right) \frac{dX}{d\chi} \quad (2.25)$$

2.4.3 Modello fisico topologico

Il modello fisico topologico serve per simulare la distribuzione di solido all'interno del volume di ottimizzazione, inizialmente considerato composto di solo fluido, e lavora anch'esso accoppiato con il modello di ottimizzazione e con il metodo congiunto. La sequenza di operazioni, gestita in Star CMM+ prevede cicli iterativi di solutore congiunto e solutore fisico del sistema: con il primo si valuta il gradiente della funzione obiettivo, mentre il solutore fisico si occupa di aggiornare la soluzione delle grandezze fisiche corrispondente a una data distribuzione di solido e fluido nel volume di ottimizzazione. La valutazione delle nuove sensitività della funzione obiettivo viene svolta dal solutore congiunto al ciclo successivo.

E' cioè necessario che nel volume di ottimizzazione si tenga conto degli effetti dell'evoluzione del solido sulle grandezze fisiche che descrivono il comportamento termo-fluidodinamico del fluido in studio, per garantire una corretta evoluzione del processo di ottimizzazione. Il modello fisico deve quindi rappresentare matematicamente, attraverso una modifica delle equazioni di conservazione e delle proprietà del materiale, gli effetti, che l'interazione tra il solido inserito nel volume di ottimizzazione e il liquido ha in termini di fenomeni termo-fluidodinamici. Star CCM+ implementa a questo scopo il modello di penalizzazione di Brinkman, di cui è possibile trovare una dettagliata descrizione in [12]. Il modello approssima il comportamento del solido a quello di un mezzo poroso con una bassa porosità, in modo da poter simulare l'ostruzione al passaggio del flusso fornita dal solido. Affinchè il comportamento del solido sia simulato accuratamente, è necessario che il modulo della velocità nelle zone dove viene introdotto, sia ridotto di almeno due ordini di grandezza rispetto alla velocità media del flusso: modifiche alla porosità del mezzo, per aumentare l'ostruzione opposta al passaggio del flusso qualora tale decremento non si verifichi, sono possibili attraverso la calibrazione del fattore di penalizzazione "α" nella 2.26. Pochissimo margine si ha in realtà, come confermato dall'indagine sperimentalmente nell'ambito della tesi, sulla calibrazione di questo parametro: un aumento del suo valore ha infatti notevoli ricadute sulla convergenza fisica delle grandezze. Per questo motivo è molto consigliato lasciare

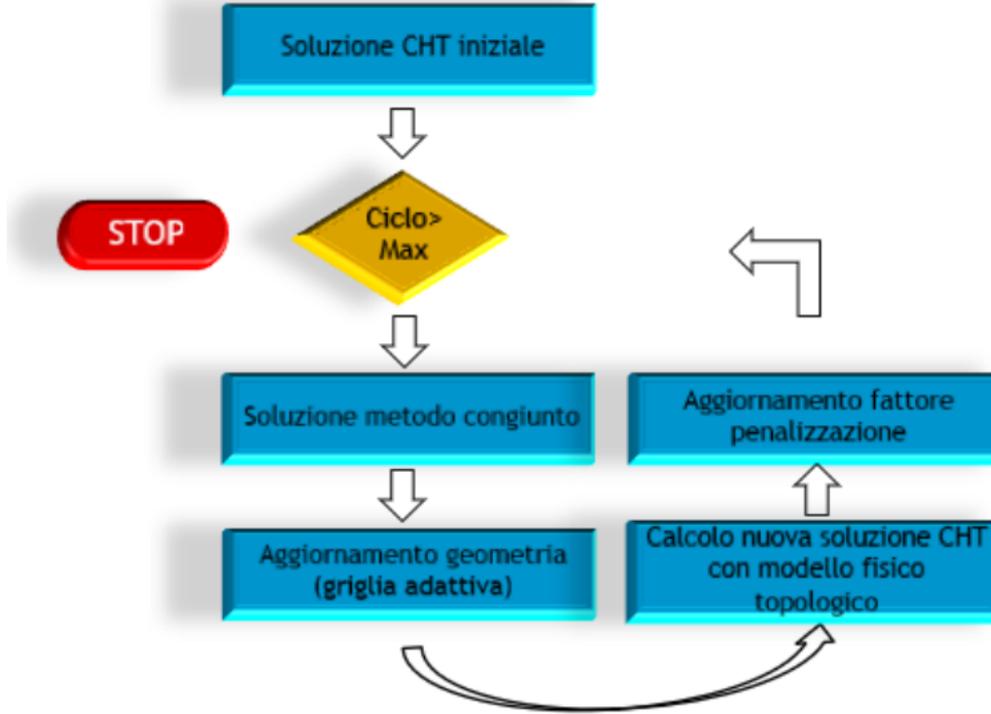


Figura 2.4: Flusso delle operazioni per l'ottimizzazione topologica.

questo parametro al suo valore di $1e^{07} [\frac{kg}{m^3 \cdot s}]$. In termini di formulazione matematica, il modello di Brinkman aggiunge all'equazione di conservazione della quantità di moto un termine sorgente che si oppone alla velocità del flusso, come espresso in 2.26.

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \alpha(1 - \chi) \vec{v} \quad (2.26)$$

Nell'equazione dell'energia, invece, l'unica modifica che si realizza è l'inclusione della conducibilità termica del solido attraverso la definizione di " k_{eff} " fornita in 2.27.

$$k_{eff} = \chi k_{fluid} + (1 - \chi) k_{solid} \quad (2.27)$$

L'uso del modello fisico topologico determina quindi la nuova configurazione del sistema, fornendo i nuovi parametri al metodo congiunto del ciclo successivo per la valutazione del gradiente della funzione lagrangiana, riscritto secondo 2.28:

$$\frac{dL}{d\chi} = \frac{\partial L}{\partial \chi} + \frac{dL}{dR_{momentum}} \cdot \alpha \cdot \vec{v} \cdot V - \frac{dL}{dR_{energy}} \frac{\partial R}{\partial k_{eff}} (k_{fluid} - k_{solid}) \quad (2.28)$$

dove " $R_{momentum}$ " ed " R_{energy} " sono i residui delle equazioni discrete di conservazione, " α " il fattore di penalizzazione di Brinkman, " V " e " \vec{v} " rispettivamente il volume ed il vettore velocità della cella considerata, " k_{fluid} " e " k_{solid} " le conduttività termiche di liquido e solido e " χ " la distribuzione di materiale (variabile di ottimizzazione). In figura 2.4 viene riassunto il flusso di lavoro che si realizza per implementare una simulazione di ottimizzazione topologica.

2.4.4 Modello di ottimizzazione topologica

Il modello di ottimizzazione topologica costituisce l'elemento fondamentale del processo di ottimizzazione, in quanto definisce il percorso di ottimizzazione sulla base delle informazioni ricavate dagli altri due modelli con cui è integrato (metodo congiunto e modello fisico topologico). Star CCM+ implementa un unico algoritmo di ottimizzazione, denominato Adaptive Momentum Estimation (ADAM), derivato dall'apprendimento automatico (machine learning) dove è ampiamente utilizzato per l'addestramento delle reti neurali. Lo schema di ottimizzazione performa una media mobile dei momenti del primo e secondo ordine (rispettivamente il gradiente e la varianza del gradiente) adattandosi dinamicamente all'evoluzione delle funzioni e delle variabili di ottimizzazione. Questo algoritmo presenta il duplice vantaggio di garantire elevata stabilità nella convergenza dell'ottimizzazione evitando lo stallo del processo, grazie ad un bilancio tra influenza della media mobile pregressa e dei valori aggiornati delle due variabili (momenti del primo e secondo ordine). Permette inoltre di gestire diverse scale di variazione del gradiente grazie alla normalizzazione performata utilizzando la 2.30 in cui il termine ϵ rappresenta un valore di tolleranza che evita la possibile evenienza di una divisione per zero [8]. Il bilancio tra valore pregresso e valore corrente viene gestito attraverso i due fattori di sotto-rilassamento " β_1 " e " β_2 ", che permettono di gestire la convergenza dell'ottimizzazione. La formulazione analitica dell'ADAM viene fornita in 2.29.

$$\begin{cases} m_{k+1} = \beta_1 m_k + (1 - \beta_1) \frac{dL}{dx} \\ \nu_{k+1} = \beta_2 \nu_k + (1 - \beta_2) \left(\frac{dL}{dx} \right)^2 \end{cases} \quad (2.29)$$

$$\bar{\nu} = \frac{m_{k+1}}{\sqrt{\nu_{k+1} + \epsilon}} \quad (2.30)$$

" β_1 " incide sull'ampiezza del passo di aggiornamento e sulla stabilità di convergenza, per cui un valore troppo elevato (vicino all'unità) potrebbe rallentare eccessivamente la convergenza verso il minimo, se la configurazione ottimale è lontana da quella iniziale, viceversa un basso valore potrebbe favorire un prematuro stop in un punto di minimo locale. β_2 contribuisce invece al decadimento del passo con il progresso dell'ottimizzazione, favorendo quindi l'adozione di passi di aggiornamento sempre più ridotti. Un valore elevato di questo fattore provocherà quindi una maggiore

stabilità del processo a discapito della velocità nel raggiungimento della convergenza. I valori predefiniti utilizzati in Star CCM+ per questi fattori sono rispettivamente 0,5 e 0,75.

La direzione di ricerca individuata dall'algoritmo attraverso i parametri " m_{k+1} " e " ν_{k+1} " aggiorna secondo la 2.31 il termine di velocità all'interfaccia " F_i " provocando una variazione nell'equazione di livello 2.18, che porterà ad una nuova configurazione di convergenza della variabile " ϕ ", con un conseguente aggiornato valore di " χ ".

$$F_i = \frac{V_i \bar{v}}{\sum_j A_j} \quad (2.31)$$

In 2.31 " V_i " rappresenta il volume della cella i -esima, il termine a denominatore è la sommatoria della superficie delle j facce della celle i -esima.

2.4.5 Adaptive Mesh Refinement

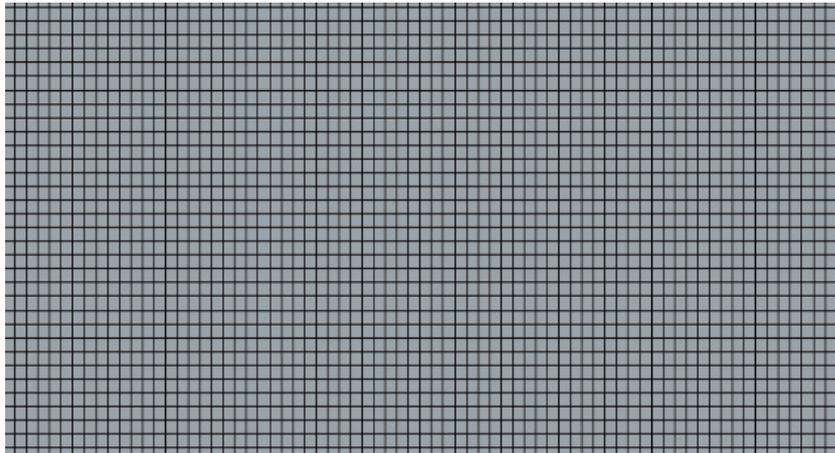
La sviluppo delle pareti solide all'interno del volume di ottimizzazione pone una problematica relativa all'accurata descrizione dei fenomeni termici in prossimità delle pareti. Una corretta modellizzazione dello strato limite termico richiede infatti un aumento del numero di elementi, e quindi del costo computazionale, che potrebbe essere eccessivo per un'analisi di ottimizzazione, soprattutto se il numero di iterazioni richieste fosse molto elevato. Inoltre la variazione di topologia continua del dominio, richiederebbe di rigenerare gli strati di prismi a parete ad ogni iterazione, rendendo molto più lenta la simulazione. Un certo livello di raffinamento in prossimità della parete è comunque richiesto, per approssimare in modo adeguato i fenomeni fluidodinamici, meglio di quanto sia possibile con la dimensione iniziale della griglia. Per mitigare l'insieme delle problematiche enunciate, si decide di rinunciare all'utilizzo dei prismi a parete e di utilizzare un approccio di raffinamento automatico della griglia (Adaptive Mesh Refinement AMR), che permetta di tenere conto, seppur in modo approssimato, della presenza dell'interfaccia tra solido e liquido (Fig. 2.5).

Il criterio adattivo utilizzato, formalizzato in 2.32, viene definito come funzione del parametro (Material Indicator MI) che discrimina tra solido e liquido i nodi di calcolo del volume di ottimizzazione, e della dimensione caratteristica delle celle (Adaption Cell Size ACS). La dimensione caratteristica è pari al doppio della massima distanza tra il centroide della cella di calcolo e ciascuno dei suoi vertici. Infine, per limitare il massimo numero di elementi, viene abilitato un solo livello di raffinamento, che permette al massimo di dimezzare le dimensioni della singola cella.

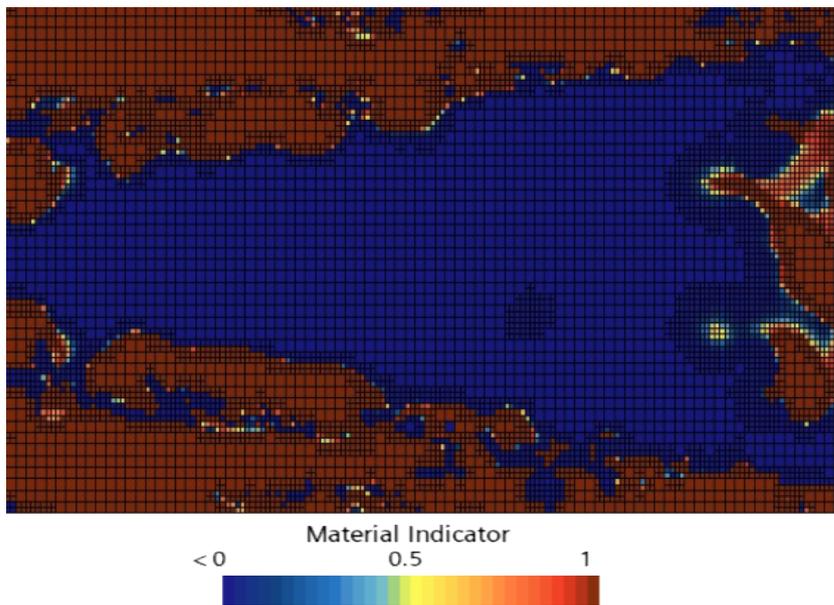
Per i due modelli analizzati nei paragrafi 2.1 e 2.2 la dimensione di base della griglia di calcolo è impostata al valore di 1mm, per cui la dimensione delle celle dove agirà

il raffinamento automatico sarà al massimo di 0,5mm.

$$\begin{aligned}
 \nabla MI \cdot ACS > 0.1 & \rightarrow \text{dimezza dimensioni cella} \\
 0.001 < \nabla MI \cdot ACS < 0.1 & \rightarrow \text{mantieni dimensioni cella} \\
 \nabla MI \cdot ACS < 0.001 & \rightarrow \text{raddoppia dimensioni cella}
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$



(a) Griglia uniforme di partenza



(b) Griglia raffinata: il valore 0 di Material Indicator indica cella solida, viceversa 1 cella fluida

Figura 2.5: Dettaglio di una zona di raffinamento automatico della griglia

Capitolo 3

Ottimizzazione della piastra di raffreddamento per due celle elettrochimiche

In questo capitolo viene presentata un'analisi dettagliata del caso studio relativo alla piastra batteria per due celle elettrochimiche, descritta nel paragrafo 2.1. Vengono forniti i risultati della simulazione, il metodo utilizzato per estrapolare la geometria finale ed i risultati della simulazione di validazione. Successivamente vengono presentate e giustificate alcune modifiche delle impostazioni di calcolo per le quali sono stati raccolti i risultati più significativi. Un'analisi comparativa, infine, è stata effettuata allo scopo di illustrare le relazioni causa-effetto tra le modifiche apportate alla configurazione di calcolo ed i risultati ottenuti.

3.1 Simulazione di 2 celle elettrochimiche: Configurazione 1

Come primo caso di studio si sceglie di partire da una geometria di dimensioni ridotte, poco rappresentativa di un'applicazione reale, ma utile a valutare l'interazione tra i fenomeni fisici coinvolti ed il modello di ottimizzazione senza però eccedere in complessità. Per la realizzazione del volume da ottimizzare si usufruisce dello strumento di modellazione superfici (Computer-Aided-Design CAD) fornito da StarCCM+, attraverso cui viene realizzato un semplice rettangolo estruso lungo la direzione dello spessore con le dimensioni fornite nel paragrafo 2.1. I canali d'ingresso ed uscita e le due piastre non vengono realizzati tramite strumento CAD, ma estrudendo alcune delle superfici del volume di ottimizzazione già discretizzato, per semplificare il processo di generazione della griglia ed agevolare l'ottenimento

di interfacce conformi tra le varie regioni che costituiscono il dominio di calcolo 3D. La dimensione base (base size) utilizzata per la griglia di calcolo del volume di ottimizzazione è di 1 mm: il numero di celle complessivo è di 700'000. Un dettaglio del numero di celle per ogni regione del dominio di simulazione viene fornito in tabella 3.1.

Regione	N.ro celle
Volume ottimizzazione	334'472
Canale ingresso	8'000
Canale uscita	4'800
Piastra superiore	165'312
Piastra inferiore	165'312
Totale	677'896

Tabella 3.1: Nodi di calcolo per regione.

I risultati del sistema fisico iniziale, con il volume da ottimizzare interamente fluido, sono molto importanti per permettere al solutore di intraprendere la corretta strada di ottimizzazione: devono quindi rappresentare la soluzione fisica del problema in maniera accurata e la convergenza delle grandezze deve essere garantita con criteri molto rigidi. Per il caso di studio vengono impostati 3 criteri di convergenza per controllare che la soluzione sia a convergenza sia dal punto di vista fluidodinamico che termico. I criteri fluidodinamici vengono soddisfatti quando lo sbilancio di portata è ormai inferiore all'1% della portata in ingresso e la variazione del valore della pressione nella sezione d'ingresso è inferiore all'1% in un intervallo di 200 iterazioni. Come indicatore della convergenza termica viene invece utilizzato il bilancio di flusso termico all'interno del volume di ottimizzazione: il criterio risulta soddisfatto quando lo sbilancio del flusso termico netto è inferiore all'1% della potenza termica entrante.

In figura 3.1 è mostrata la distribuzione di temperature risultante al termine del calcolo iniziale, svolto sul dominio di ottimizzazione interamente costituito da fluido. La figura 3.2 mostra come le zone più critiche (circa 38°C di temperatura massima) siano in corrispondenza delle superfici che modellizzano la base delle 2 celle. In figura 3.2 si riporta la velocità sul piano x-y di mezzaria del volume di ottimizzazione: si nota la zona centrale dove il liquido fluisce a velocità dell'ordine del decimetro al secondo e le zone circostanti dove invece è praticamente fermo (in nero).

Come obiettivo dell'ottimizzazione si sceglie la minimizzazione della differenza di temperatura sulla superficie delle celle: non potendo imporre direttamente il controllo sulla massima differenza di temperatura sulla superficie di contatto, in

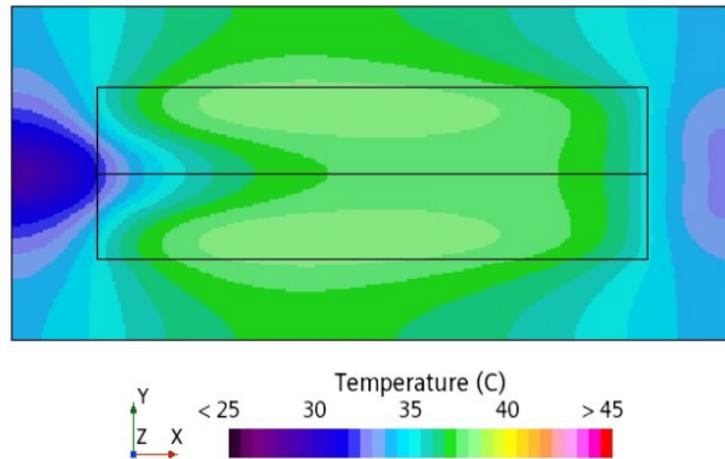


Figura 3.1: Simulazione iniziale (primal flow) configurazione 1 - distribuzione di temperatura sulla superficie superiore della piastra di appoggio delle celle elettrochimiche

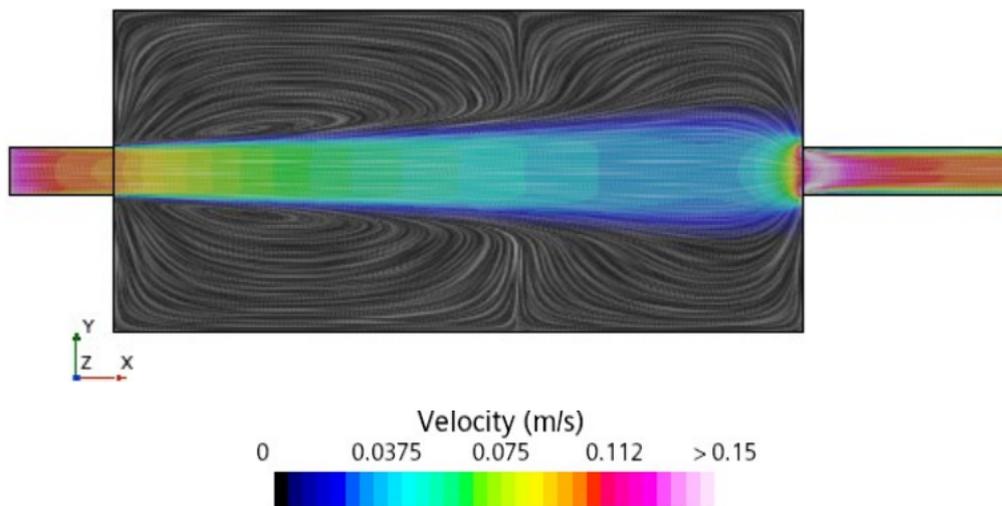


Figura 3.2: Soluzione iniziale (primal flow) configurazione 1 - velocità sezione x-y ($z=2,5\text{ mm}$)

quanto il metodo congiunto non supporta la differenziazione di massimi e minimi di campi scalari, si decide di utilizzare come funzione obiettivo la deviazione standard della temperatura sulla superficie delle due celle, ipotizzando che la distribuzione di temperatura sia vicina a quella gaussiana. Nessun limite viene invece posto sulla temperatura media, al fine di ridurre inizialmente al minimo i parametri di ottimizzazione e quindi la correlazione con la variabile di progetto (distribuzione di materiale) durante il processo di ottimizzazione. Come vincoli viene definito un solo

Grandezza	Valore
$T_{avg,cell_1}$	36,7 °C
$T_{avg,cell_2}$	36,7 °C
$\Delta T_{cell_i,max}$	6,7 °C
p_{inlet}	1 mbar

Tabella 3.2: Grandezze principali soluzione iniziale (primal flow) configurazione 1.

limite sulla frazione in volume di solido che la zona ottimizzata dovrà contenere: tale vincolo risulta necessario per il corretto funzionamento del solutore ed è inoltre realistico utilizzare tale vincolo presupponendo in generale la presenza di vincoli di progetto del componente di natura strutturale. Per lasciare il più ampio margine di azione all'ottimizzazione, si ipotizza di dover garantire una frazione minima di solido pari al 20 % del volume complessivo.

Le prime simulazioni condotte mostrano però evidenti problematiche di convergenza delle grandezze termofluidodinamiche: critici risultano infatti il bilancio di continuità e lo scambio termico netto all'interno del volume di ottimizzazione. Lo sbilancio di portata si verifica per un'interruzione nella continuità del flusso prima della sezione di uscita, motivo per il quale risulta indispensabile inserire un ulteriore vincolo sul bilancio di portata tra ingresso ed uscita. In figura 3.3 viene riportata una comparazione dell'andamento delle linee di flusso: in figura 3.3a vengono calcolate sulla base del modulo della velocità ottenuto con il modello fisico topologico, mentre in figura 3.3b sono valutate attraverso una funzione che impone nulla la velocità nelle celle quando il valore dell'indicatore di materiale (material indicator) scende al di sotto del valore 0,5, assunto come soglia di transizione tra liquido e solido. Un'ulteriore problematica del modello topologico evidenziata da questo confronto grafico è legato al fatto che non vi sia una transizione netta tra liquido e solido: l'indicatore di materiale subisce infatti una variazione continua nell'intervallo [0,1], in funzione del valore della variabile " ϕ " dell'equazione di livello. Valori dell'indicatore di materiale inferiori all'unità, ma ancora lontani dallo 0, sono già un segnale di transizione a solido del nodo di calcolo, a cui però non corrisponde una variazione della porosità in grado di ostacolare a sufficienza il passaggio del flusso (secondo l'equazione 2.26). L'introduzione del vincolo sul bilancio di portata non è sufficiente ad escludere che il flusso riesca a passare in zone considerate ibride.

Poiché il mezzo poroso introdotto con il modello di Brinkman provoca una riduzione di velocità al suo attraversamento che si traduce in un incremento di pressione del fluido a monte del mezzo, risulta utile introdurre un vincolo sulla massima pressione all'ingresso del circuito, come controllo indiretto sulla continuità del flusso. Questo

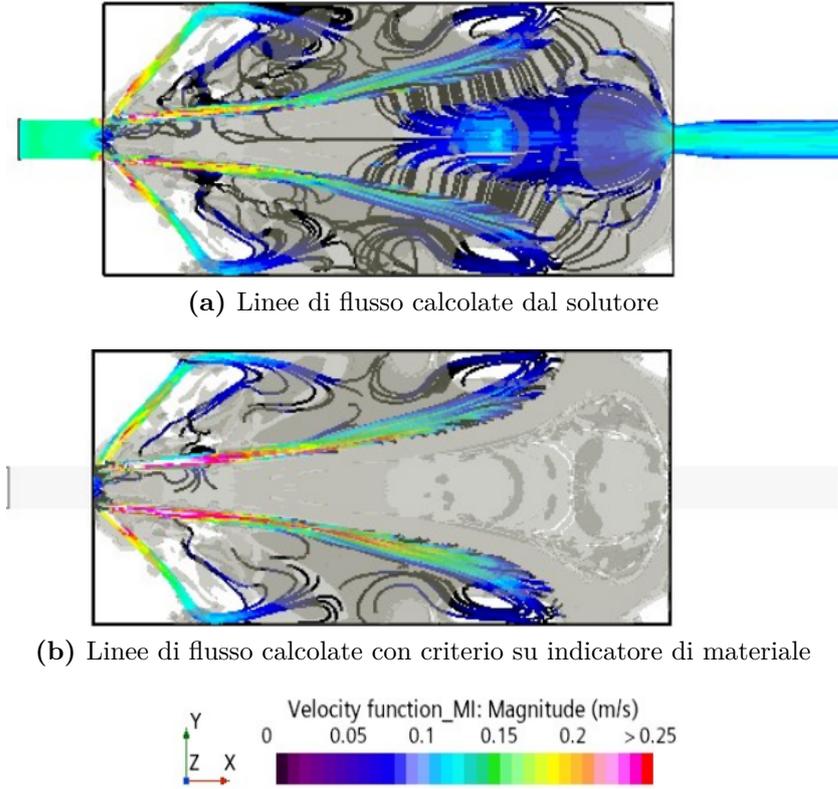


Figura 3.3: Identificazione ostruzioni del flusso.

vincolo risulta inoltre indispensabile a limitare la massima potenza richiesta alla pompa di alimentazione. A scopo di sintesi, la definizione finale del problema di ottimizzazione viene espressa dalla 3.1:

$$\begin{cases} \text{minimizzazione } \sigma(T) \text{ su } (A_{cell_1} + A_{cell_2}) \\ \text{vincolato a } \begin{cases} \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0 \\ p_{in} \leq 8 \text{ mbar} \end{cases} \end{cases} \quad (3.1)$$

L'andamento della funzione obiettivo lungo tutta la simulazione, secondo le impostazioni del problema in 3.1, è riportato in figura 3.4: è subito evidente come, dopo la prima fase di decrescita monotona fino al raggiungimento di una zona di minimo, la funzione obiettivo assuma un andamento periodico incapace di produrre una convergenza stabile del processo. I due vincoli di design sono invece riportati in figura 3.5: l'andamento della frazione in volume di solido (in rosso) mostra un evidente correlazione con quello della pressione (in verde), indice di una tendenza dell'ottimizzazione a provocare un incremento della pressione, conseguenza a sua volta dell'incremento di frazione in volume di solido, con il risultato di minimizzare progressivamente la funzione obiettivo, finché, raggiunto il valore massimo

ammissibile di pressione, la presenza di solido crolla drasticamente. Non viene

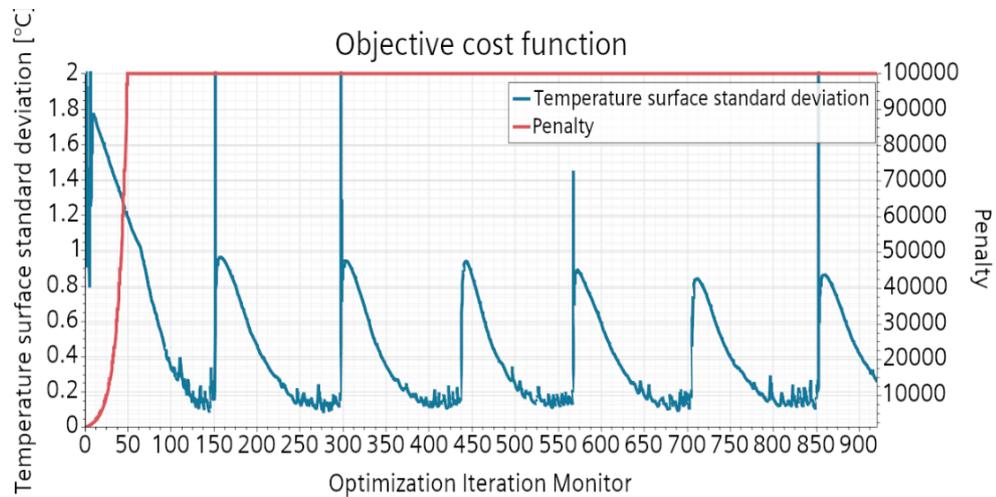


Figura 3.4: Andamento funzione obiettivo: configurazione 1.

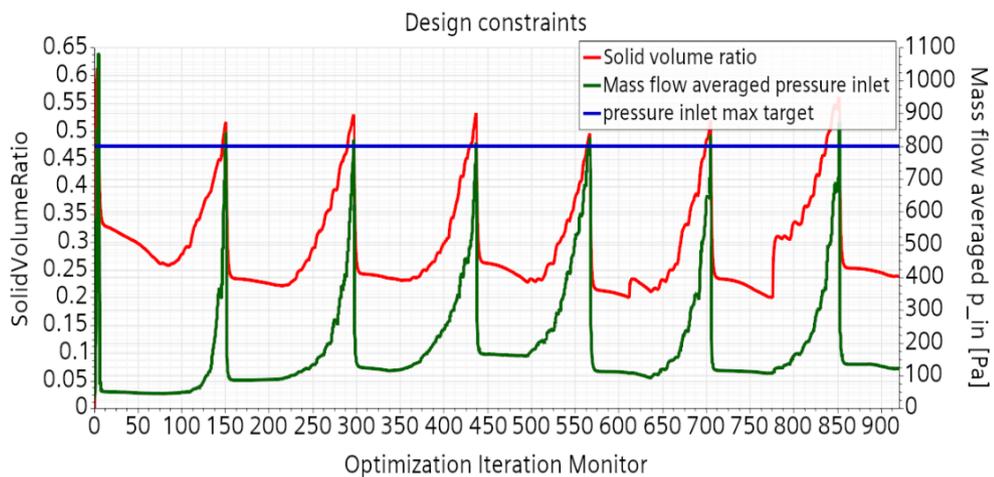


Figura 3.5: Andamento dei vincoli di ottimizzazione: frazione in volume di solido sulla scala di sinistra e pressione in ingresso sulla scala di destra

presentato, a causa della complicazione dei relativi grafici, l'andamento delle due grandezze di bilancio, termico (**net heat transfer**) e fluidodinamico (**mass flow**), in funzione del ciclo di ottimizzazione: è utile menzionare come per entrambe si sia riscontrato un più o meno marcato degrado della convergenza, raggiunta al termine della soluzione ciclica del sistema fisico, in prossimità del raggiungimento del valore massimo ammissibile di pressione. Si è ipotizzato che il degrado del vincolo relativo

alla portata netta nulla potrebbe essere indice di presenza di ostruzioni al passaggio del flusso, che si presenta al crescere del valore della frazione solida nel dominio di ottimizzazione. Il fatto che l'introduzione del vincolo sulla pressione massima renda più facilmente soddisfatto il vincolo sulla portata netta conferma tale ipotesi. I vincoli riescono quindi a guidare l'ottimizzatore verso configurazioni che hanno senso fisico, ma per valori elevati di frazione in volume di solido (Solid Volume Ratio SVR) la probabilità di blocchi sul percorso del fluido sale drasticamente. In figura

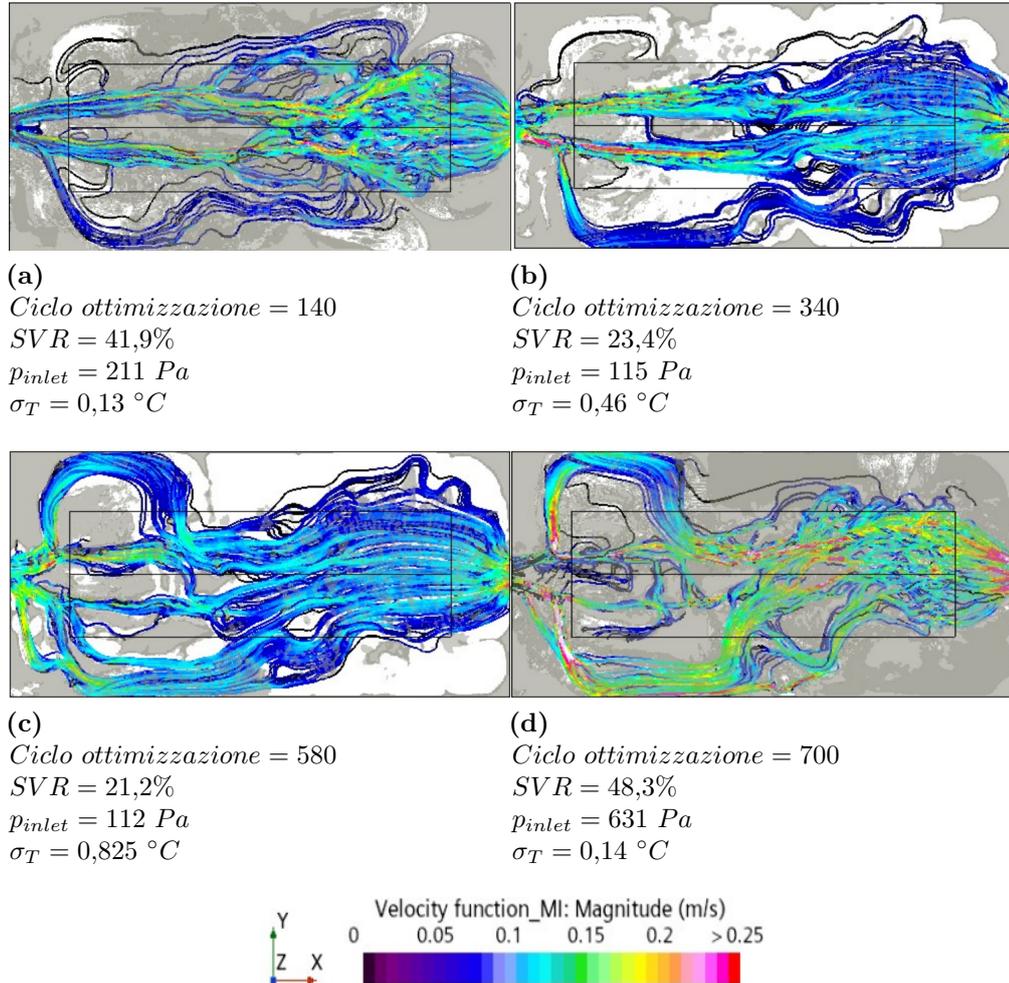
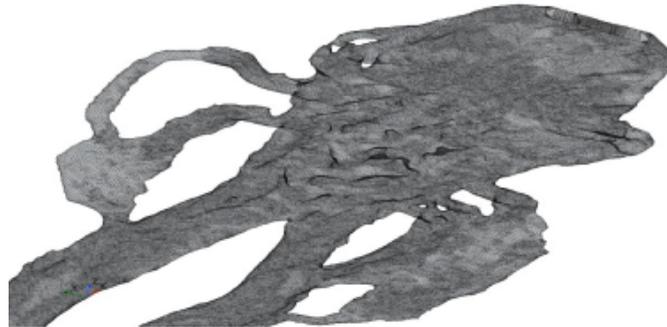


Figura 3.6: Progressione della geometria ottimizzata: configurazione 1. In grigio le zone composte di solido (in trasparenza) ed in bianco le zone di fluido.

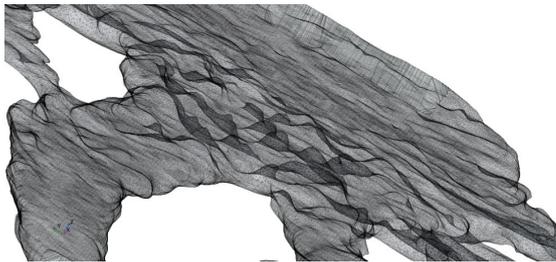
3.6 vengono mostrate due geometrie ottenute in momenti diversi durante il processo di ottimizzazione: le immagini relative ai cicli 140 e 700 mostrano le geometrie per le quali è minima la funzione obiettivo, e mostrano una significativa evoluzione della

forma, nonostante le prestazioni ottenute sono molto simili. Nelle configurazioni peggiori si nota invece come la geometria dei canali non sia profondamente diversa, ma oltre ad una consistente riduzione della velocità del flusso, compaiano consistenti zone con indicatore di materiale unitario (le zone bianche indicano presenza di fluido) ma dove la velocità è praticamente nulla (non si evidenziano linee di flusso passanti).

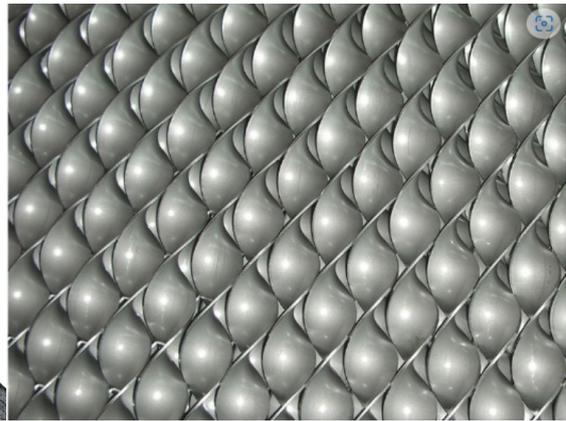
Una delle problematiche rilevata nella geometria ottimizzata della configurazione 1, è la presenza di una marcata ondulazione delle superfici di contatto con le due piastre (Fig. 3.7a e Fig. 3.7b), in similitudine con le geometrie dei turbolatori (Fig. 3.7c), utilizzate negli scambiatori di calore per massimizzare il mescolamento del fluido e l'interazione con le pareti. Queste ondulazioni delle superfici, di piccole dimensioni e molto frequenti lungo lo sviluppo dei canali, non sono però in nessun modo realizzabili con un processo di lavorazione di una lamina piana, demandandone la possibile produzione alla sola fabbricazione additiva.



(a) Ondulazione pareti dei canali favorita dall'ottimizzazione topologica



(b) Dettaglio ondulazione delle pareti



(c) Geometria dei turbolatori

Figura 3.7: Confronto delle pareti ottenute con l'ottimizzazione con la geometria dei turbolatori

3.1.1 Configurazione 1: validazione

Non avendo ottenuto una convergenza netta della funzione obiettivo e della frazione in volume di solido si è scelto di analizzare i risultati ottenuti estraendo da essi le geometrie che mostrano le prestazioni migliori, allo scopo di validare con una simulazione specifica i risultati potenziali ottenuti durante il processo di ottimizzazione topologica. Il calcolo di validazione viene svolto con una mesh che descrive in modo adeguato lo strato limite tramite l'utilizzo di numerosi prismi ($y^+ < 5$), e proprio in ragione di tale maggiore dettaglio non è scontata la conferma di risultati ottenuti dall'ottimizzazione topologica, essendo che quest'ultima approssima il comportamento del fluido nello strato limite. L'estrazione del volume di fluido da validare viene realizzata sulla base di una isosuperficie dell'indicatore di materiale ($1 - \chi < 0,5$), il cui valore di soglia costituisce il criterio di generazione della superficie di livello. L'isosuperficie ottenuta ponendo l'indicatore di materiale pari

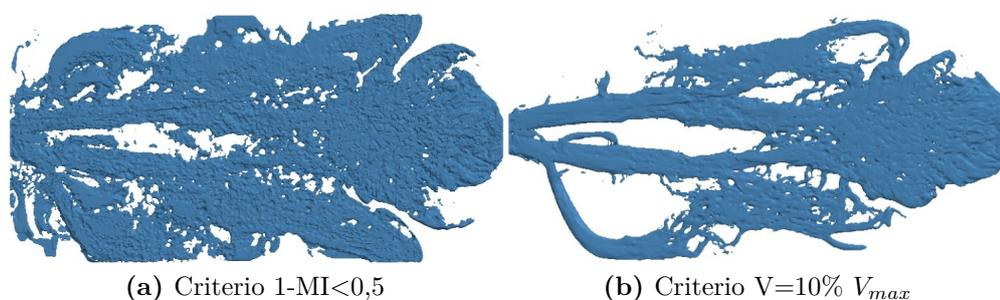


Figura 3.8: Criteri di estrazione della superficie finale.

a 0.5 è indicata in figura 3.8a ed è molto più estesa della superficie di contorno del volume fluido (Fig. 3.8b) rispetto alla propagazione delle linee di flusso visibile dalla figura 3.6. Risulta inoltre caratterizzata da un elevato numero di errori di triangolazione, la cui correzione manuale è necessaria prima di realizzare la griglia di calcolo. Una soluzione alternativa è ottenuta definendo il criterio di estrazione in funzione del campo di velocità (Fig. 3.8b), così da escludere tutte le zone dove la presenza del mezzo poroso riduce la velocità in maniera apprezzabile. Le zone del volume di ottimizzazione aventi velocità inferiore a $0,1 \cdot 0,35 \frac{m}{s}$ dove $0,35 \frac{m}{s}$ è la velocità massima all'interno del volume di ottimizzazione vengono escluse dal processo di estrazione. La piastra di raffreddamento in figura 3.9a viene quindi ottenuta aggiungendo alle due piastre il volume ottenuto per sottrazione del fluido (Fig. 3.9b) dall'iniziale volume di ottimizzazione. La griglia di calcolo viene realizzata con poliedri, con l'impiego di celle prismatiche utilizzate per discretizzare le pareti solide sottili (thin mesher). Nelle simulazioni di validazione vengono inoltre inseriti 15 strati di prismi a parete per risolvere lo strato limite: la struttura degli strati viene definita tramite lo spessore totale (pari al 30% della dimensione base

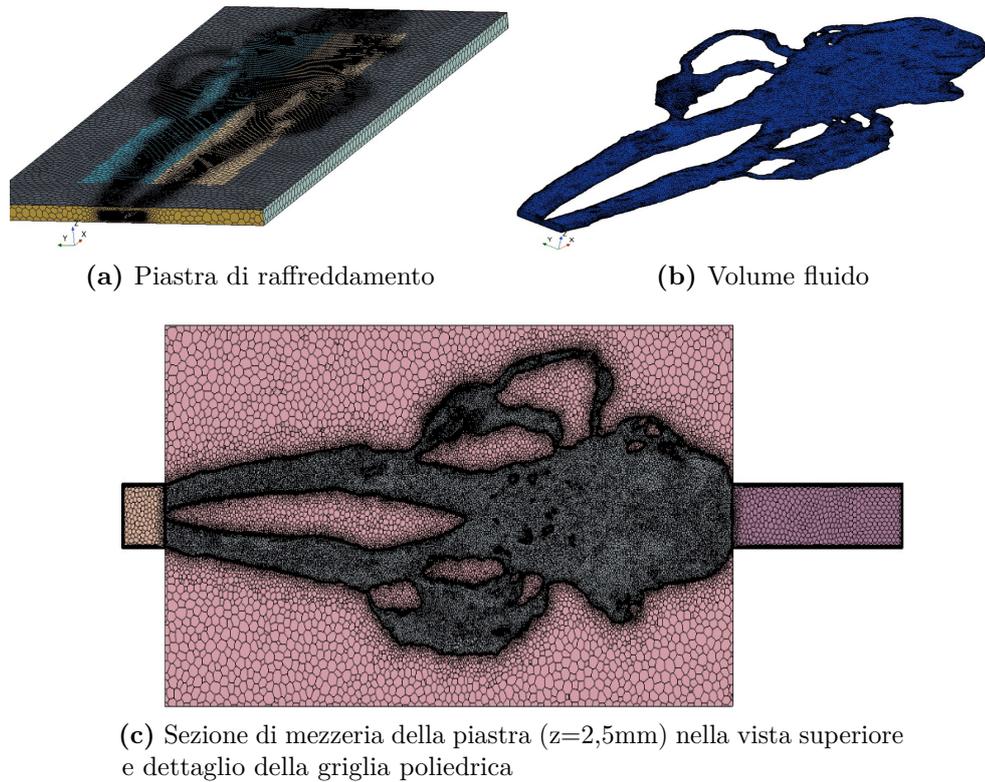


Figura 3.9: Geometria estratta per la validazione-configurazione 1.

di griglia) e lo spessore del primo strato definito in modo che sia verificata la condizione $y^+ < 5$. La dimensione complessiva della griglia di calcolo è di circa 2 milioni di celle. Il dettaglio nelle diverse regioni è fornito in tabella 3.3.

Regione	N.ro celle
Fluido	1'669'994
Canale ingresso	19'539
Canale uscita	31'130
Piastra	303'465
Totale	2'024'096

Tabella 3.3: Nodi di calcolo per regione-configurazione 1 (simulazione di validazione della geometria).

La figura 3.10 propone un confronto tra le distribuzioni di temperatura sulla superficie di contatto con le celle della geometria ottimale ottenuta con questa

configurazione: la figura 3.10a si riferisce al risultato fornito dall'ottimizzazione, mentre la figura 3.10b al risultato della simulazione di validazione. Nel calcolo di validazione si riscontra un degrado della prestazione termica, dovuto alla combinazione delle diverse approssimazioni introdotte.

Il degrado di prestazione termica è quantificato in circa $0,3^{\circ}\text{C}$ di aumento della deviazione standard di temperatura sulla superficie delle celle che si traduce in 1°C di incremento di massima differenza di temperatura. Di 2°C risulta l'incremento di temperatura media (lo scostamento maggiore si ha sulla temperatura massima superficiale delle 2 celle). La figura 3.11 mette a confronto i risultati ottenuti per tutti i parametri di ottimizzazione nel caso del risultato ottenuto sul volume di ottimizzazione iniziale (primal flow), dell'ottimizzazione topologica ed infine nella simulazione di validazione della piastra ottimizzata.

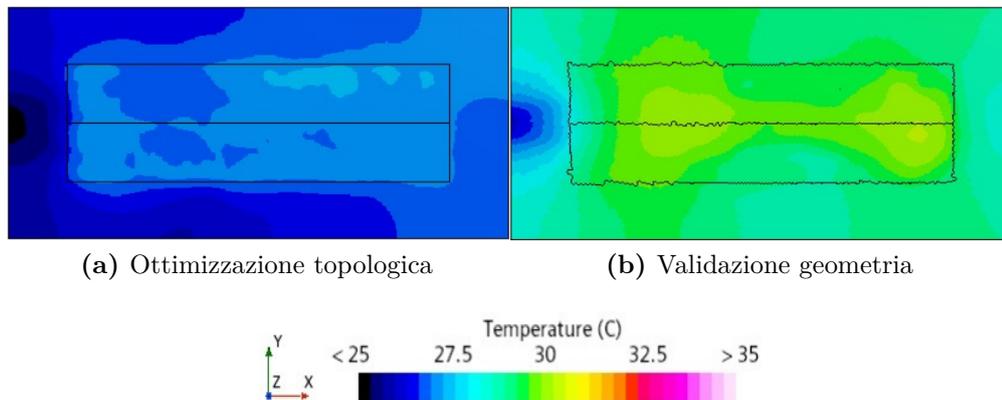


Figura 3.10: Confronto tra le distribuzioni di temperatura sulla superficie della batteria tra simulazione di ottimizzazione e validazione: configurazione 1.

Viste le approssimazioni presenti nella simulazione di ottimizzazione topologica, un aumento di temperatura media di soli 2°C e un peggioramento dell'uniformità di temperatura sulla superficie delle celle di soli $0,3^{\circ}\text{C}$ di deviazione standard è un risultato che può essere considerato accettabile. La geometria della piastra ottenuta con l'ottimizzazione topologica risulta quindi validata.

3.2 Simulazione di 2 celle elettrochimiche: Configurazione 2

Utilizzando come riferimento i risultati e gli andamenti della configurazione 1 del paragrafo 3.1, si procede alla valutazione di possibili semplificazioni del modello, al fine di perseguire un duplice obiettivo:

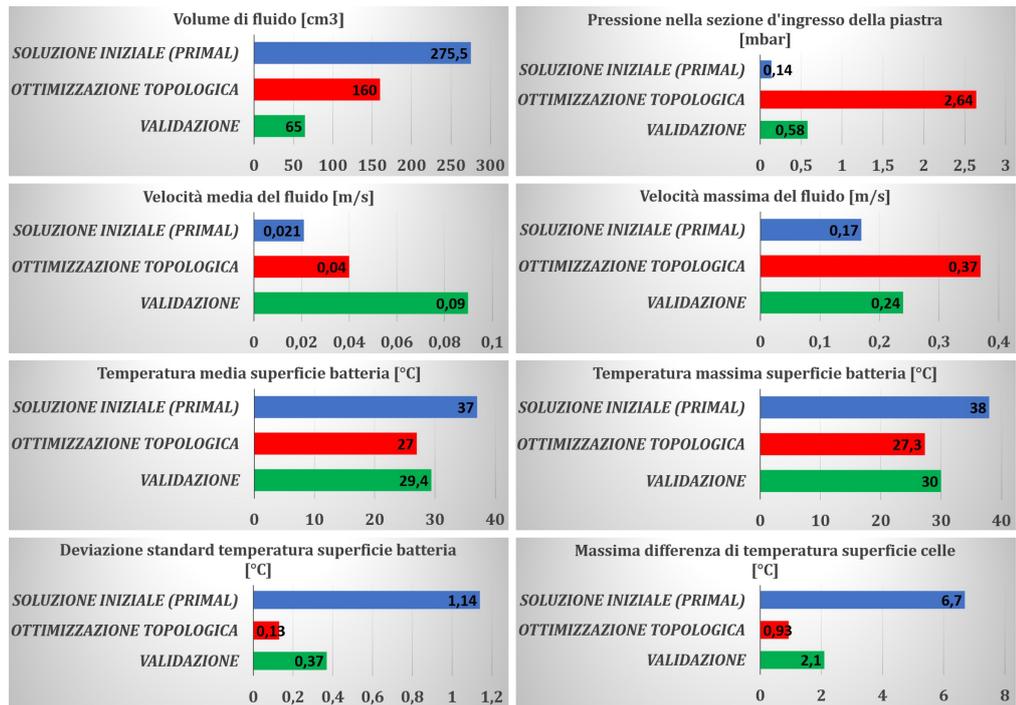


Figura 3.11: Parametri termici e fluidodinamici-configurazione 1.

- individuare soluzioni per limitare l'azione dell'ottimizzatore lungo la direzione normale alle piastre che circondano il volume di ottimizzazione, che obbliga a ricorrere esclusivamente alla fabbricazione additiva, a causa della complessità della superficie dei condotti della piastra ottimizzata.
- cercare di ridurre i tempi di calcolo per poter analizzare più nel dettaglio le problematiche di convergenza netta della frazione di solido evidenziate dalla configurazione 1.

Per cercare di limitare l'azione del solutore lungo la direzione verticale, e testare così le potenzialità dell'ottimizzazione topologica per processi di produzione delle piastre di raffreddamento con le tradizionali lavorazioni, vengono introdotte due semplificazioni del modello. La prima riguarda la superficie di contorno inferiore del volume di ottimizzazione, che non è in diretto contatto con la sorgente di calore: si decide dunque di rimuovere la piastra inferiore, così da poter imporre un piano di simmetria come condizione al contorno sulla superficie inferiore del volume di ottimizzazione. L'ipotesi di piano di simmetria, in realtà molto forte vista la reale geometria del modello, permette di inibire la creazione di solidi sulla superficie costituente la condizione al contorno.

La modifica attuata per la superficie superiore consiste nel ridurre la dimensione

della griglia di calcolo del volume di ottimizzazione fino ad ottenere 2 soli nodi lungo la direzione verticale, per avvicinare il modello ad un caso bidimensionale (quasi2D). Il ridotto numero di celle (al massimo 4 celle dopo l'azione del raffinamento adattivo AMR) dovrebbe quindi limitare la complessità delle pareti avvicinandole a geometrie piane.

L'eliminazione della piastra inferiore e la modifica sulla dimensione base di griglia permettono di ottenere una riduzione di un ordine di grandezza sul numero di celle di calcolo, passando da circa 670'000 a poco meno di 60'000.

L'impatto delle modifiche effettuate sulla soluzione iniziale (primal flow) viene evidenziato in figura 3.12: è presente una differenza dei valori locali di temperatura fino a 6 °C. L'insufficiente finitura della griglia lungo la direzione dello spessore provoca quindi una sovrastima del campo di temperatura ed una variazione della distribuzione di temperatura lungo la superficie delle celle. La configurazione iniziale risulta già non accurata a sufficienza per un utilizzo in fase di progettazione, ma valida per gli obiettivi per cui questo modello è stato realizzato.

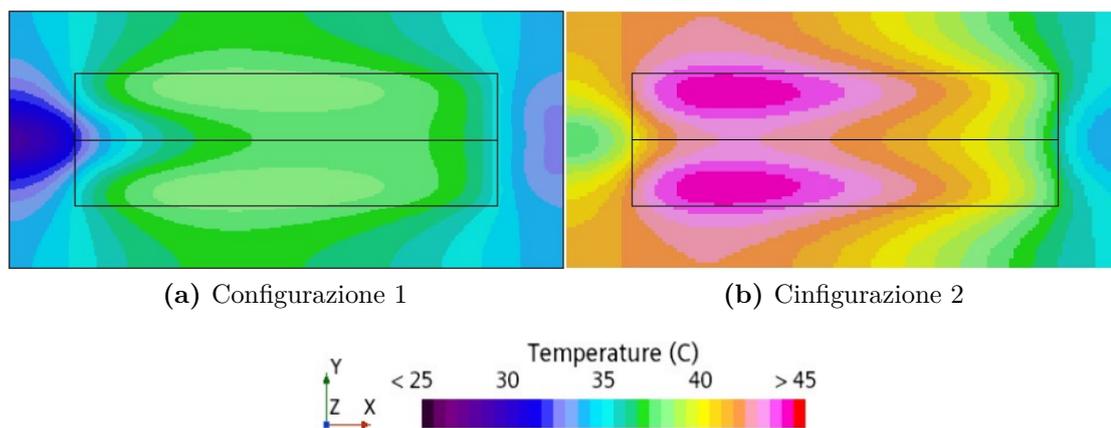


Figura 3.12: Confronto tra le distribuzioni di temperatura sulla superficie delle celle della soluzione iniziale (primal flow)

Il tempo necessario a completare un ciclo di ottimizzazione scende infatti da 12 minuti a poco più di 2 minuti, permettendo di effettuare, utilizzando la potenza di calcolo di 22 processori, lo stesso numero di cicli (1000) in circa 34 ore, contro le 185 ore (circa 8 giorni) richieste dalla configurazione 1 utilizzando 96 processori. In figura 3.13 si riporta la progressione della geometria ottenuta in istanti significativi del processo di ottimizzazione: le geometrie risultano diverse da quelle ottenute con la configurazione 1. In particolare si evidenziano condotti mediamente più rastremati ed una maggiore percentuale di solido all'interno del dominio di ottimizzazione. La tipologia di ramificazioni risulta invece abbastanza coerente, eccezione fatta per la presenza di un'asimmetria rispetto alla direzione longitudinale,

che nella configurazione 1 non si evidenzia. La progressione dell'ottimizzazione presenta inoltre un comportamento simile a quello evidenziato con la configurazione 1 quando la frazione in volume di solido subisce la brusca decrescita conseguente alla violazione del vincolo di pressione: anche in questo caso compaiono infatti delle zone fluide (in bianco) all'interno del volume ottimizzato, che non essendo però attraversate dalle linee di flusso, costituiscono sostanzialmente porzioni di volume dove il fluido è praticamente fermo. L'utilizzo di un piano di simmetria

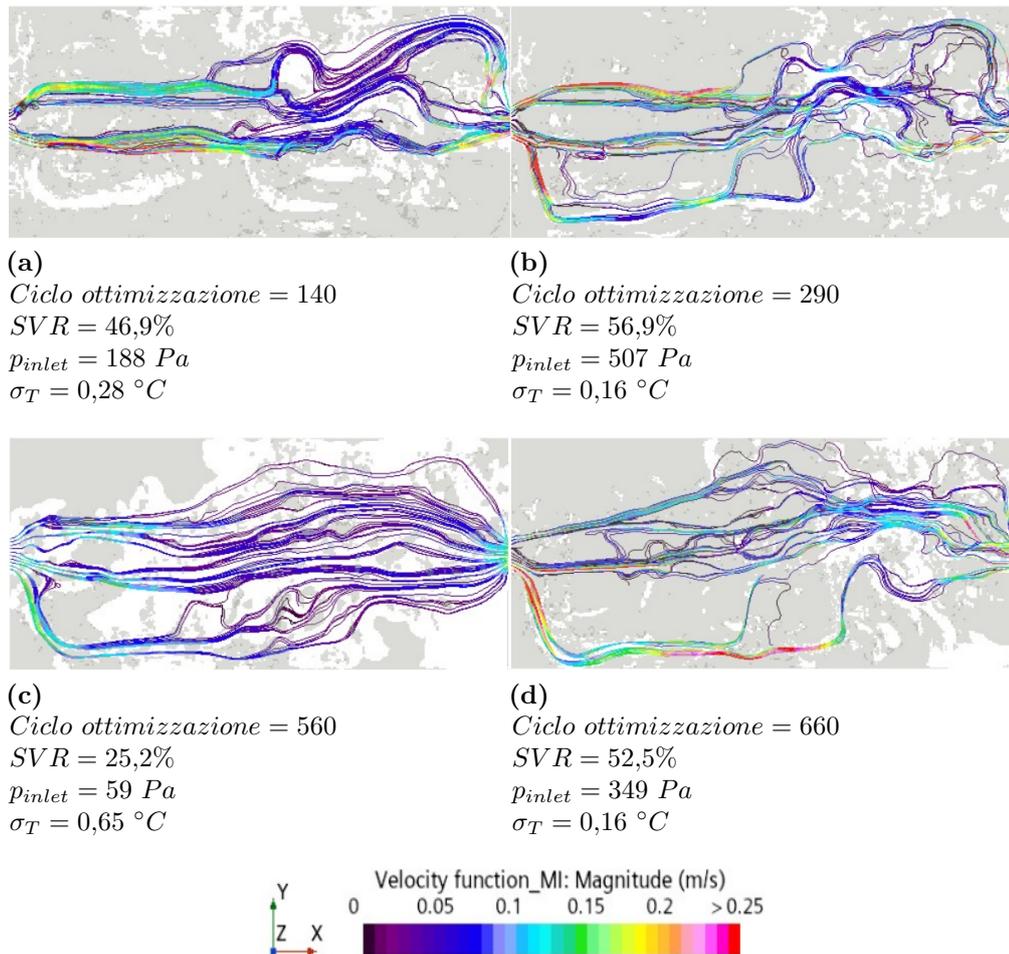


Figura 3.13: Progressione della geometria ottimizzata-configurazione 2: linee di flusso

sulla superficie inferiore del volume di ottimizzazione e la riduzione di finitura della griglia hanno un impatto non trascurabile sulle caratteristiche geometriche della piastra di raffreddamento ottimizzata rispetto alla configurazione 1, nonostante

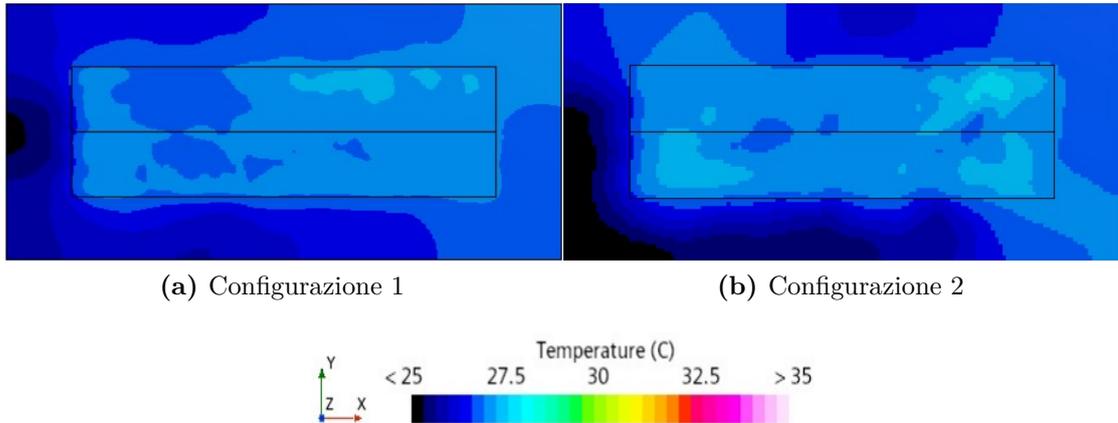


Figura 3.14: Distribuzione ottimale di temperatura sulla superficie delle celle al termine dell'ottimizzazione

Grandezza	Configurazione 1	Configurazione 2
σ_T [$^{\circ}C$]	0,13	0,16
SVR [-]	41,9%	52,5%
p_{inlet} [Pa]	264	350
T_{avg} [$^{\circ}C$]	27	27,1
ΔT_{max} [$^{\circ}C$]	0,93	1,24

Tabella 3.4: Confronto parametri risultanti dall'ottimizzazione topologica (configurazione 1 e configurazione 2)

i risultati dell'ottimizzazione forniscano prestazioni termiche (Figura 3.14) praticamente equivalenti nei due casi, almeno per la superficie di contatto delle celle, riassunte in tabella 3.4.

Le modifiche apportate alla configurazione di calcolo non risultano inoltre sufficienti a risolvere il problema della complessità geometrica delle pareti: la presenza di profili turbolatori è solo in parte attenuata.

Il comportamento del solutore, osservando la figura 3.15, presenta le stesse caratteristiche di quello osservato nella configurazione di calcolo 1, il che suggerisce che la configurazione di calcolo 2 possa essere considerata per approfondire, grazie ai ridotti tempi di calcolo, le problematiche di stabilità della convergenza dell'ottimizzazione.

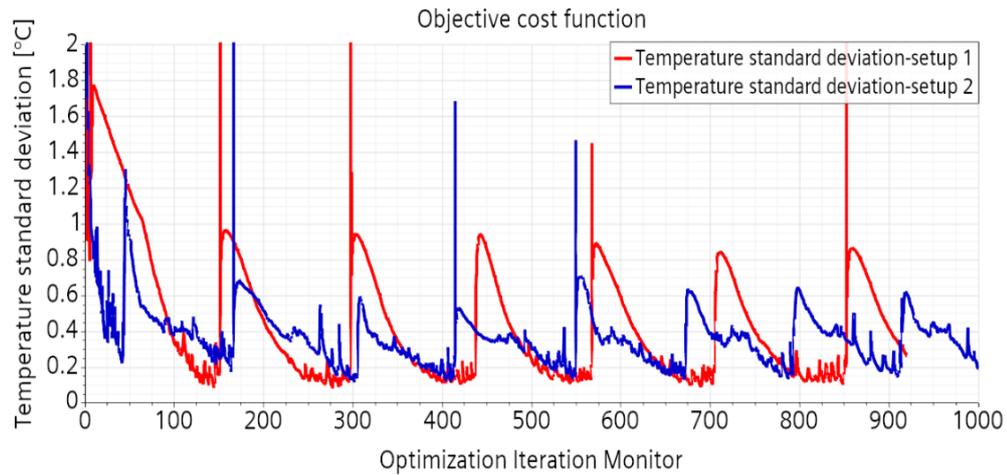


Figura 3.15: Funzione obiettivo-configurazione 2.

3.3 Simulazione di 2 celle elettrochimiche: Configurazione 3

Nella terza configurazione di calcolo si è scelto di dimezzare il volume complessivo di tutto dominio allo scopo di ridurre ulteriormente i tempi di calcolo.

La condizione di simmetria permette di ottenere una riduzione del numero di celle da 60'000 a circa 24'000, con il vantaggio di ridurre il tempo per ciclo di ottimizzazione di più del 30 % rispetto alle impostazioni di calcolo della configurazione 2 (paragrafo 3.2) e di quasi il 90 % rispetto alla configurazione 1 (paragrafo 3.1).

Il confronto delle soluzioni iniziali (Fig. 3.16) presenta anche in questo caso delle differenze: la temperatura massima è superiore di circa 1°C e la distribuzione risulta spostata verso l'alto.

Il campo di temperatura ottenuto al termine dell'ottimizzazione, confrontato con il risultato della simulazione della configurazione 2 presentata nel paragrafo 3.2, è riportato in figura 3.17: la configurazione 2 non ha evidenziato una distribuzione perfettamente simmetrica rispetto al piano x-z, come invece ci si aspetta dal punto di vista teorico vista la distribuzione assialsimmetrica delle condizioni al contorno e, di conseguenza, del flusso che attraversa la batteria. Tali condizioni sono invece naturalmente rispecchiate nei risultati della configurazione di calcolo 3 grazie alle condizioni al contorno adottate. Si ha inoltre un aumento sia della temperatura massima che di quella media di circa 1°C, garantendo però lo stesso livello di uniformità di temperatura, pari a circa 0,8°C di deviazione standard sulla superficie delle celle. Un dettaglio interessante è osservabile confrontando i campi di temperatura e l'andamento delle linee di flusso dalle figure 3.17 e 3.18: la

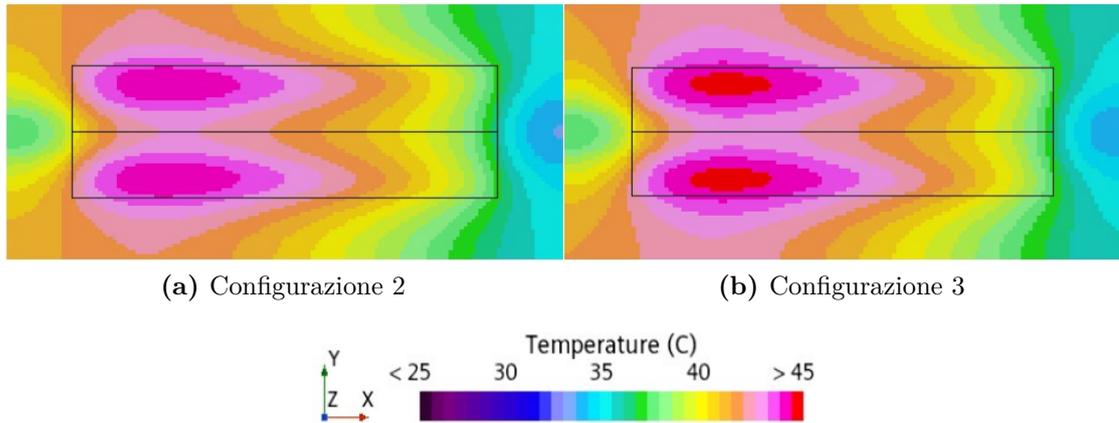


Figura 3.16: Campo di temperatura sulla superficie delle celle: soluzione iniziale (primal flow)

figura 3.17b e la 3.18b riferite alla configurazione 3 sembrano mostrare un legame qualitativo tra ramificazione dei canali e campo di temperatura sovrastante, che è possibile individuare anche nella porzione di dominio opposta delle figure 3.17a e 3.18a.

In definitiva le differenze riscontrate tra i risultati di queste configurazioni dimostrano un'estrema sensibilità dell'andamento di frazione di solido, che si ripercuote su tutte le variabili di ottimizzazione, a qualsiasi modifica introdotta. L'ottimizzazione topologica richiede quindi in fase di progettazione una descrizione il più possibile accurata e dettagliata della geometria di riferimento.

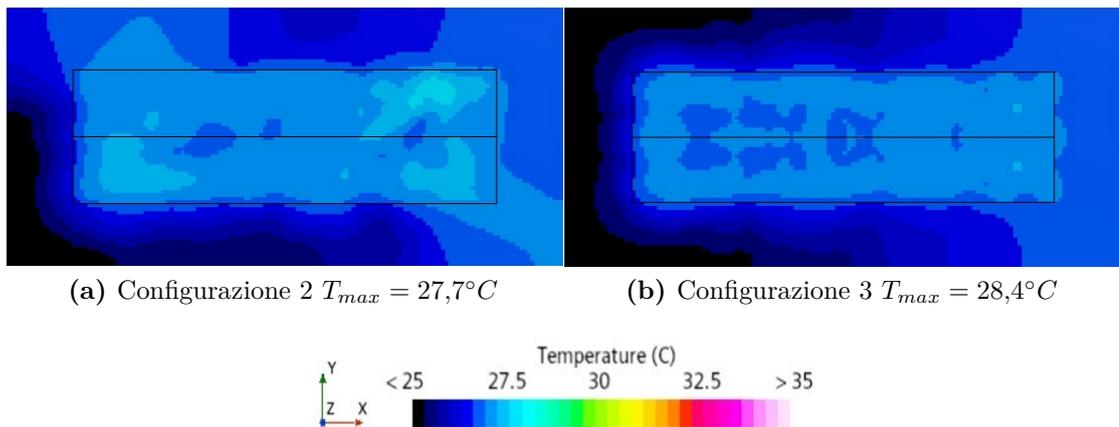


Figura 3.17: Distribuzione di temperatura sulla superficie delle celle per la piastra risultante dall'ottimizzazione

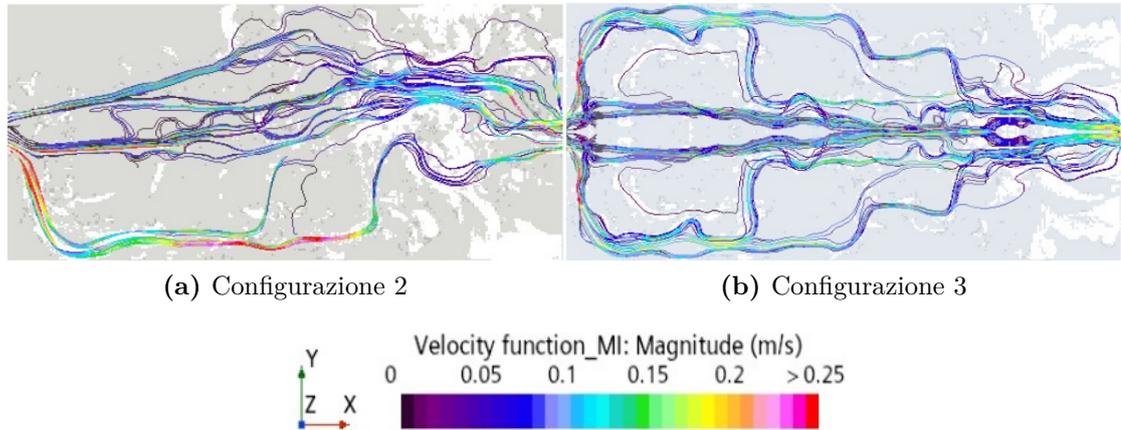


Figura 3.18: Confronto della distribuzione delle linee di flusso per la geometria dei condotti risultante dall’ottimizzazione

La tabella 3.5 riassume i risultati delle principali grandezze d’interesse per la valutazione della prestazione termica dei 3 modelli analizzati.

Grandezza	Configurazione 1	Configurazione 2	Configurazione 3
σ_T [$^{\circ}C$]	0,13	0,16	0,1
SVR [-]	41,9%	52,5%	52,7%
p_{inlet} [Pa]	264	350	430
T_{avg} [$^{\circ}C$]	27	27,1	27
ΔT_{max} [$^{\circ}C$]	0,93	1,24	0,8

Tabella 3.5: Confronto parametri risultanti dall’ottimizzazione topologica tra le tre configurazioni presentate

3.3.1 Configurazione 3: validazione

Anche per la configurazione di calcolo 3 è stata svolta la procedura di validazione dei risultati dell’ottimizzatore topologico estraendo la geometria mediante la stessa procedura descritta al paragrafo 3.1.1.

Dalla figura 3.19 è possibile osservare come a parità di criterio di estrazione, le operazioni di pulizia della superficie dei canali siano estremamente ridotte rispetto a quanto visto con la geometria del primo modello. I canali ottenuti nella rappresentazione di figura 3.19b possono essere ulteriormente rifiniti e smussati, per renderne i contorni meno spigolosi, ma non risultano comunque ottenibili con i

comuni processi tecnologici. L'unica possibile soluzione rimane quindi la produzione con metodi di fabbricazione additiva.

A differenza delle operazioni di estrazione della superficie fatte per la configurazione 1, la condizione di piano di simmetria sul bordo inferiore del volume ottimizzato e la risultante superficie aperta obbligano ad intersecare la isosuperficie con un piano orizzontale, ottenendo una sezione dei canali che potrebbe risultare approssimata rispetto al risultato che l'ottimizzazione topologica fornirebbe agendo su tutte le superfici del volume di ottimizzazione. Si sceglie la coordinata $z=0$, coincidente con la quota di riferimento di questo bordo del dominio di ottimizzazione.

In figura 3.20 viene illustrata la morfologia della superficie all'inizio delle operazioni (Fig. 3.20a) ed una volta che questa sia pronta per essere simulata (Fig. 3.20b).

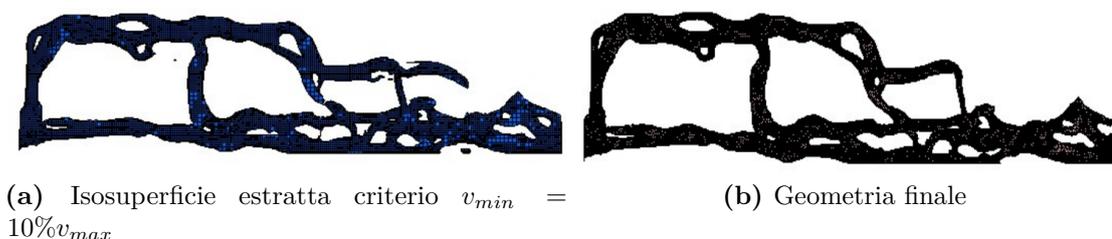
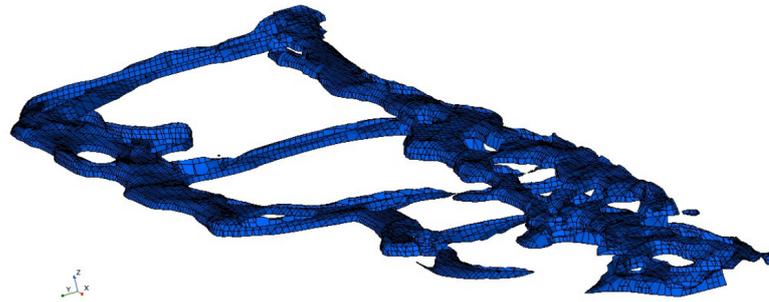


Figura 3.19: Validazione configurazione 3: rifinitura della superficie estratta

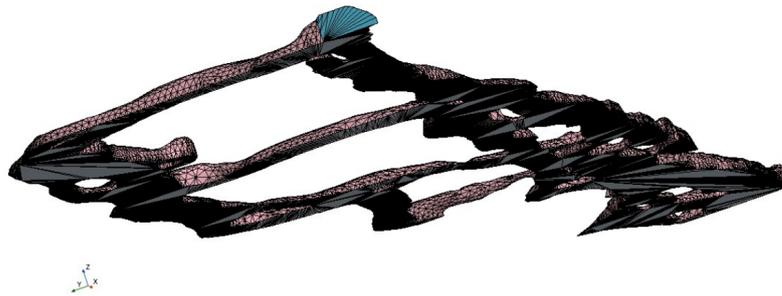
Il risultato della simulazione di validazione è riportato in figura 3.21: la distribuzione di temperatura rispetto al risultato fornito dall'ottimizzatore presenta degli scostamenti che risultano essere in linea con quanto visto per la configurazione 1. Anche in questo caso si ottiene infatti un parziale degrado di prestazione termica, sia come temperatura media che come uniformità di temperatura sulla superficie della cella.

Un dettagliato resoconto delle differenze di tutti i parametri tra risultato dell'ottimizzazione e validazione della geometria è presentato nei grafici a barra di figura 3.22: risulta in questo caso un maggior accordo tra le pressioni, con uno scostamento di circa 1 mbar contro i quasi 2 mbar della validazione della configurazione 1. Lo scostamento del volume di fluido risulta invece in entrambi i casi di circa 50 cm^3 .

Anche in questo caso lo scostamento tra i risultati viene considerato accettabile, visto anche l'aumento delle approssimazioni introdotte con le impostazioni di calcolo della configurazione 3.

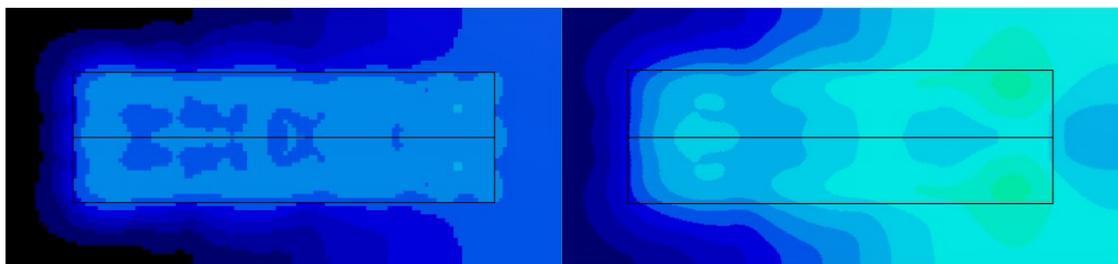


(a) Superficie estratta



(b) Superficie finale

Figura 3.20: Validazione configurazione 3: dettaglio su operazioni di chiusura del dominio di ottimizzazione



(a) Ottimizzazione topologica

(b) Validazione

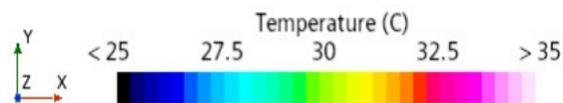


Figura 3.21: Confronto distribuzione di temperatura sulla superficie della cella: configurazione 3

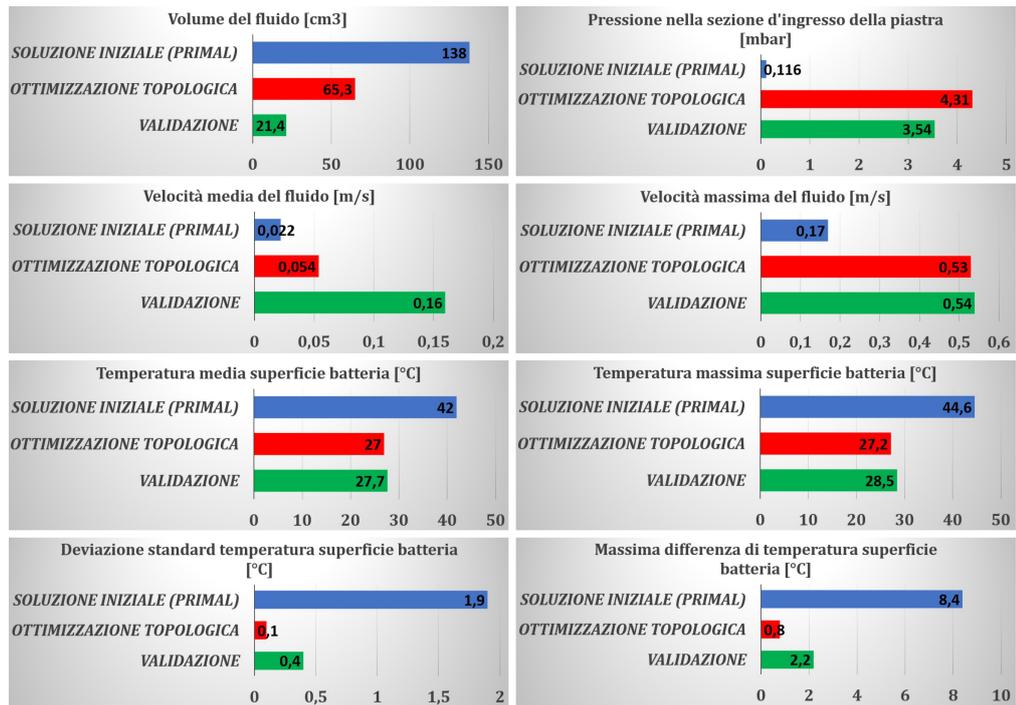


Figura 3.22: Parametri termici e fluidodinamici-configurazione 3

3.3.2 Configurazione 3: validazione della geometria semplificata per processi produttivi tradizionali

La geometria del modello validato può anche essere utilizzata come riferimento per un confronto, nell'ottica di risoluzione della problematica di fabbricabilità della piastra di raffreddamento con processi tecnologici tradizionali. Considerato infatti che la configurazione 2 non ha prodotto i risultati sperati su questo aspetto, si è individuata un'altra possibile soluzione per adattare la geometria ottenuta con l'ottimizzazione topologica ad un circuito stampato tradizionale. Partendo dalla traccia del contorno della isosuperficie lungo un piano orizzontale è infatti possibile realizzare un'estrusione lungo la normale, la cui profondità viene inizialmente imposta pari all'altezza di riferimento del volume di ottimizzazione (5mm), realizzando la chiusura del volume fluido attraverso intersezioni con dei piani orizzontali (Figura 3.23).

La figura 3.24 mostra le differenze tra le due piastre in termini di distribuzione di temperatura: la 3.24b conferma come l'effetto delle frequenti ondulazione delle pareti e della sezione variabile dei condotti abbiano un impatto notevole sulla prestazione termica complessiva, sia in termini di temperatura media che di uniformità della distribuzione. La 3.24c, è riferita ad un'ottimizzazione della geometria estrusa

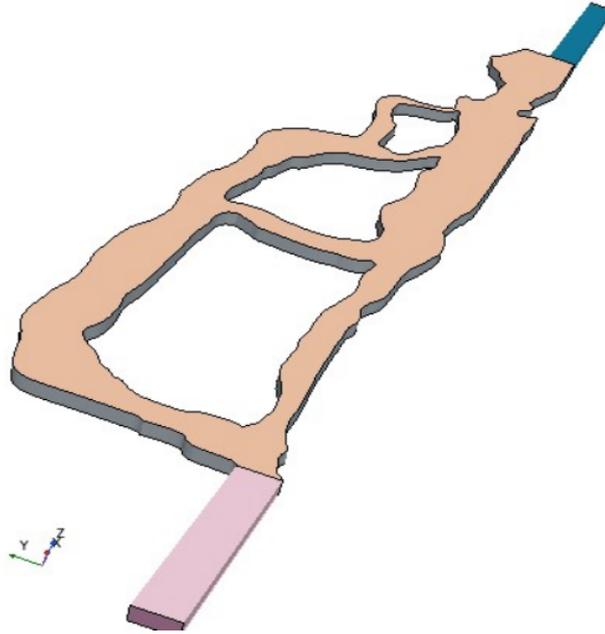


Figura 3.23: Geometria dei canali ottenuti per estrusione con la configurazione 3

tramite una variazione della sezione dei canali, eseguita con una modifica della loro altezza.

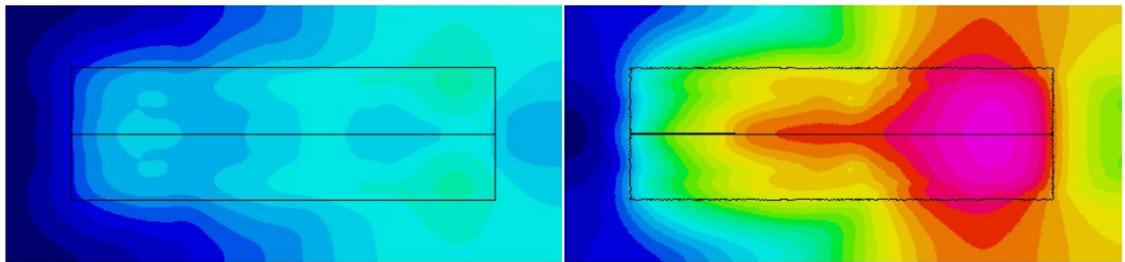
Per ottenere questa nuova altezza, si è valutata la sezione media dalla portata transitante di $4,96 \frac{g}{s}$ e dalla media volumetrica di velocità $0,07 \frac{m}{s}$ in una delle due diramazioni della geometria estrusa con altezza di 5mm, ricavando la larghezza media del canale tramite la 3.2

$$\begin{cases} A_{media} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot v} = 70 \text{ mm}^2 \\ l_{media} = \frac{A}{h} = 14 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.2)$$

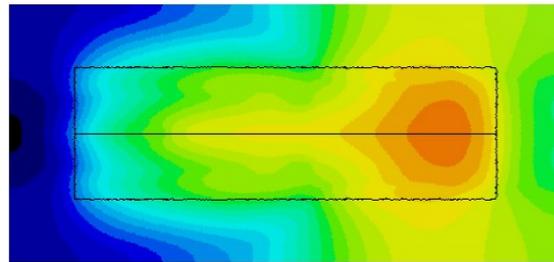
Essendo molto simile la suddivisione delle portate transitanti nelle diverse diramazioni delle due validazioni realizzate, si ottiene la nuova altezza di 2,9 mm imponendo la stessa velocità media, che per la geometria risultante dall'ottimizzazione topologica è di $0,121 \frac{m}{s}$.

La figura 3.24c permette di evidenziare come questa modifica di design abbia un effetto positivo sia sulla temperatura media che sull'uniformità, avvicinandone le prestazioni alla geometria della piastra ottenuta con l'isosuperficie.

Un resoconto delle tre geometrie validate è dettagliato attraverso i grafici della figura 3.25: le velocità media risultano adesso molto simili tra isosuperficie ed estrusione del contorno ($h=2,9 \text{ mm}$), mentre un notevole divario si evidenzia ancora tra gli altri parametri fluidodinamici. Queste differenze contribuiscono a rendere la



(a) Geometria estratta con isosuperficie (b) Geometria ricavata con estrusione del contorno con $h=5$ mm



(c) Geometria ricavata con estrusione del contorno con $h=2,9$ mm

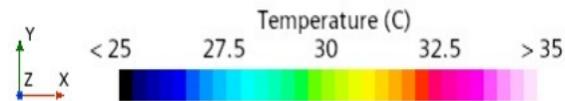


Figura 3.24: Distribuzione di temperatura sulla superficie delle celle

geometria estrusa ancora non all'altezza delle prestazioni termiche dell'isosuperficie: dimostrano però come le geometrie fornite dalla topologica possano essere prese come riferimento e poi ottimizzate, al fine di trovare un buon compromesso tra prestazioni ed affidabilità e costi del processo produttivo.

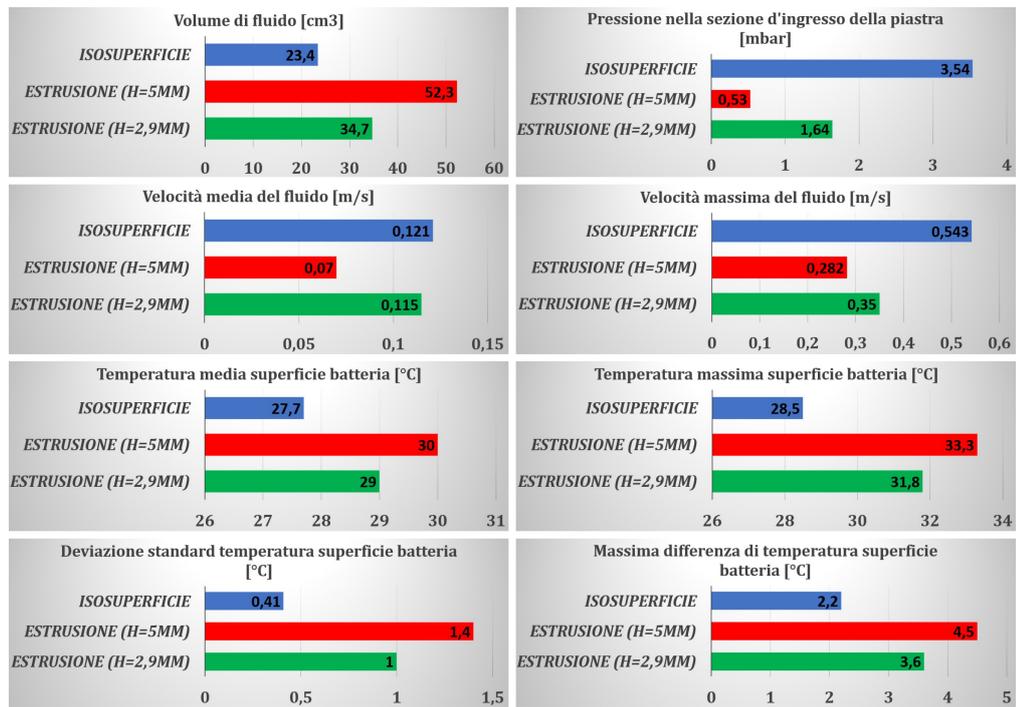


Figura 3.25: Confronto risultati simulazioni di validazione della configurazione 3

Capitolo 4

Analisi di sensitività ai parametri del modello di ottimizzazione

In questo capitolo verrà trattata un'analisi di sensitività ai parametri dell'algoritmo di ottimizzazione utilizzando la configurazione 3 del paragrafo 3.3. Vengono forniti i risultati delle diverse simulazioni confrontandoli con la configurazione di partenza, cercando di individuare le cause delle problematiche di convergenza mostrate dall'andamento delle variabili di ottimizzazione nelle prime simulazioni.

Tutte le configurazioni presentate nel capitolo 3 mostrano una evidente problematica di stabilità di convergenza della funzione obiettivo, correlabile all'andamento del vincolo sulla pressione in ingresso al canale e a quello della frazione in volume di solido. Dai grafici di queste grandezze è possibile notare in tutte le configurazioni la stessa tendenza: l'ottimizzazione evolve nella direzione di un incremento monotono di frazione in volume di solido (SVR) con un conseguente incremento della pressione richiesta in ingresso al circuito. Questi fattori determinano un decremento della deviazione standard di temperatura. L'andamento descritto, visibile in figura 4.1, prosegue finché non viene raggiunto il valore di soglia di pressione massima ammissibile, il cui superamento provoca un forte decremento del valore di frazione solida e conseguentemente di pressione, risultante in un peggioramento dell'uniformità di temperatura. Questo comportamento si ripete ciclicamente, mostrando i valori minimi della funzione obiettivo sempre nello stesso intorno ($0,1-0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), ottenuti all'interno di un range di frazione solida ($0,5-0,6$) e di pressione ($450-700\text{ Pa}$). Dall'osservazione della progressione della distribuzione di materiale sia per la configurazione 1 (Fig. 3.6) che per la configurazione 2 (Fig. 3.13), è possibile rilevare come in realtà a valle del picco di SVR, il decremento repentino non provochi

grandi cambiamenti delle traiettorie delle linee di flusso, ma introduca delle zone al di sopra della soglia imposta sull'indicatore di materiale per la transizione a volume solido ($1 - \chi < 0,5$, ma a velocità quasi/o nulla (non sono attraversate da linee di flusso). Si registra inoltre una riduzione di circa il 40% della velocità media del flusso (a seguito della riduzione della differenza di pressione tra ingresso ed uscita della piastra).

Con l'obiettivo di valutare le cause di questo comportamento del solutore, un'analisi di sensitività ai parametri dell'algoritmo di ottimizzazione è stata svolta: le analisi indicate in questo capitolo hanno lo scopo di presentare un riassunto dei risultati più significativi.

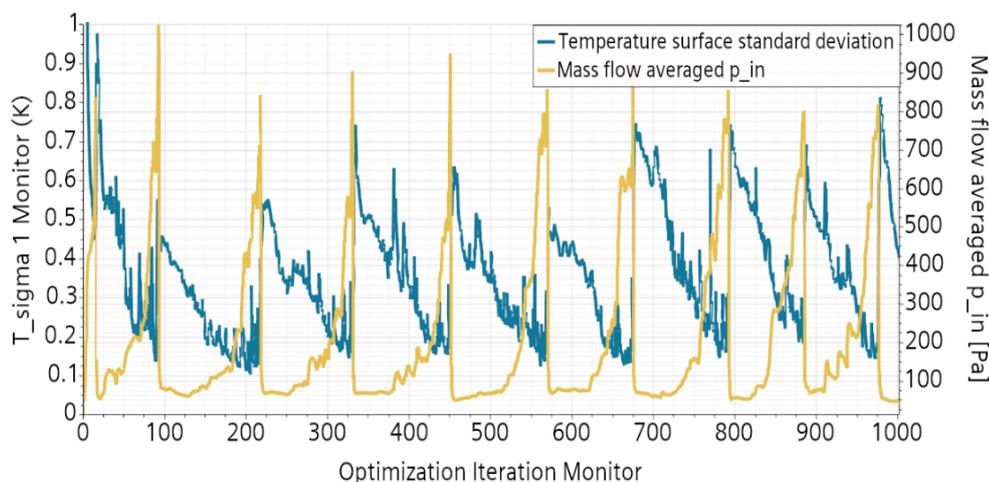
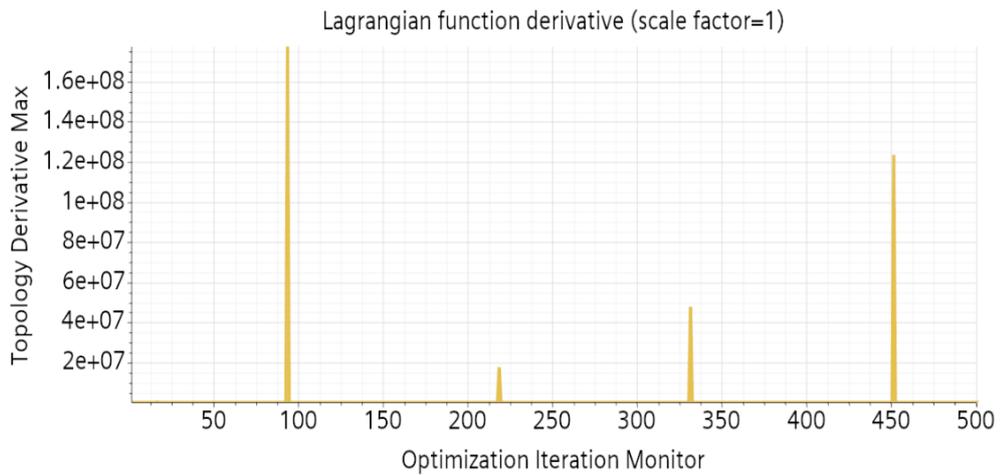


Figura 4.1: Correlazione tra funzione obiettivo e vincolo di pressione

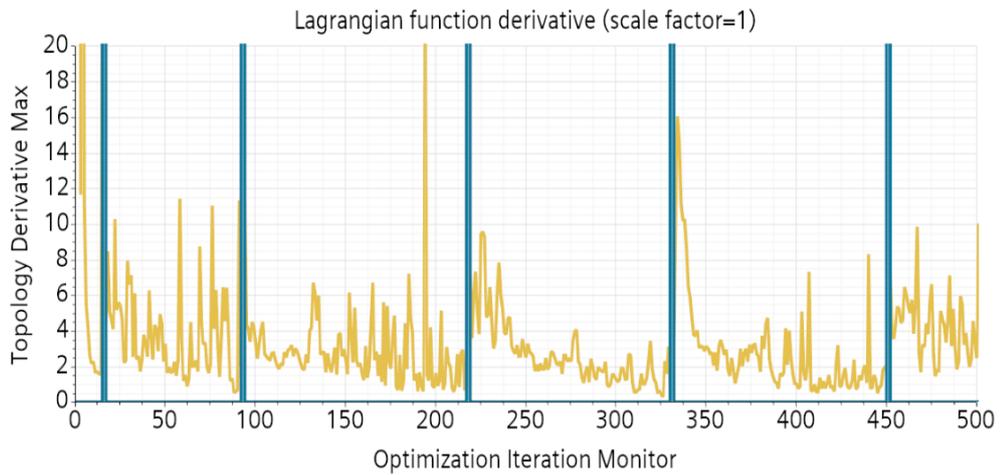
4.1 Sensitività al fattore di scala

Dall'equazione 2.23 di aggiornamento dei moltiplicatori di Lagrange di ciascun vincolo è possibile ricostruire il valore numerico di c_i per qualsiasi valore del passo di ottimizzazione. Da questa analisi si è verificato come il vincolo di pressione risulti numericamente molto maggiorato, a causa del diverso ordine di grandezza del suo valore di soglia (800 Pa), rispetto agli altri vincoli ed alla funzione obiettivo. Questo squilibrio è un segnale di una normalizzazione delle grandezze, operata dal solutore, che non viene realizzata in modo appropriato: si determina infatti una netta predominanza rispetto alla funzione obiettivo all'interno della funzione lagrangiana, aumentata quando il vincolo viene violato. In figura 4.2 sono infatti visibili i differenti ordini di grandezza nel massimo della derivata della funzione lagrangiana: i picchi in figura 4.2a si ottengono quando la funzione lagrangiana

possiede sia il contributo numerico dei vincoli (l'unico violato è quello di pressione) che del fattore di penalizzazione, di ordine di grandezza 10^5 . Quando invece la funzione lagrangiana non è aumentata ($\psi = 0$), l'ordine di grandezza della derivata è correlato alla sola funzione obiettivo (Fig. 4.2b) e risulta in 7 ordini di grandezza di differenza (considerando i 5 ordini introdotti dal fattore di penalizzazione si ha una differenza di 2 ordini rispetto al valore della funzione lagrangiana priva di vincoli).



(a) Max derivata lagrangiana aumentata ($\psi_i > 0$)



(b) Max derivata lagrangiana ($\psi_i = 0$)

Figura 4.2: Derivata funzione lagrangiana con configurazione 3.

Questa differenza nella variazione della derivata si ripercuote sulla strada di ottimizzazione, provocando improvvise variazioni negli andamenti della percentuale di solido e della funzione obiettivo non appena la funzione lagrangiana diventa aumentata per la violazione del vincolo.

Una soluzione possibile è quindi di ridurre il valore numerico di "c_i" legato al vincolo di pressione, attraverso una modifica del suo fattore di scala (scale factor), così da correggere la normalizzazione operata dal solutore. Risulta necessario inoltre rendere anche meno aggressiva l'azione del fattore di penalizzazione, accettando quindi un aumento del numero di cicli richiesti affinché i vincoli rientrino all'interno dei valori soglia una volta che sono stati violati, ma a favore di variazioni meno brusche delle varie grandezze.

In figura 4.3 sono riportati gli andamenti della funzione obiettivo e della frazione in volume di solido per i due valori del fattore di scala. L'andamento della frazione di solido a seguito della modifica non mostra più le ampie variazioni che si avevano nella simulazione precedente al superamento del vincolo di pressione, mantenendosi nell'intorno della zona dove il valore di SVR risulta essere quello ottimale. Tutte le curve (anche quella di pressione non riportata) mostrano però un netto aumento della frequenza di oscillazione, come conseguenza del diverso comportamento di SVR: collocandosi infatti più frequentemente su valori alti (intervallo 0,5-0,7) si raggiunge e supera il vincolo di pressione con maggiore frequenza. La modifica determina quindi una variazione del comportamento del solutore nella direzione che ci si aspettava, facendo però emergere come la problematica di stabilità sia dipendente anche da altri fattori.

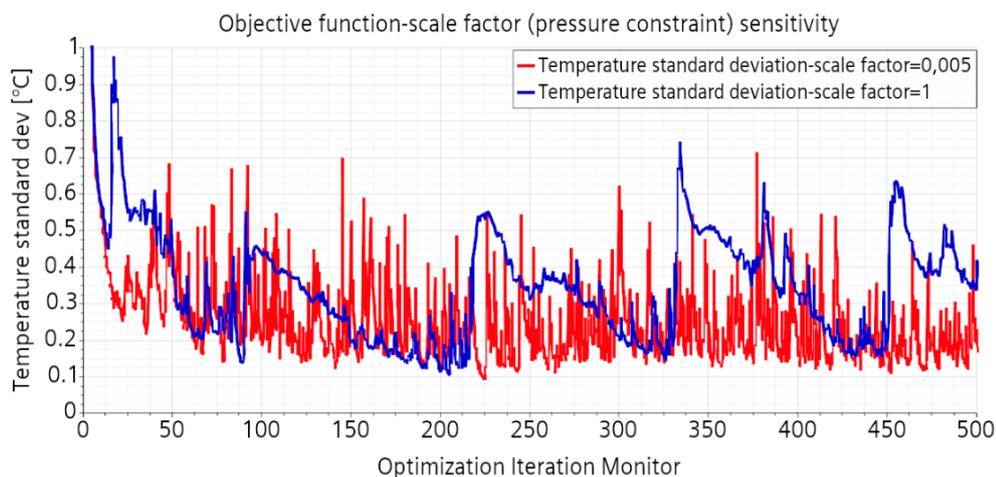
4.1.1 Variazione dei coefficienti di sotto-rilassamento

I grafici della derivata della funzione lagrangiana aumentata, in particolare il 4.2b, mostrano anche come soddisfatta la condizione $\psi = 0$ nella 2.21, il metodo congiunto si avvicini, ma non arrivi mai nella condizione espressa dalla 4.1

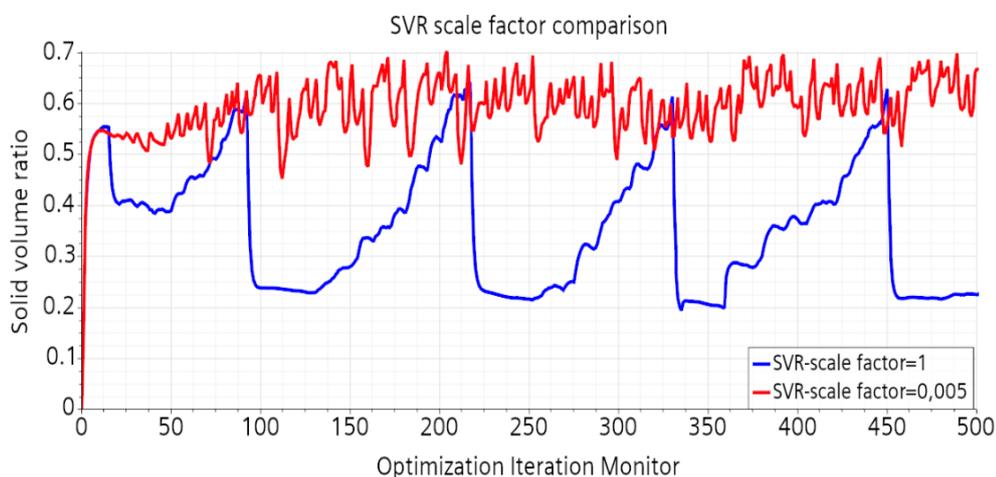
$$\frac{df(\chi)}{d\chi} = 0 \tag{4.1}$$

giustificando quindi le continue variazioni di frazione in volume di solido e le sue ricadute sulle altre variabili di progetto.

Un possibile metodo di stabilizzazione potrebbe quindi essere quello di agire sui coefficienti di sotto-rilassamento dell'algoritmo ADAM, espressi dalla 2.29: l'incremento di β_1 agisce nella direzione di rendere il passo di ottimizzazione meno sensibile al risultato fornito dal metodo congiunto (la derivata della funzione lagrangiana rispetto alla distribuzione di materiale) garantendone comunque la convergenza sul minimo, β_2 dovrebbe invece provocare un maggior decadimento del passo di ottimizzazione con il progredire dell'ottimizzazione stessa. Entrambe



(a) Funzione obiettivo



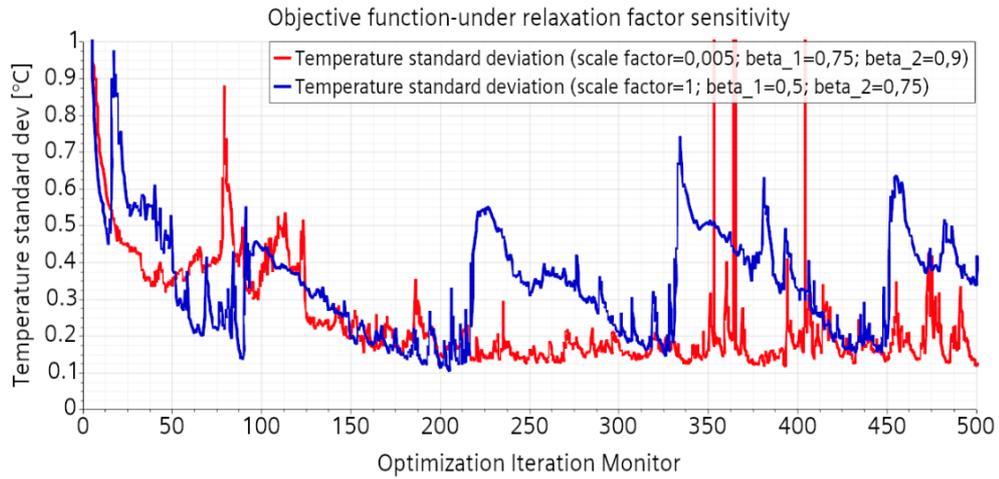
(b) Frazione in volume di solido

Figura 4.3: Sensitività al fattore di scala.

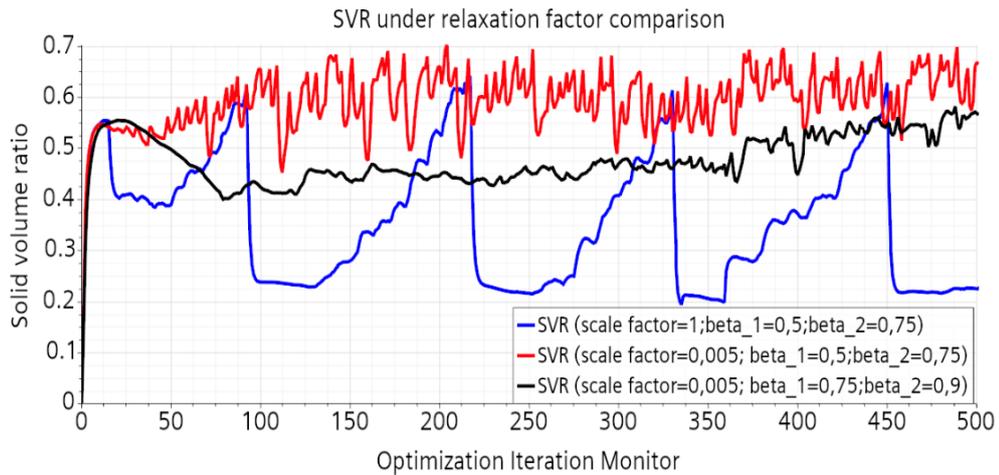
le modifiche dovrebbero concorrere quindi alla stabilizzazione dell'intero processo, a discapito però del tempo necessario (numero di cicli) alla convergenza sul punto di minimo.

Il risultato della simulazione della configurazione 3 con le modifiche congiunte al fattore di scala ed ai coefficienti di sotto-rilassamento è osservabile in figura 4.4. L'andamento della frazione in volume di solido presenta un andamento con ampiezza di oscillazione ridotta rispetto alla sola modifica del fattore di scala. Tale andamento si ripercuote positivamente anche sulla funzione obiettivo, con un

ampiezza di oscillazione ridotta rispetto ai risultati forniti dalla sola modifica del fattore di scala (in aumento verso la fine della simulazione) e non sufficiente quindi a garantire un valore finale stabile.



(a) Funzione obiettivo



(b) Frazione in volume solido

Figura 4.4: Sensitività coefficienti di sotto-rilassamento.

Le geometrie ottimali nei tre casi, riportati in figura 4.5, mostrano delle differenze, evidenziabili soprattutto in quella che utilizza la modifica congiunta di fattore di scala e coefficienti di sotto-rilassamento (Figura 4.5c). In questo caso non è stata realizzata una simulazione di validazione in quanto non è stato raggiunto l'obiettivo di una convergenza.

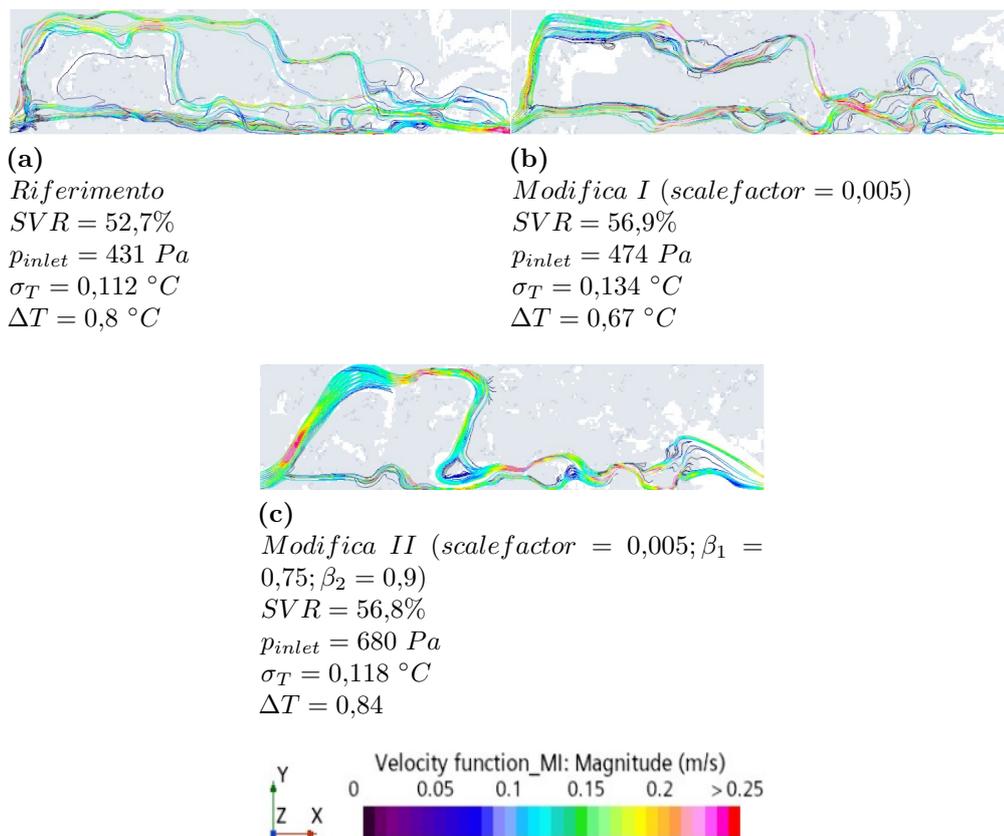


Figura 4.5: Sensitività geometria

4.2 Configurazione con vincoli normalizzati

Una strada alternativa alla modifica del fattore di scala è rappresentata da una diversa definizione matematica dei vincoli, che permetta di evitare la normalizzazione realizzata automaticamente dal solutore, il cui funzionamento si è dimostrato non ottimale per il problema in esame.

Per avere tutte le grandezze sulla stessa scala e quindi con uguale peso all'interno della funzione lagrangiana, tutti i vincoli vengono quindi valutati come scostamenti percentuali rispetto ai valori limite imposti. In questo modo il valore di soglia è uguale per tutti i vincoli e pari a 0. La funzione obiettivo viene invece normalizzata rispetto al valore della soluzione iniziale (primal flow), cosicchè realisticamente parta dal valore unitario e tenda verso 0 al raggiungimento dell'ottimo. La formalizzazione della normalizzazione è fornita con l'equazione 4.2

$$obiettivo = \frac{\sigma(T)}{\sigma(T)_{primal\ flow}} \quad (4.2)$$

Il vincolo di pressione in ingresso viene invece formalizzato con l'espressione 4.3, dove $p_{in,target}$ è il valore limite di 8 mbar

$$\frac{p_{in} - p_{in,target}}{p_{in,target}} \leq 0 \quad (4.3)$$

Nel caso del vincolo sulla continuità, viene definito un intervallo compreso tra i due estremi (positivo e negativo) di $m_{balance,target}$ all'interno del quale il bilancio di portata viene soddisfatto. L'intervallo scelto è $-0,1 [\frac{g}{s}] < m_{balance} < 0,1 [\frac{g}{s}]$ e la definizione del vincolo è espressa dalla coppia di equazioni in 4.4

$$\begin{cases} \text{se } m_{in} - m_{out} > 0 \text{ allora } m_{balance,target} = 0,1 [\frac{g}{s}] \\ \frac{m_{balance} - m_{balance,target}}{m_{balance,target}} \leq 0 \\ \text{se } m_{in} - m_{out} < 0 \text{ allora } m_{balance,target} = -0,1 [\frac{g}{s}] \\ \frac{m_{balance,target} - m_{balance}}{|m_{balance,target}|} \leq 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

I risultati della simulazione svolta con la configurazione descritto, indicati in figura 4.6), mostrano un andamento della funzione obiettivo molto più regolare rispetto alla configurazione 3, stazionando praticamente tutta la simulazione nella zona di minimo e registrando un valore finale leggermente più basso (0,08°C di deviazione standard con una differenza massima di temperatura di 0,5°C contro 0,11°C di deviazione standard e 0,7°C di differenza massimo della configurazione 3). L'andamento di SVR (Fig. 4.7) è in linea con quanto osservato per la funzione obiettivo, pur tornando a mostrare qualche brusca variazione che la modifica del fattore di scala aveva molto ridotto. In questo caso però la simulazione è condotta con lo stesso intervallo di crescita del fattore di penalizzazione (penalty factor) della simulazione base(1000-100'000), al fine di valutare il puro effetto della diversa normalizzazione, motivo per il quale le brusche variazioni potrebbero essere correlate ad una eccessiva aggressività nel rientro dei vincoli al di sotto delle soglie.

A conferma di ciò viene effettuata anche una simulazione con ridotto ordine di grandezza dell'intervallo del fattore di penalizzazione (1-100), i cui risultati confermano una riduzione dell'ampiezza di variazione nell'andamento della frazione solida e della funzione obiettivo, senza però mostrare una convergenza finale. Per brevità non sono stati inseriti grafici relativi alla simulazione descritta in quanto non aggiungono informazioni significative rispetto a quanto già introdotto.

Nella geometria finale in figura 4.8 non si evidenziano particolari differenze rispetto alla geometria della configurazione 3, con il vantaggio di ottenere un andamento decisamente più stabile della funzione obiettivo, privo dell'eccessiva

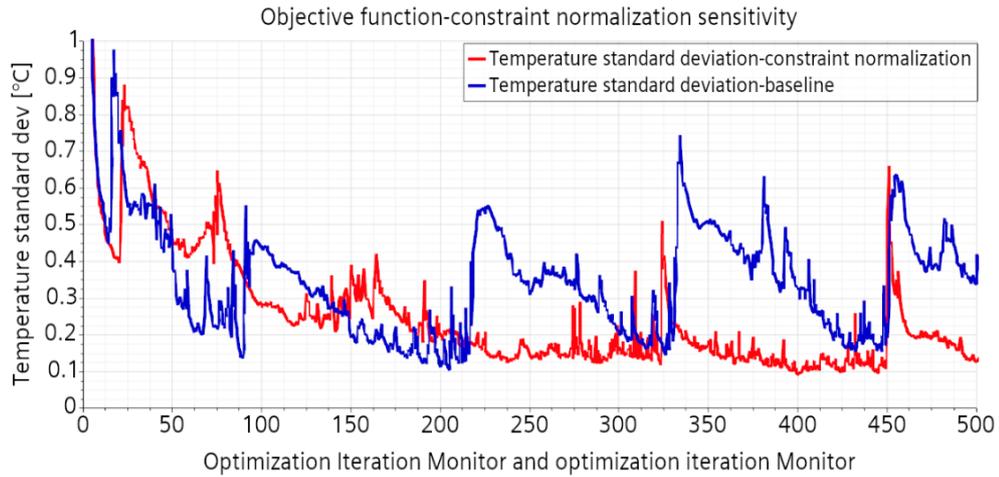


Figura 4.6: Sensitività alla normalizzazione dei vincoli: funzione obiettivo

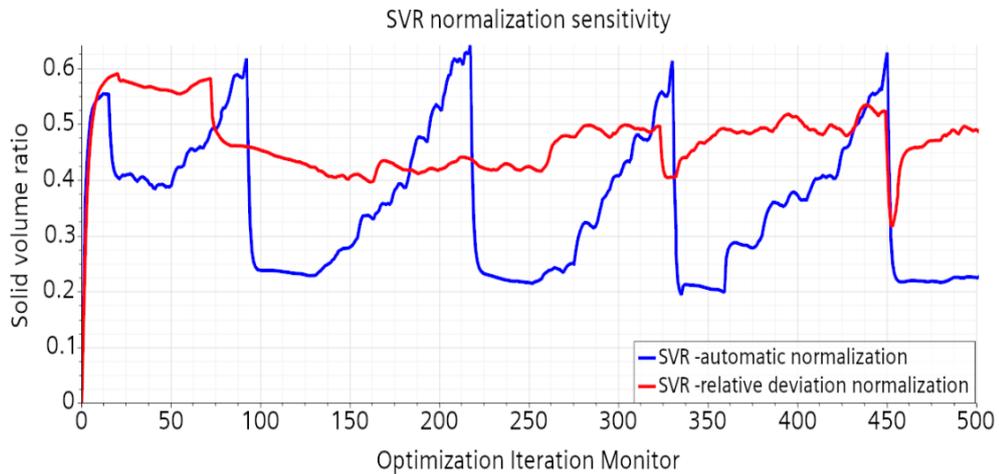


Figura 4.7: Sensitività alla normalizzazione dei vincoli: SVR

variabilità introdotta con la modifica del fattore di scala. La geometria ottimale viene quindi validata allo scopo di verificare l'impatto delle modifiche sugli scostamenti tra risultato dell'ottimizzazione e simulazione dettagliata di validazione, potendoli quindi confrontare con i risultati della validazione della configurazione 3 (Fig. 4.9). Il risultato della validazione della simulazione con la modifica sulla normalizzazione dei vincoli presenta una distribuzione di temperatura sulla superficie delle celle (Fig. 4.9) con un degrado di prestazione in linea con i risultati ottenuti per la configurazione 3. La principale differenza evidenziata è un ridotto aumento della temperatura massima ottenuta sulla superficie della cella.

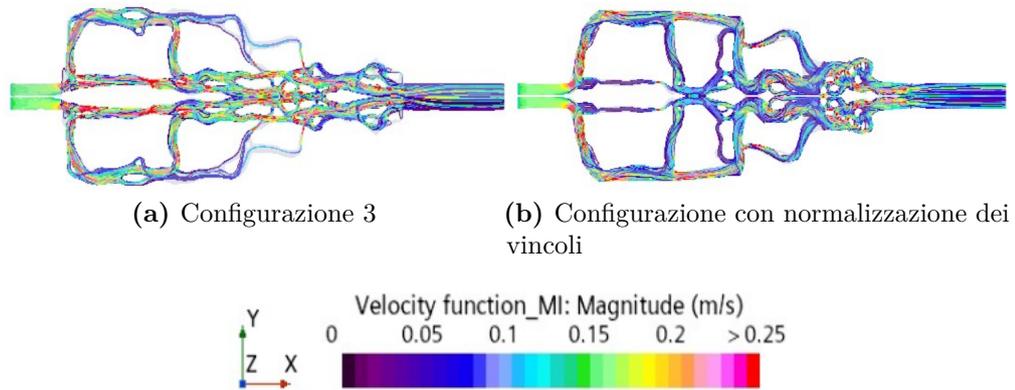


Figura 4.8: Confronto geometria finale

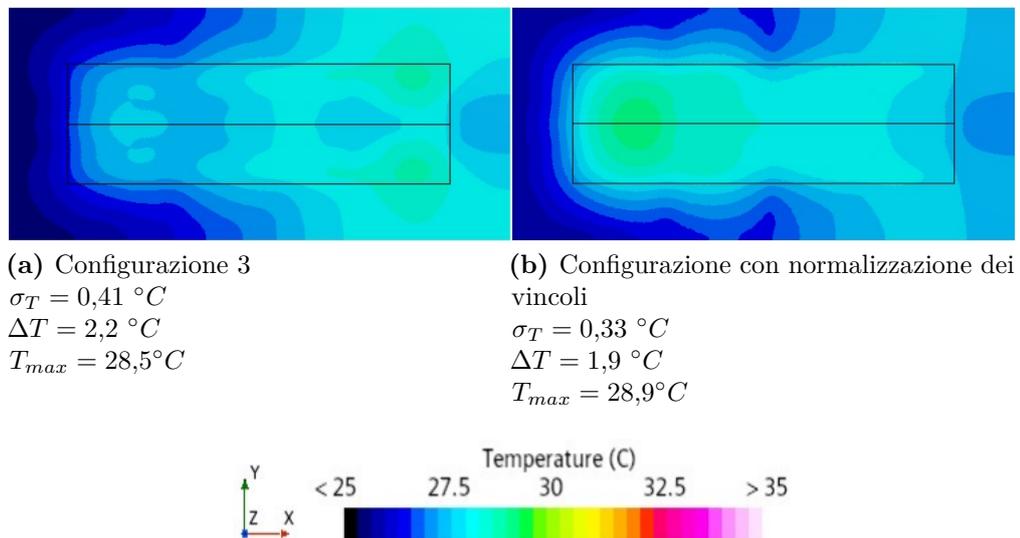


Figura 4.9: Confronto distribuzioni di temperatura sulla superficie delle celle (risultati simulazione di validazione)

4.3 Sensitività al passo di ottimizzazione

Un ulteriore modifica attuata per cercare di stabilizzare l'ottimizzatore è la riduzione del passo di ottimizzazione (**step size**): l'ampiezza del passo determina infatti l'avanzamento temporale nella risoluzione dell'equazione di conservazione (2.18) legata alla variabile ϕ (**level set equation**). Tale modifica viene quindi realizzata per ottenere un andamento più regolare della frazione in volume di solido, nel tentativo di raggiungere una configurazione di ottimo stabile oltre la quale

Grandezza su superficie della cella batteria	Configurazione 3		Normalizzazione dei vincoli	
	Ottimizzazione topologica	Validazione	Ottimizzazione topologica	Validazione
Temperatura media [°C]	27	27,7	27	28
Deviazione standard temperatura [°C]	0,1	0,408	0,07	0,33
Delta di temperatura massimo [°C]	0,8	2,2	0,55	2
Temperatura massima [°C]	27,2	28,5	27,2	28,9

Figura 4.10: Confronto tra scostamento dei parametri (ottimizzazione e validazione) ottenuto con il caso base e la modifica sulla normalizzazione dei vincoli

la distribuzione di materiale non subisca più variazioni. La variazione molto più graduale di SVR potrebbe però determinare una convergenza più lenta, con un maggior numero di passi richiesti a raggiungere l'ottimo.

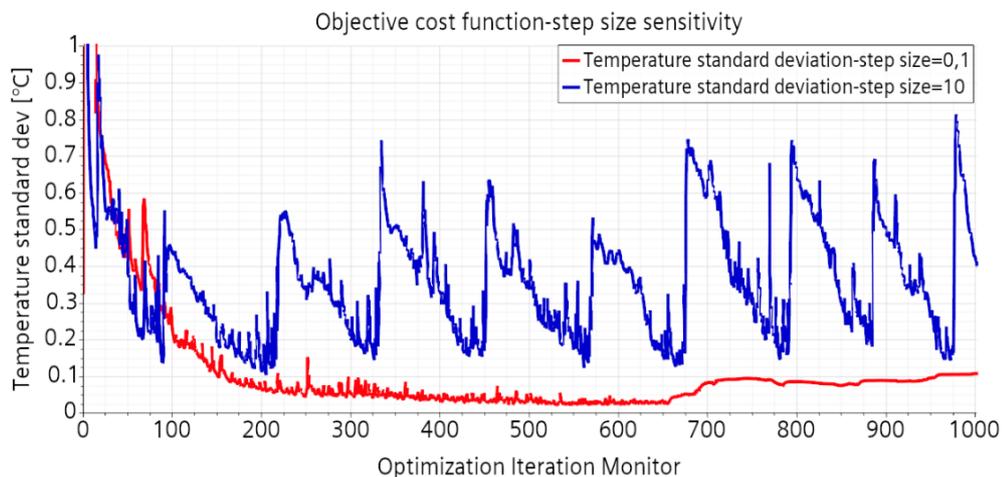
Diverse prove, condotte con una riduzione progressiva dell'ampiezza del passo, vengono realizzate, finché non viene individuato il compromesso ottimale tra impatto della modifica sulla soluzione e numero di passi per la convergenza.

L'andamento dei due parametri (obiettivo e frazione di solido), riportata in figura 4.11, mostra un impatto positivo della modifica, con un andamento di frazione in volume di solido (Fig. 4.11b) molto più stabile ed asintotico.

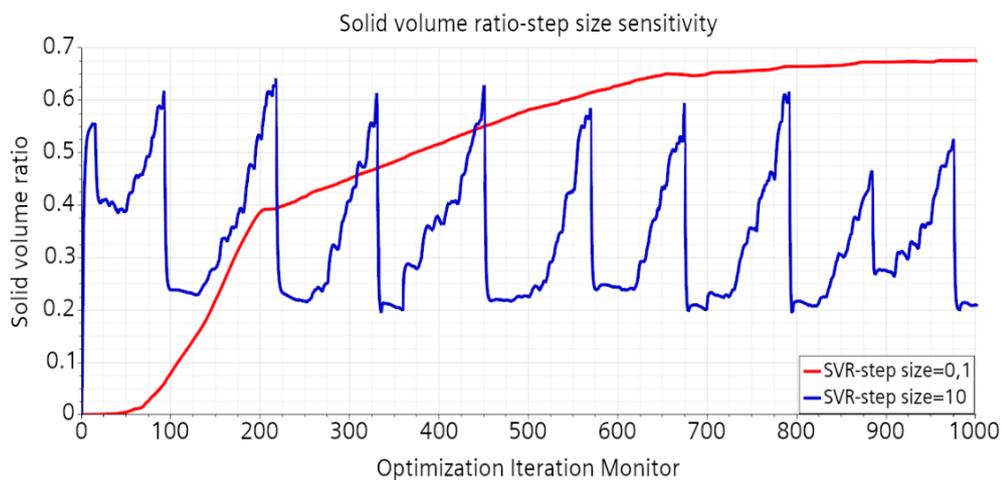
In figura 4.11a si evidenzia la ricaduta positiva del comportamento più stabile dell'ottimizzatore sulla funzione obiettivo: si ha infatti un andamento progressivamente decrescente e privo di grandi oscillazioni, fino al raggiungimento di un valore minimo verso il ciclo 600, dove l'andamento di SVR è ormai quasi piatto. Successivamente, la frazione di solido non diventa completamente piatta, ma inizia una nuova fase di crescita che produce un peggioramento dell'obiettivo.

Questo comportamento può essere spiegato analizzando la figura 4.12: lo scostamento della frazione di solido dal'andamento piatto si verifica per il raggiungimento del vincolo sulla pressione, innescando successivamente un comportamento oscillatorio nell'intorno del valore di soglia su questa grandezza ed un andamento di SVR che non si stabilizza definitivamente.

La geometria ottimizzata (Figura 4.13b) si mostra però molto diversa da quella ottenuta con le impostazioni di calcolo della configurazione base (Figura 4.13a), evidenziando come la modifica aumenti il tempo richiesto per la convergenza finale. I risultati della validazione della simulazione sono presentati in figura 4.14b e figura 4.15.



(a) Funzione obiettivo



(b) Frazione in volume di solido

Figura 4.11: Sensitività al passo di ottimizzazione

La validazione mostra dei risultati migliorativi rispetto al caso di riferimento, anche se si evidenzia uno scostamento maggiore rispetto alle altre simulazioni. La notevole differenza di geometria dimostra che il tempo richiesto per la convergenza, nel caso della modifica del passo, non permette di raggiungere la convergenza piena dopo 1000 cicli di ottimizzazione. Si evidenzia inoltre come la mancanza di stabilità del solutore abbia un effetto sul risultato finale, che dovrebbe essere indipendente dalla scelta del passo di ottimizzazione.

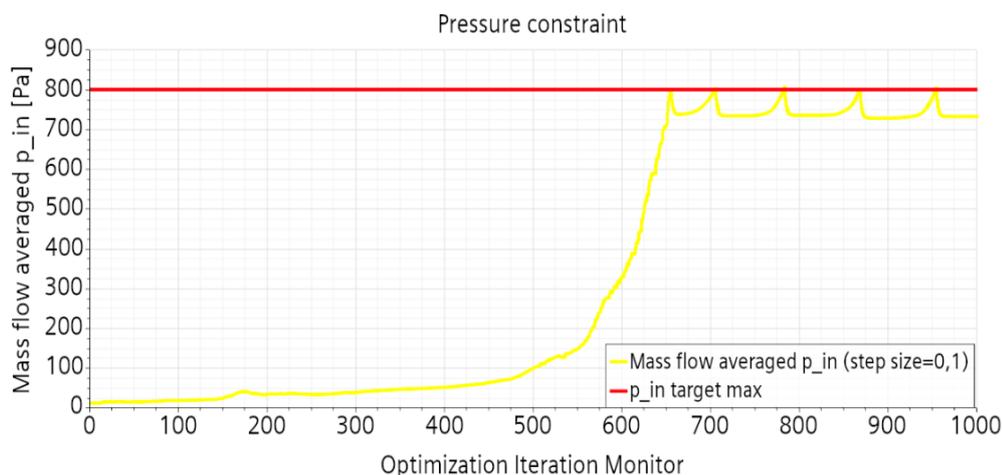


Figura 4.12: Andamento vincolo di pressione con modifica del passo di ottimizzazione

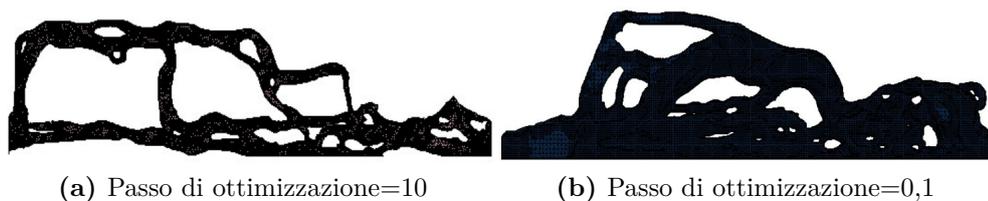


Figura 4.13: Confronto tra geometrie: sensitività al passo di ottimizzazione

Una bilanciata integrazione delle modifiche analizzate (riduzione del passo, vincoli definiti come scostamento relativo, aggressività del penalty factor e modifica dei coefficienti di sotto-rilassamento) permette quindi di migliorare la stabilità del solutore, ma non risolve completamente il problema della convergenza verso un valore finale asintotico di frazione di solido e funzione obiettivo, il cui raggiungimento determini sostanzialmente la fine dell'ottimizzazione.

In definitiva, l'analisi di sensitività ai parametri dell'algorithm, permette di asserire come la causa di questo problema sia da individuarsi nell'interazione tra metodo aggiunto e modello fisico topologico per la determinazione del gradiente della funzione lagrangiana e nel suo effetto sull'equazione (anche se mitigato attraverso i coefficienti di sotto-rilassamento) che determina la distribuzione di materiale ad ogni ciclo di ottimizzazione.

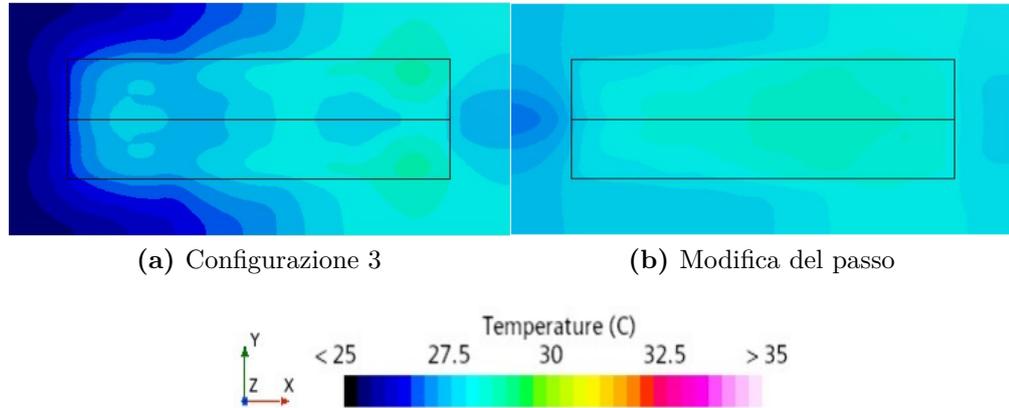


Figura 4.14: Confronto temperatura tra setup base e modifica del passo di ottimizzazione relativamente alle rispettive validazioni

Grandezza su superficie della cella batteria	Configurazione 3		Modifica passo di ottimizzazione	
	Ottimizzazione topologica	Validazione	Ottimizzazione topologica	Validazione
Temperatura media [°C]	27	27,7	27	27,9
Deviazione standard temperatura [°C]	0,1	0,408	0,03	0,31
Delta di temperatura massimo [°C]	0,8	2,2	0,25	1,7
Temperatura massima [°C]	27,2	28,5	27,1	28,2

Figura 4.15: Scostamento dei parametri (ottimizzazione/validazione) con la modifica del passo di ottimizzazione

Capitolo 5

Ottimizzazione della piastra di raffreddamento di un modulo di batteria

In questo capitolo si descrive una l'ottimizzazione di una piastra di raffreddamento rappresentativa di un modulo di 12 celle elettrochimiche, secondo uno schema tipico delle tecnologie realizzate per l'industria degli autoveicoli. Nel dettaglio verranno presentate le impostazioni ed i risultati della simulazione di ottimizzazione del modello realizzato, mettendo a confronto le differenze ottenute a seguito di variazioni delle impostazioni del problema di ottimizzazione. Verranno in seguito presentati i risultati della validazione della geometria della piastra ottimizzata, concludendo con un confronto finale di verifica con una geometria ottimizzata attraverso metodi convenzionali.

Il modello in figura 5.1 richiama le caratteristiche geometriche già discusse nella sezione 2.2 del capitolo 2, alla quale si richiama per un dettaglio relativo ai materiali ed alle condizioni al contorno considerate nel calcolo.

5.1 Impostazioni di simulazione

Diversamente dai modelli realizzati nel capitolo 3, le celle sono ora disposte in direzione ortogonale rispetto all'ingresso del fluido, ed il canale di uscita si trova sulla superficie laterale (inclinazione 90° rispetto all'asse del canale di ingresso del fluido). Questa configurazione non permette quindi di sfruttare l'ipotesi di simmetria rispetto alla direzione longitudinale (piano XZ), come invece fatto con la configurazione 3 nel paragrafo 3.3. Per avere un risparmio sul numero di celle complessivo si sceglie invece di rimuovere lo spessore inferiore di 1mm, come fatto

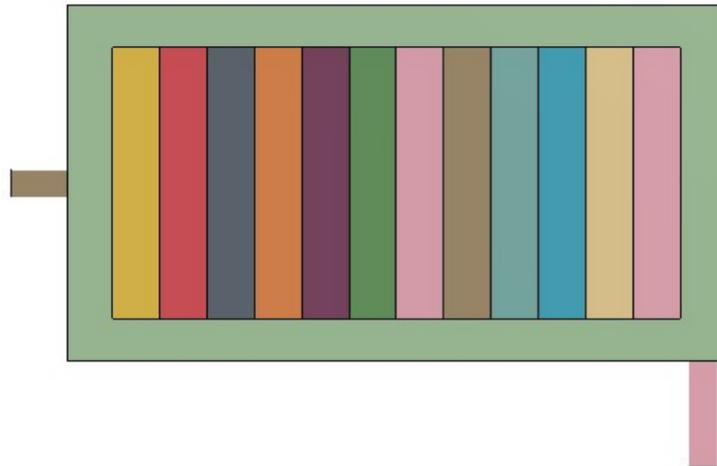


Figura 5.1: Geometria del modello

anche nelle configurazioni 2 e 3 del modello semplificato a 2 celle, imponendo però su questo contorno del volume di ottimizzazione una condizione al contorno di parete adiabatica invece del piano simmetria, allo scopo di aumentare la rappresentatività della condizione imposta.

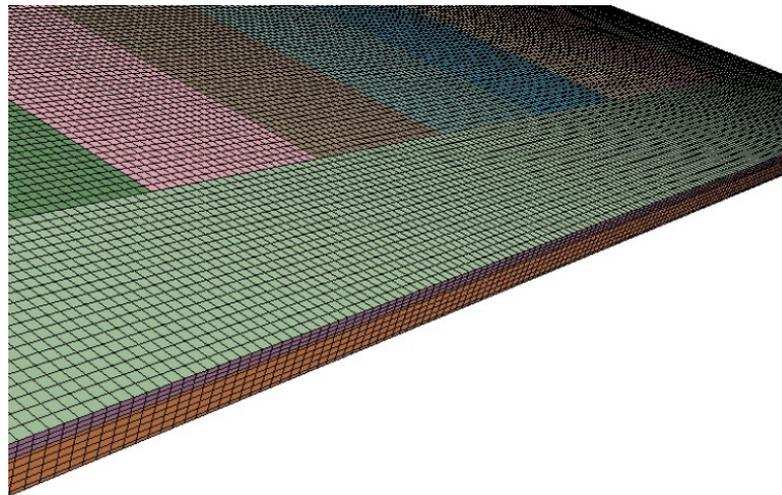


Figura 5.2: Dettaglio della griglia di calcolo

Le impostazioni utilizzate per generare la griglia di calcolo vengono selezionate con lo scopo di ottenere un buon compromesso dei modelli descritti nel capitolo 3. Nel dettaglio è stato fatto uno studio di sensibilità dei risultati alla griglia di calcolo e la tabella riassume le impostazioni utilizzate in tre diversi test. Il test 1 coinvolge una griglia di calcolo con sufficiente risoluzione spaziale ma eccessivo peso

computazionale per un attività di ottimizzazione topologica, dato che il numero di celle del volume di ottimizzazione supera il milione. Il test 2 riporta un primo tentativo di riduzione del numero di celle costituenti la griglia di calcolo, ottenuto portando la dimensione della cella base da 1 mm a 4 mm. I risultati riportati in tabella 5.1 per il test 2, tuttavia, mostrano differenze significative rispetto al test 1 per quanto riguarda la temperatura media delle celle, la massima differenza di temperatura e la massima temperatura delle singole celle. Tali differenze non sono accettabili in un attività di ottimizzazione topologica, in quanto porterebbero realisticamente a individuare una geometria ottimale che in fase di validazione condurrebbe a risultati potenzialmente diversi. Per tale ragione è stato svolto il test 3 nel quale è stato introdotto raffinamento anisotropico lungo la direzione Z, allo scopo di limitare il numero di celle nel piano XY garantendo al contempo la necessaria risoluzione spaziale in direzione normale alla piastra di contatto delle celle batteria. In questo test la dimensione della griglia di calcolo, di cui è fornito un dettaglio in figura 5.2, è pari a 4 mm nel piano XY e 1mm nel piano Z. La tabella 5.1 mostra come tale configurazione della griglia di calcolo permetta l'ottenimento di sole 300'000 celle per il volume di ottimizzazione e garantisca al contempo un errore trascurabile sui livelli di temperatura osservati nella soluzione iniziale, rispetto al test 1 di riferimento.

Grandezza	Test 1	Test 2	Test 3
Dimensione base griglia [mm]	1	4	4/1(asse z)
N.ro celle volume ottimizzazione	1'177'344	64'192	294'366
N.ro di celle piastra	588'672	24072	147'168
$T_{media,celle}$ [°C]	71,3	63	70
$\Delta T_{max,cella_i}$ [°C]	61,8	55,5	61,6
$T_{max,celle}$ [°C]	112,2	97,8	110,5

Tabella 5.1: Sensitivà alle impostazioni della griglia di calcolo

In figura 5.3 si riporta il campo di temperatura della soluzione iniziale ottenuta con le impostazioni della griglia di calcolo richiamate in tabella 5.1: i risultati mostrano delle condizioni operative molto più severe rispetto a quelle ottenute con le geometrie dei modelli rappresentativi della piastra dedicata a due celle batteria. La temperatura raggiunge infatti in alcuni punti valori di circa 110°C, con differenze di temperatura che in alcune celle sono prossime ai 60°C. La deviazione standard sulla superficie complessiva delle celle " $\sigma(T)_{overall}$ " si attesta sui 17°C, determinando con l'ipotesi di distribuzione gaussiana una differenza teorica di temperatura di circa 100°C, ampiamente sovrastimante quella reale di 70°C. La distribuzione di velocità (Fig. 5.4) giustifica la scarsa prestazione termica della configurazione iniziale: il passaggio del fluido avviene solo in una porzione

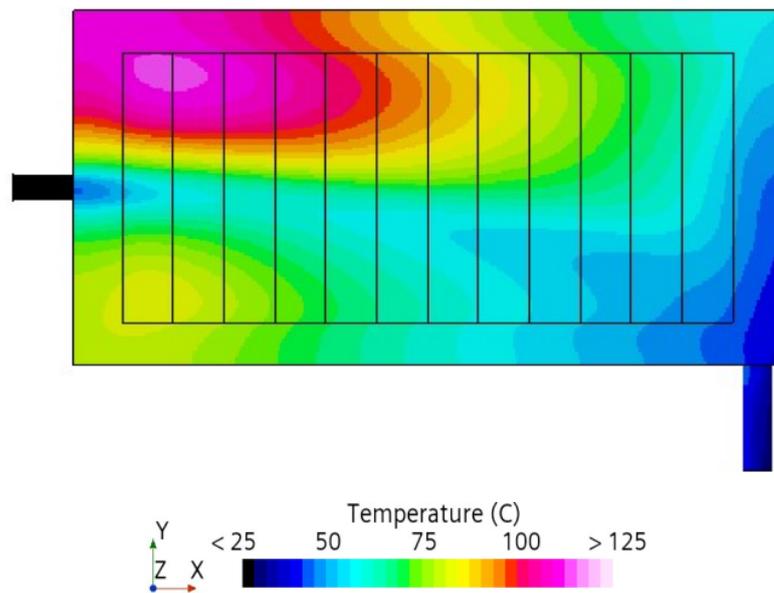


Figura 5.3: Distribuzione di temperatura configurazione iniziale (primal flow)

ristretta della superficie delle celle ed a velocità molto basse, mentre la porzione maggiore del volume è occupato da fluido praticamente fermo con ridotte capacità di asportazione del calore.

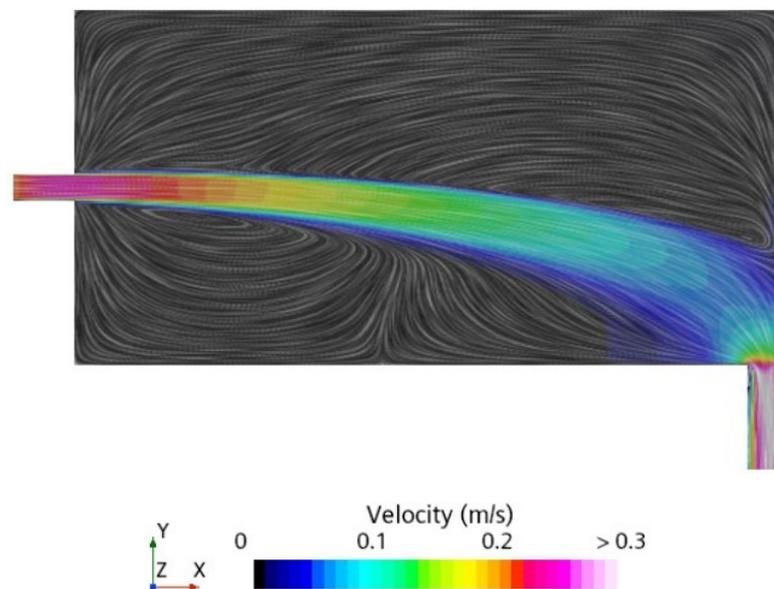


Figura 5.4: Distribuzione di velocità configurazione iniziale (primal flow)

5.2 Simulazione di ottimizzazione della geometria

La definizione del problema, riportata in 5.1, risulta in questo caso molto più complessa: si vuole infatti controllare che, sia per la temperatura media che per la massima differenza di temperatura di ogni cella, sia rispettata una condizione sul massimo valore ammissibile. Potendo definire un solo obiettivo di ottimizzazione, si decide di imporre come funzione da minimizzare la deviazione standard sulla superficie complessiva delle celle, allo scopo di uniformare il più possibile la temperatura su tutta la superficie. La massima temperatura media ammissibile della superficie complessiva e ciascuna delle deviazioni standard delle singole celle vengono invece definite come vincoli di ottimizzazione.

Come temperatura media ammissibile, viene imposto come vincolo di ottimizzazione il valore limite di 40°C , per le deviazioni standard si è inizialmente pensato di utilizzare come vincolo il valore di " $\sigma(T)_{cell}$ " di $1,7^{\circ}\text{C}$, al di sopra del quale la massima differenza di temperatura teorica nella singola cella con l'ipotesi di distribuzione gaussiana, risulterebbe superiore a 10°C . Per garantire un margine conservativo, al fine di tenere conto del degrado della prestazione termica evidenziato dalle simulazioni di validazione del capitolo 3, il valore è stato infine ridotto a $1,5^{\circ}\text{C}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimizza } \sigma(T)_{overall} \\ \text{vincolato a } \left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0 \\ p_{in} \leq 30 \text{ mbar} \\ \sigma(T)_{cell_i} \leq 1,5^{\circ}\text{C per } 1 \leq i \leq 12 \\ T_{avg,overall} \leq 40^{\circ}\text{C} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (5.1)$$

L'andamento della frazione in volume di solido durante tutta la simulazione di ottimizzazione è presentato in figura 5.5: durante la prima parte dell'ottimizzazione (cicli 1-200) il volume di solido all'interno del dominio raggiunge percentuali del 60% del volume complessivo, compatibili con quanto visto per i modelli con 2 celle di batteria. Durante queste fasi si manifesta il comportamento delle variabili di ottimizzazione già descritto nel capitolo 4: incremento di pressione fino all'intorno del valore di soglia e decremento di tutte le grandezze termiche. In particolare il ciclo 160 risulta quello ottimale, permettendo di contenere le deviazioni standard di tutte le celle nell'intervallo $0,2-1^{\circ}\text{C}$ (Fig. 5.7) e le temperature medie comprese tra 26 e $33,5^{\circ}\text{C}$ (Fig. 5.8). Al di sotto del ciclo di ottimizzazione 100 infatti, nonostante la funzione obiettivo in figura 5.6 raggiunga valori inferiori ai 2°C non raggiunti al ciclo 160, è possibile evidenziare con la figura 5.11a un'interruzione delle principali linee di flusso per la presenza di molte celle ancora ibride, come discusso nel paragrafo 3.1 relativamente alla figura 3.3.

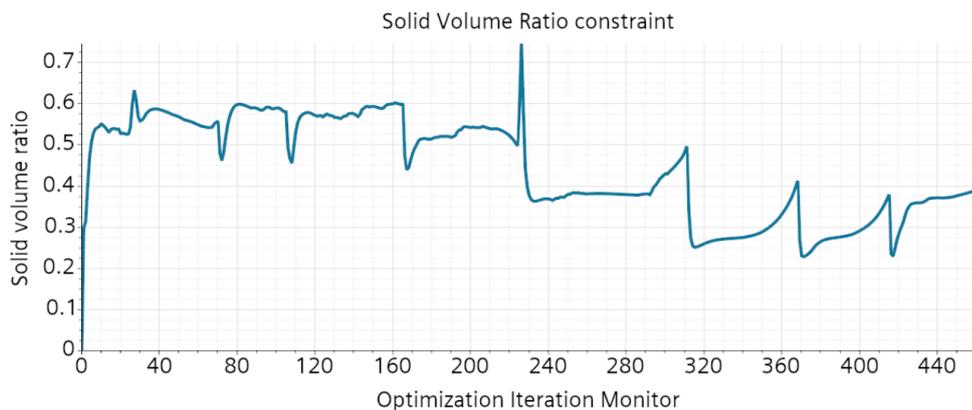


Figura 5.5: Andamento della frazione in volume di solido

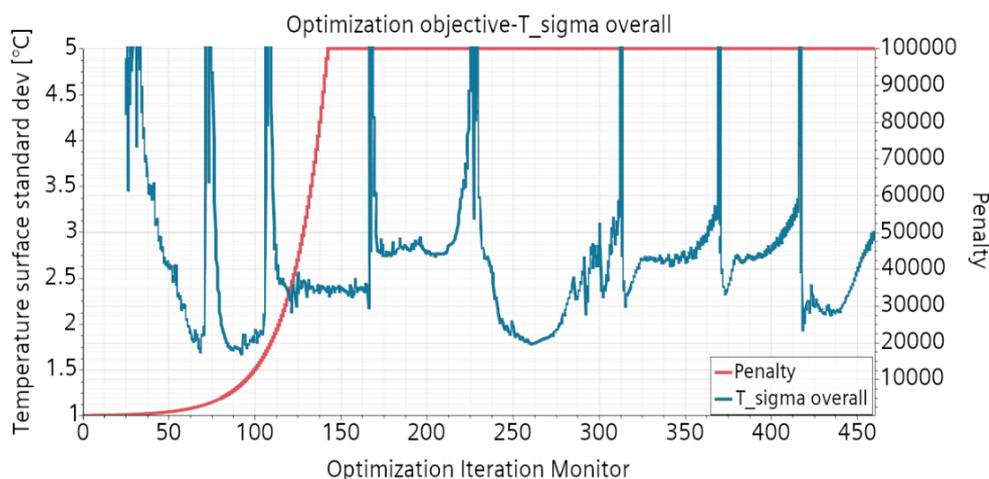


Figura 5.6: Andamento della funzione obiettivo

Nella seconda parte della simulazione (cicli 200-300) si assiste invece ad un comportamento diverso, con un generale decremento del quantitativo di solido intorno a valori del 40%. La configurazione ottimale viene raggiunta in questa fase nell'intorno del ciclo di ottimizzazione 260.

Questa configurazione è caratterizzata da un incremento di pressione molto meno accentuato (5 mbar contro i circa 30 della configurazione al ciclo 160) garantendo nel complesso una migliore prestazione termica.

La distribuzione di temperatura e le temperature medie delle celle hanno infatti valori molto vicini alla condizione ottimale della fase precedente. L'intervallo di deviazione standard (0,2-1,4°C), visibile in figura 5.7 è superiore al precedente ma risulta comunque essere all'interno della soglia prevista di 1,5°C. Le differenze di

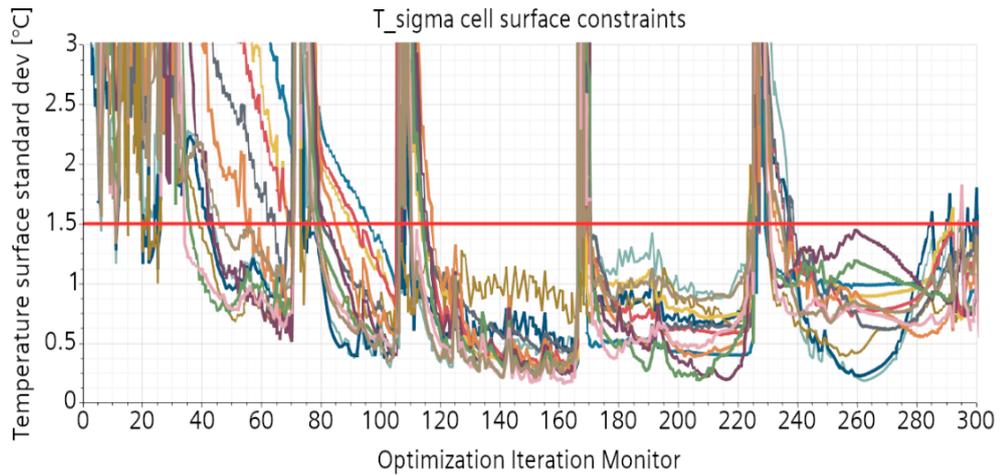


Figura 5.7: Andamento dei vincoli di deviazione standard della temperatura sulla superficie di ogni cella: la linea in rosso evidenzia il massimo valore ammissibile di 1,5°C

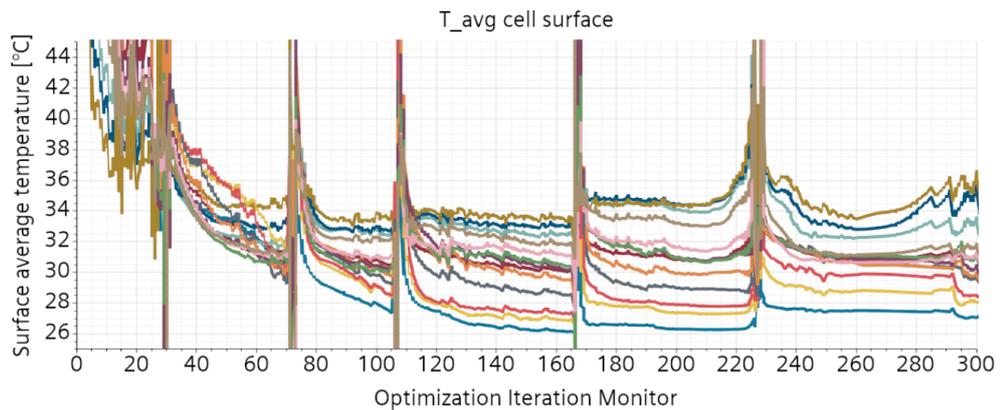


Figura 5.8: Andamento della temperatura media superficiale di ogni cella

intervallo di temperature medie sono poco significative, garantendo in questo caso una variazione tra 27-33,5°C (Fig. 5.8). La temperatura media della superficie complessiva, evidenziata in figura 5.9, risulta superiore di circa 1°C, ma la riduzione della funzione obiettivo permette di limitare di circa 2°C i picchi di temperatura delle celle (Fig. 5.12).

Dove questa configurazione risulta ottimale è nella minimizzazione della deviazione standard di tutta la superficie delle celle, cioè la funzione obiettivo (Fig. 5.6), decrescendo da 2,4°C del ciclo 160 fino al valore ottimale raggiunto di 1,8°C.

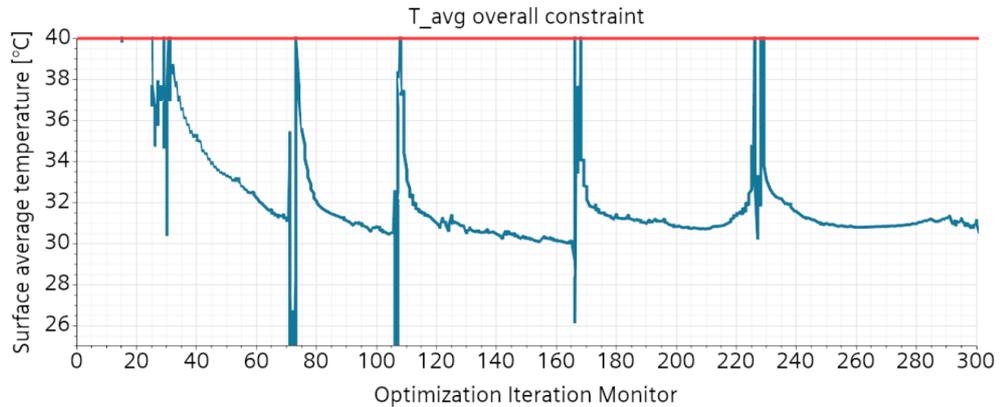


Figura 5.9: Andamento del vincolo di temperatura media sulla superficie complessiva delle 12 celle: in rosso il valore massimo ammissibile

La geometria del ciclo 260 risulta quella ottimale anche perchè permette di ridurre le perdite di energia necessarie a fornire alla pompa di alimentazione la potenza necessaria per garantire la circolazione del fluido di lavoro.

L'ultima parte della simulazione (oltre il ciclo 300) non risulta invece d'interesse in quanto si assiste ad elevati e sempre maggiori squilibri nel bilancio di portata tra ingresso ed uscita (Fig. 5.10), ad indicare una scarsa convergenza della soluzione e risultati quindi poco affidabili.

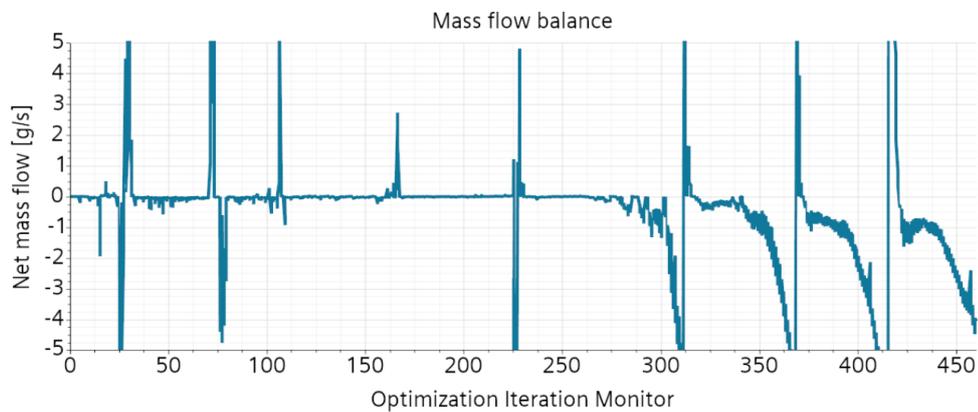


Figura 5.10: Andamento del bilancio di portata tra condotti di ingresso ed uscita

In figura 5.11 si evidenzia la progressione delle linee di flusso durante i cicli di ottimizzazione: il ciclo 160 presenta velocità mediamente più elevate, come conferma la più elevata differenza di pressione, ma la configurazione ottimale del ciclo 260

è caratterizzata da una complessa ramificazione dei condotti, il che permette di ottimizzare al meglio la distribuzione di temperatura su tutta la superficie delle celle.

Il confronto tra le distribuzioni di temperatura dei due cicli di ottimizzazione è osservabile in figura 5.12: l'uniformità di temperatura sulla superficie complessiva delle celle è decisamente migliorata nel caso del ciclo 260, garantendo oltre al corretto intervallo di temperature della singola cella anche una variazione di temperatura ridotta tra le diverse celle ed una temperatura massima inferiore di 2°C. Si

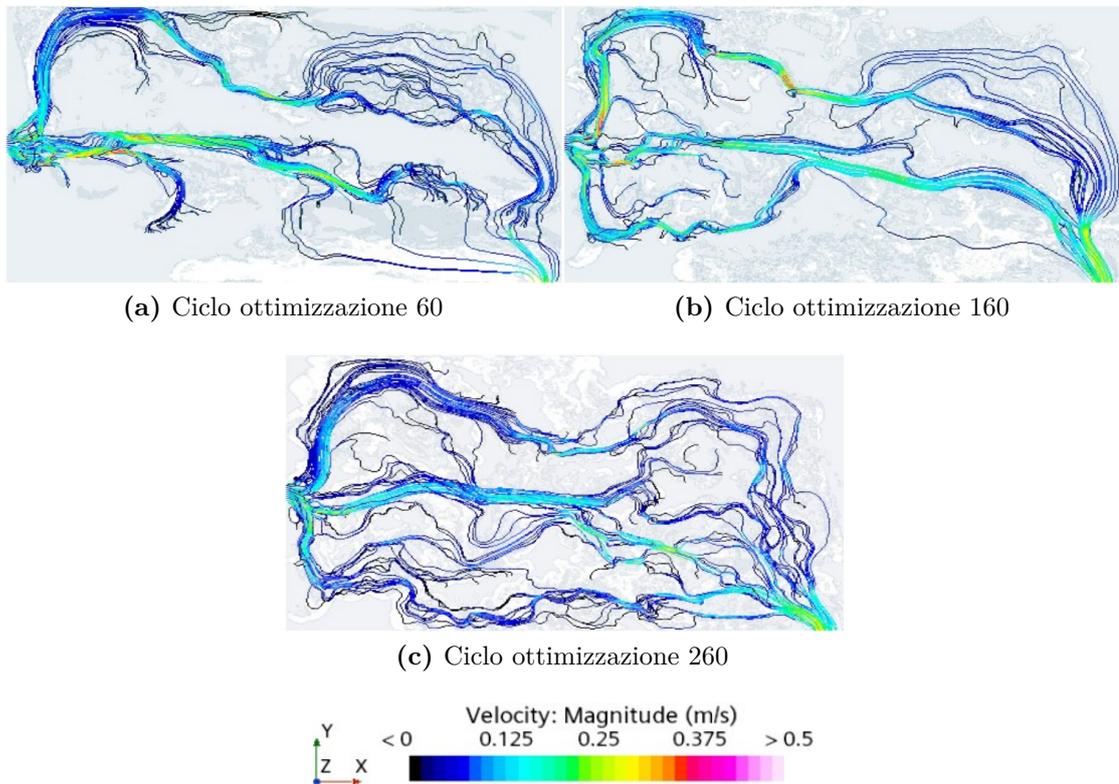


Figura 5.11: Progressione delle linee di flusso

nota inoltre come la geometria più ramificata migliori notevolmente le prestazioni nella zona terminale della piastra, dove, rispetto al ciclo di ottimizzazione 160, le temperature sono più basse e la distribuzione di temperatura è decisamente più uniforme. Dalla figura 5.13 si può osservare come il fluido, oltre a coprire una superficie maggiore in questa zona, riesce a raggiungerla con temperature leggermente più basse in alcune delle ramificazioni, potendo quindi asportare un quantitativo maggiore di calore a parità di temperatura raggiunta nella sezione di uscita.

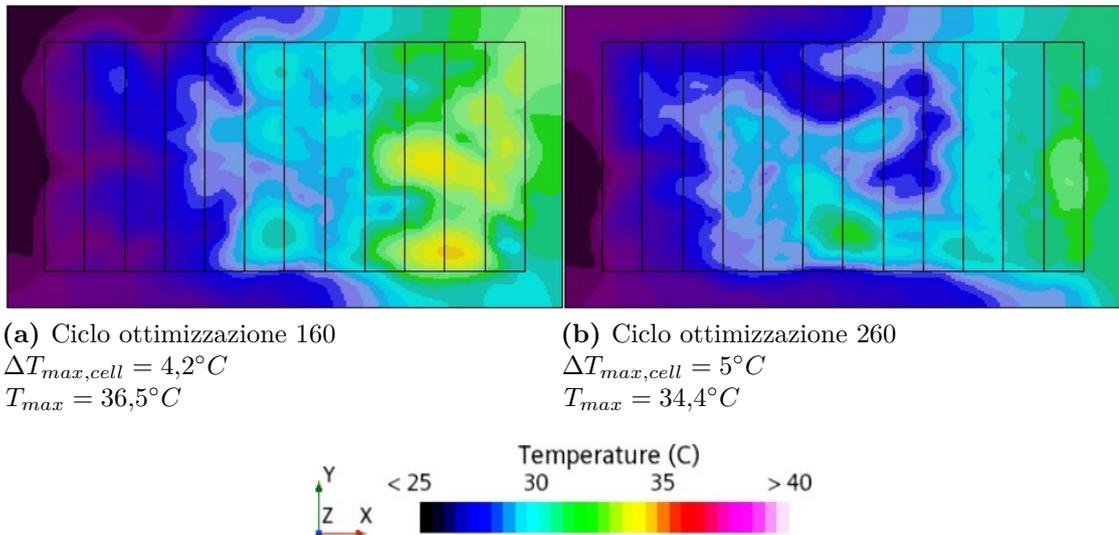


Figura 5.12: Campo di temperatura geometria ottimizzata

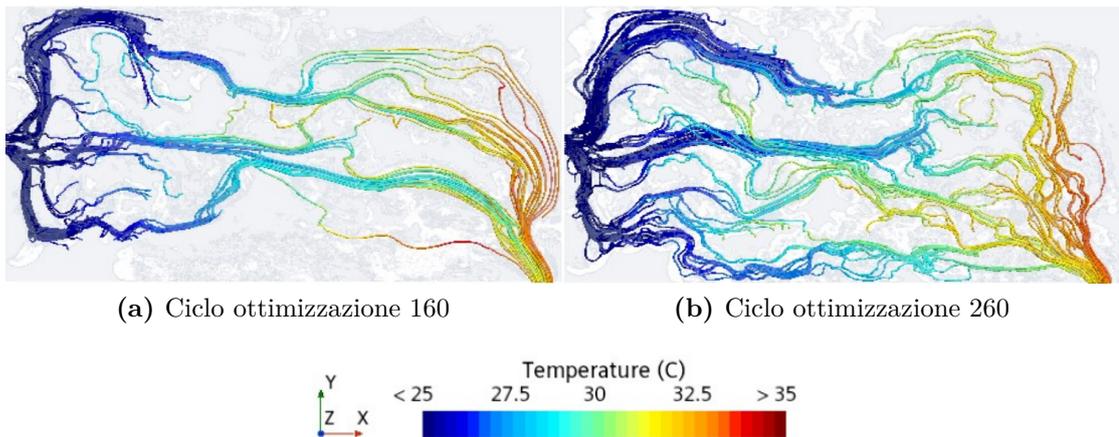


Figura 5.13: Evoluzione temperatura del fluido lungo i condotti

5.2.1 Confronto con differenti impostazioni del problema di ottimizzazione

Per valutare eventuali miglioramenti delle prestazioni della piastra di raffreddamento si decide di testare le potenzialità dell'ottimizzazione topologica applicando un vincolo più restrittivo nella definizione del problema di ottimizzazione.

Con la simulazione descritta al paragrafo 5.2 si è individuato un intervallo delle

temperature medie delle singole celle compreso tra 27°C e $33,5^{\circ}\text{C}$ ed una temperatura media su tutte le celle di $30,8^{\circ}\text{C}$, inferiore di circa 10°C al valore massimo ammissibile (40°C). Visto l'ampio margine sulla temperatura media complessiva, si decide proprio di agire su questo vincolo, riducendo il valore massimo ammissibile a 30°C . Le altre impostazioni del problema di ottimizzazione topologica rimangono invece inalterate. Con questa sola modifica del problema topologico si assiste ad un netto cambiamento nel comportamento dell'ottimizzatore. Coerentemente con quanto ci si aspetta, si ha un incremento notevole del solido all'interno del volume fino a frazioni dell'80%, come mostrato in figura 5.14: la maggior presenza di solido produce infatti sia un aumento del trasferimento di calore delle celle sia per conduzione con il solido della piastra, che per convezione con il fluido che dovrebbe circolare con velocità mediamente più elevate. In questo modo si massimizza l'asportazione di calore necessaria a ridurre la temperatura. Il risultato

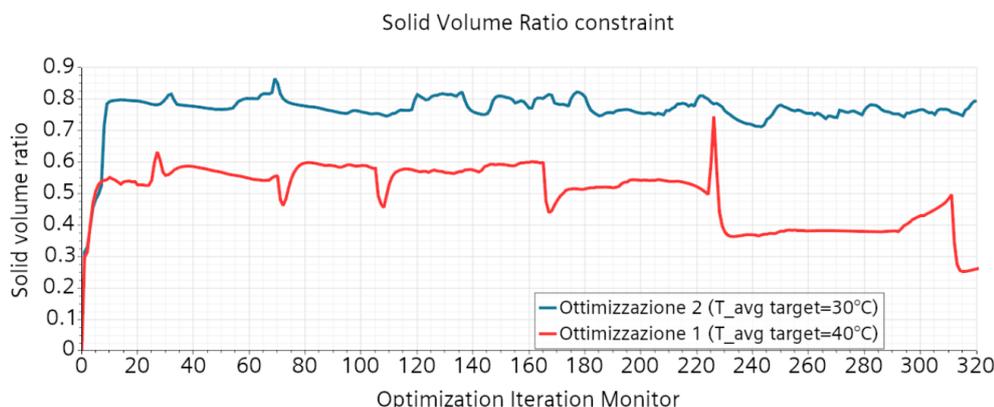


Figura 5.14: Andamento della frazione in volume di solido: ottimizzazione 2

della simulazione, tuttavia, è notevolmente peggiorativo per tutte le variabili di ottimizzazione.

La funzione obiettivo non riesce ad avvicinarsi al minimo raggiunto con la precedente ottimizzazione, mantenendosi sempre nell'intorno dei 10°C (Fig. 5.15). Nessuna delle deviazioni standard di temperatura delle celle riesce ad avvicinarsi al valore di soglia di $1,5^{\circ}\text{C}$, come mostrano i valori nettamente superiori della figura 5.16. L'aspetto più interessante è relativo al risultato ottenuto per la temperatura media: non solo infatti l'obiettivo di 30°C non viene raggiunto, ma la temperatura media risulta essere molto superiore rispetto alla simulazione di riferimento (Fig. 5.17).

Il grafico di figura 5.19 fornisce un'indicazione del perché avvenga il peggioramento descritto: con l'impostazione adottata, l'ottimizzazione topologica non riesce a produrre una geometria ramificata, mostrando anche un ridotto aumento di velocità del fluido. A queste problematiche si aggiunge anche quella di convergenza delle

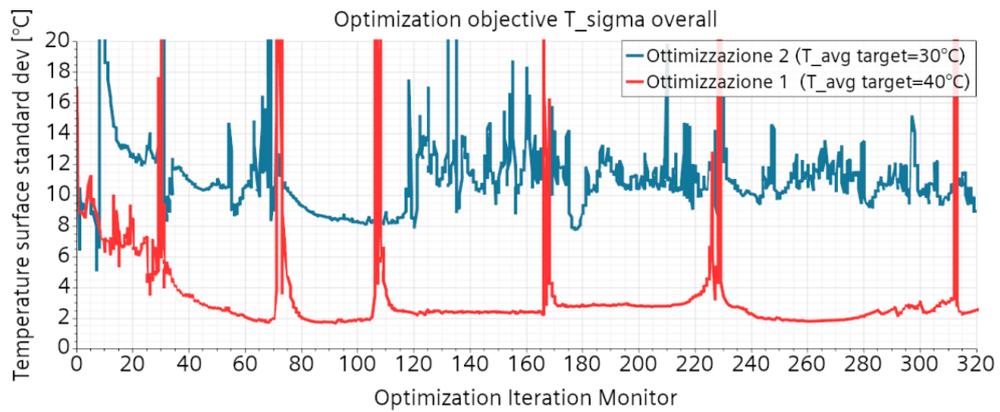


Figura 5.15: Andamento della funzione obiettivo: ottimizzazione 2

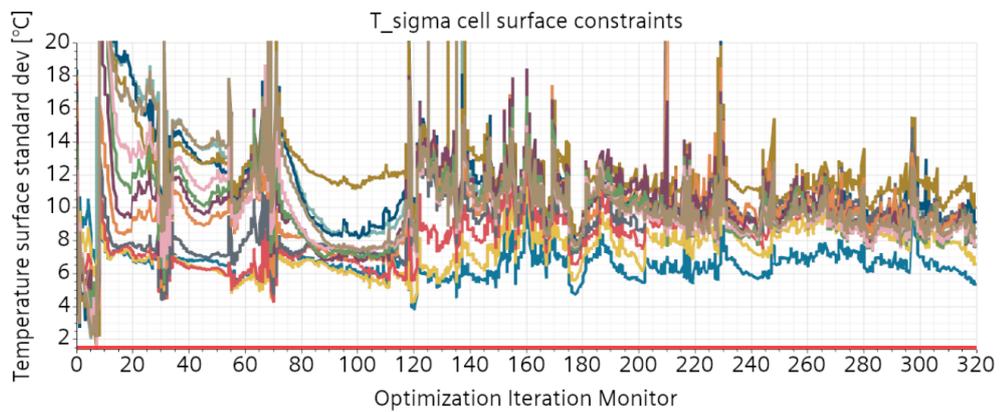


Figura 5.16: Andamento dei vincoli di deviazione standard della temperatura delle singole celle: ottimizzazione 2 (in rosso il valore limite ammissibile di 1,5°C)

grandezze di bilancio (fluidodinamico e termico) che mostrano ulteriori limiti del solutore con queste impostazioni di calcolo. Un'ulteriore prova è stata condotta aumentando la soglia a 35°C, ma anche in questo caso i risultati sono di molto peggiorativi e tutte le problematiche evidenziate permangono. Per brevità non sono stati inseriti grafici relativi alla simulazione descritta in quanto non aggiungono informazioni significative rispetto a quanto già introdotto.

Come ultima verifica si decide di modificare nuovamente l'impostazione del problema topologico: questa volta si sceglie di cambiare proprio la funzione obiettivo, eliminando la deviazione standard della temperatura $\sigma(T)_{overall}$ dalle variabili di ottimizzazione. Come nuova funzione obiettivo viene selezionata la temperatura

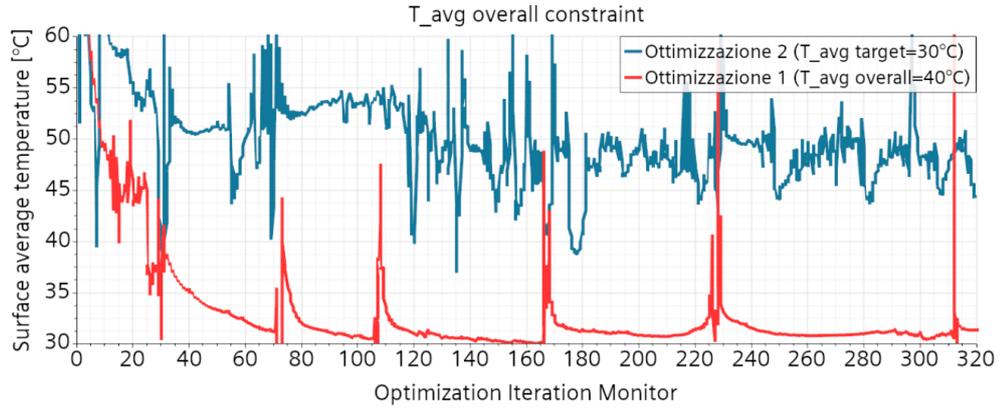


Figura 5.17: Andamento del vincolo di temperatura media sulla superficie complessiva delle 12 celle: ottimizzazione 2

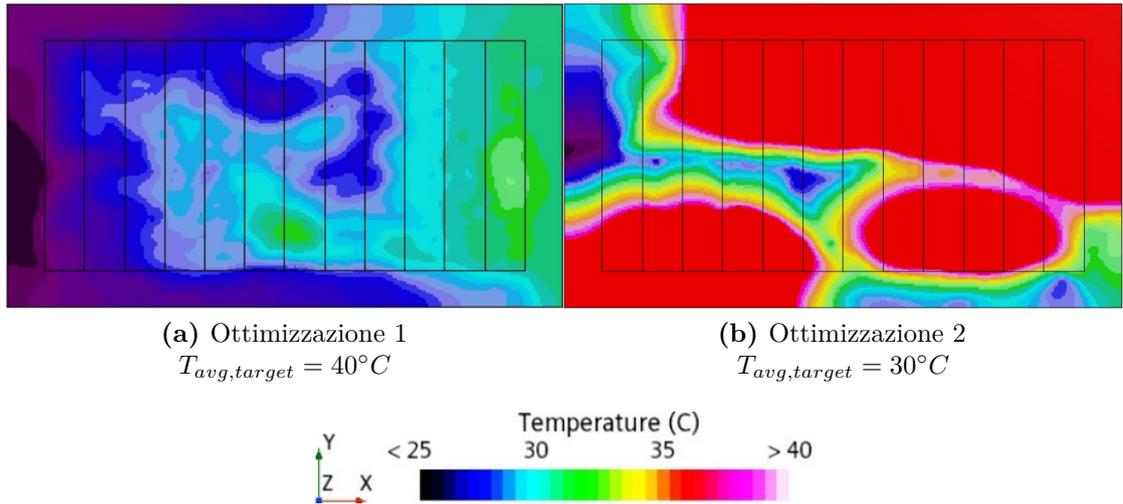


Figura 5.18: Campo di temperatura risultante dal processo di ottimizzazione con diversi valori di soglia del vincolo di temperatura media

media sulla superficie complessiva delle celle " $T_{avg,overall}$ ", mantenendo i vincoli non citati alle medesime impostazioni, riassunte in 5.2

$$\begin{cases} \text{minimizza } T_{avg,overall} \\ \text{vincolato a } \begin{cases} \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0 \\ p_{in} \leq 30 \text{ mbar} \\ \sigma(T)_{cell_i} \leq 1,5^\circ C \text{ per } 1 \leq i \leq 12 \end{cases} \end{cases} \quad (5.2)$$

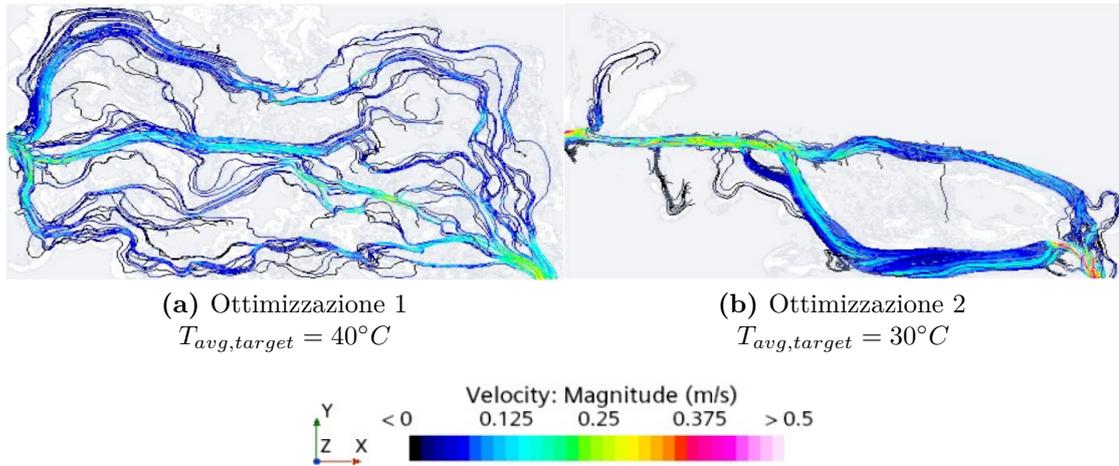


Figura 5.19: Confronto distribuzione delle linee di flusso con diversi valori di soglia del vincolo di temperatura media

L'andamento della nuova funzione obiettivo è riportato in figura 5.20: anche in questo caso tutte le temperature medie (complessiva e sulla singola cella) risultano superiori al caso di riferimento (ottimizzazione 1).

Le deviazioni standard di temperatura sono anch'esse tutte in peggioramento ed in alcuni casi il vincolo non risulta soddisfatto, come visibile dalla figura 5.21. Il degrado di prestazione risulta chiaro dall'osservazione di figura 5.22 dove si riporta un confronto della distribuzione di temperatura con il caso di riferimento. Si evidenziano infine in figura 5.23 le differenti geometrie ottenute.

In sintesi i risultati mostrano un miglioramento della prestazione termica rispetto a quanto ottenuto variando la temperatura media di soglia durante l'ottimizzazione, tuttavia confermano come le impostazioni del problema di ottimizzazione che permettono di ottenere la geometria più prestazionale siano quelle relative alla prima simulazione presentata in questo capitolo.

5.3 Validazione della geometria ottimizzata

La stessa procedura descritta nel capitolo 3 è stata adottata per la validazione della geometria ottimizzata. Nel dettaglio il volume di fluido (Fig. 5.24) è stato estratto utilizzando sempre il criterio di velocità e seguendo la stessa procedura descritta nella sezione 3.1.1.

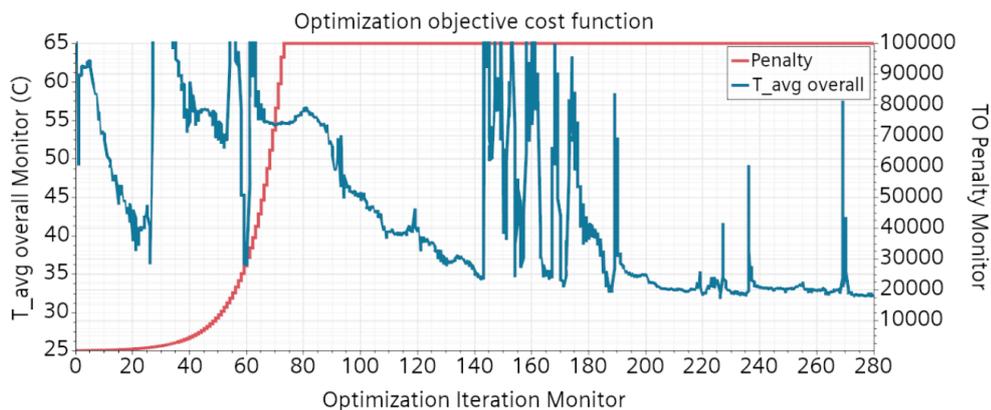


Figura 5.20: Andamento della funzione obiettivo: ottimizzazione 3

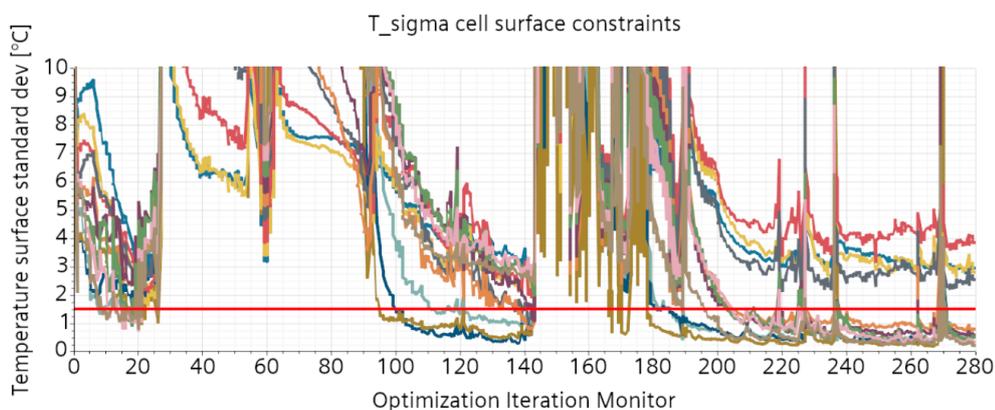


Figura 5.21: Andamento dei vincoli di deviazione standard della temperatura delle singole celle: ottimizzazione 3

Per la generazione della griglia di calcolo vengono utilizzati i poliedri, usufruendo dei prismi (thin mesher) per le parti solide sottili.

Gli strati di prismi a parete utilizzati sono 15 e la struttura viene caratterizzata definendo lo spessore complessivo dei 15 strati (1mm) e lo spessore del primo strato che garantisca un $y^+ < 5$, ottenendo il risultato riportato in figura 5.25. Sempre dalla stessa figura è possibile notare gli strati prismatici delle parti solide sottili e la griglia poliedrica dedicata alla descrizione del fluido al centro del dominio. La tabella 5.2 fornisce infine indicazioni sulla dimensione complessiva del dominio di calcolo.

La distribuzione di temperatura risultante dalla simulazione di validazione viene

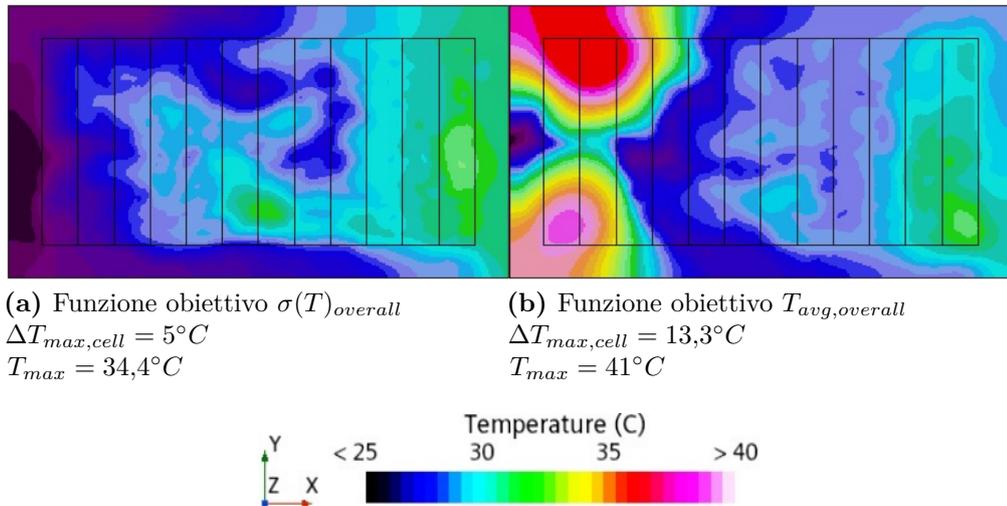


Figura 5.22: Confronto distribuzioni di temperatura con diverse funzioni obiettivo

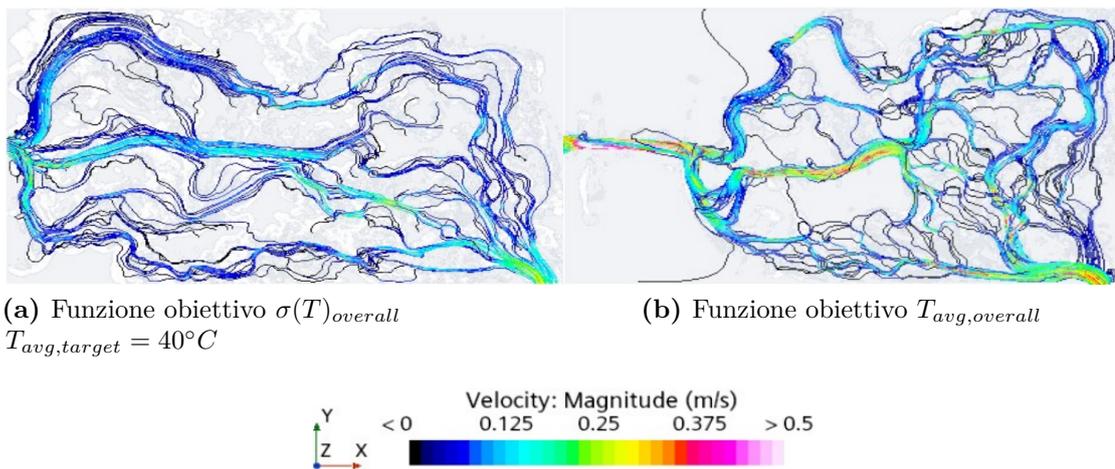


Figura 5.23: Confronto distribuzione delle linee di flusso con diverse funzioni obiettivo

confrontata con quella prevista dall'ottimizzazione topologica in figura 5.26. Come previsto, si ha un moderato degrado di prestazione, soprattutto in termini di aumento di temperatura rispetto a quella valutata durante la simulazione di ottimizzazione. La figura 5.27 riporta gli scostamenti delle grandezze tra il risultato della simulazione di ottimizzazione e la validazione, evidenziando anche i miglioramenti rispetto alla soluzione iniziale (primal flow) del modello. Le grandezze fluidodinamiche mostrano tutte degli evidenti scostamenti: nel caso della simulazione di validazione la velocità

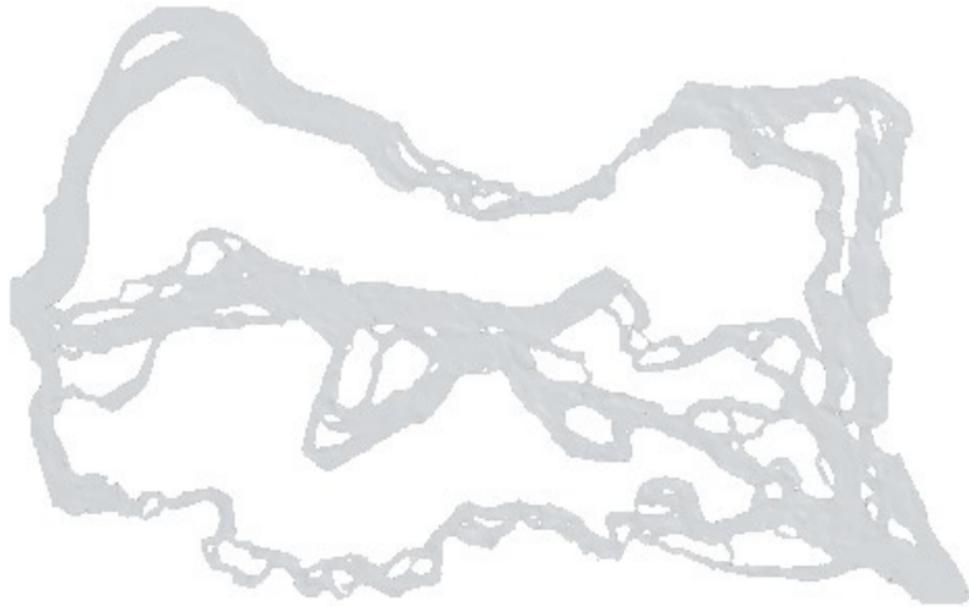


Figura 5.24: Geometria dei condotti: piastra di raffreddamento ottimizzata

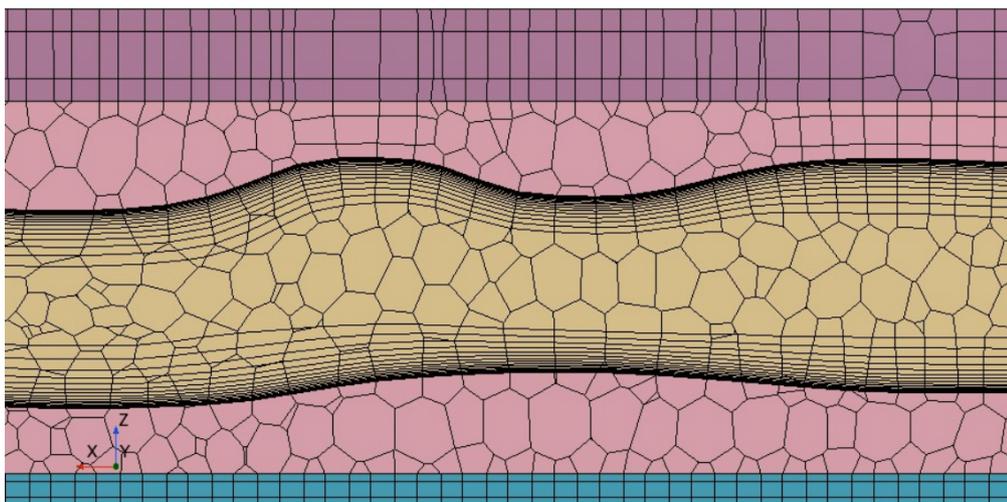


Figura 5.25: Sezione della griglia di calcolo con dettaglio degli strati di prismi a parete: in azzurro ed in viola le due piastre a chiusura del volume di ottimizzazione, in rosa il volume solido all'interno del volume di ottimizzazione ed in marrone il volume fluido.

del fluido risulta superiore rispetto a quella stimata dall'ottimizzazione a causa del minore volume di fluido. Il raggiungimento di pressioni molto simili tra i due

Regione	N.ro celle
Fluido	6'037'219
Canale ingresso	19'218
Canale d'uscita	29'852
Piastra	4'237'741
Prismi a parete	4'656'168
Totale	14'931'128

Tabella 5.2: Numero di celle per regione.

casi non risulta in accordo con la differenza di velocità, ma può essere giustificata considerando che il processo di ottimizzazione topologica considera il solido come un mezzo poroso e non come un materiale completamente bloccante il flusso. Le grandezze termiche confermano maggiormente i risultati previsti dall'ottimizzazione topologica, evidenziando tuttavia un peggioramento della deviazione standard e quindi una differenza di temperatura massima sulla superficie della cella di circa 2°C , mentre la massima temperatura media tra le celle risulta di quasi 37°C scostandosi di circa $3,5^{\circ}\text{C}$. Di 4°C risulta infine la variazione sul massimo picco di temperatura all'interno della superficie delle 12 celle.

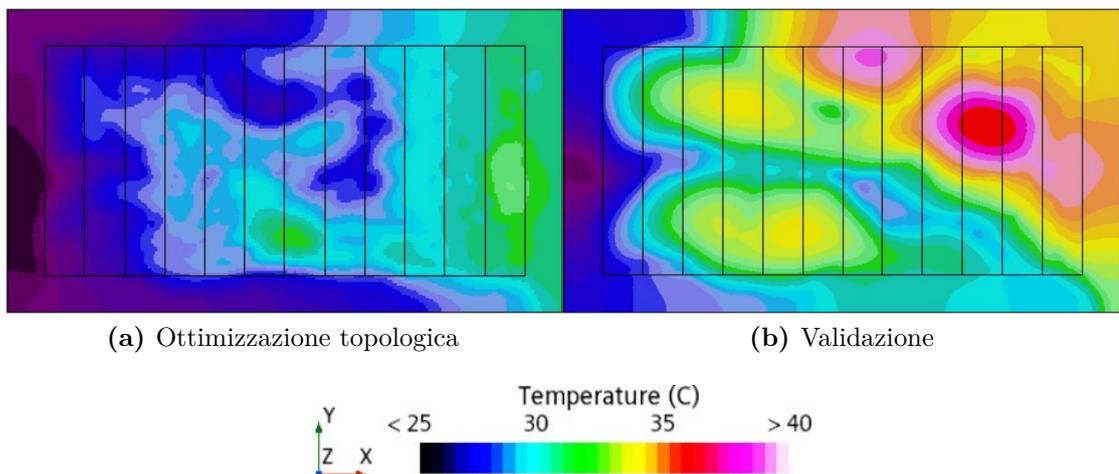


Figura 5.26: Validazione ottimizzazione: distribuzione di temperatura sulla superficie delle celle

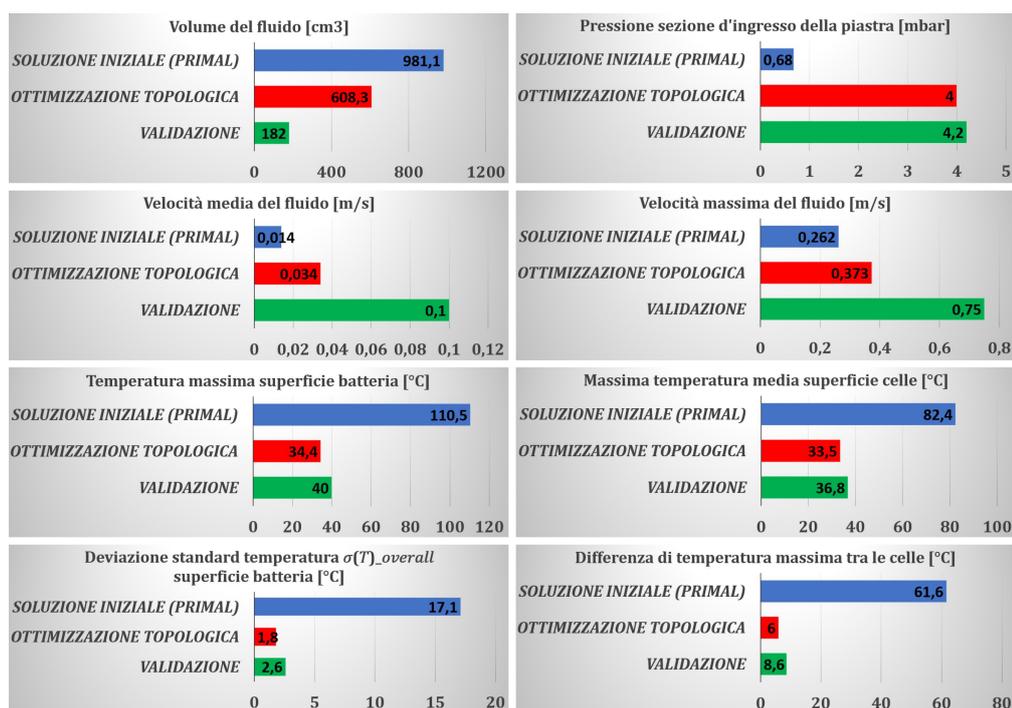


Figura 5.27: Confronto tra soluzione iniziale, ottimizzazione topologica e validazione per i parametri termici e fluidodinamici

5.3.1 Creazione di una geometria alternativa per la produzione tramite stampaggio

La metodologia di estrusione dei contorni, utilizzata nella sezione 3.3.1 per ricondurre la geometria dei condotti ad un disegno realizzabile nei circuiti stampati della figura 1.2, risulta in questo caso irrealizzabile vista la complessità delle forme in figura 5.24.

L'unica strada alternativa per testare l'ottimizzazione topologica in questo contesto risulta quindi la modellazione manuale della geometria dei canali, ispirata alle forme ottenute dall'ottimizzazione. In figura 5.28 viene mostrato lo schizzo realizzato a tale scopo in ambiente di modellazione CAD. Le larghezze dei condotti vengono stimate valutando la suddivisione delle portate tra i diversi rami ed imponendo la stessa velocità media con un'altezza dei canali pari alla dimensione iniziale della quota nel volume di ottimizzazione (5mm). L'altezza dei condotti viene successivamente calibrata per avvicinare le prestazioni alla geometria ricavata dall'ottimizzazione topologica.

Vengono effettuate delle prove con diverse altezze di estrusioni pari a 5mm, 2,5mm ed 1,5mm, ottenendo i risultati migliori con quest'ultima configurazione geometrica. Con queste caratteristiche geometriche il diametro idraulico risulta superiore alla condizione critica di transizione a moto turbolento: per confrontare le simulazione a parità di condizioni si mantiene l'ipotesi di moto laminare anche per questa simulazione, accettando la sovrastima del reale campo di temperatura ottenuto. La distribuzione di temperatura e l'evoluzione di temperatura del fluido risultanti dalla simulazione sono rispettivamente in figura 5.29 e 5.30. Si evidenzia un aumento dell'estensione delle zone superficiali a temperatura superiore ai 35°C, con conseguente aumento di circa 2°C della massima temperatura media registrata tra le diverse celle e della temperatura media sull'intera superficie. La deviazione standard di temperatura sulla superficie complessiva non manifesta invece un degrado di prestazione, permettendo di ottenere un peggioramento di soli 0,2°C sulla massima differenza di temperatura della singola cella. Le distribuzioni di fig 5.29 possono essere inoltre utilizzate per ottimizzare ulteriormente la geometria, aumentandone la ramificazione nei punti critici evidenziati. Il confronto delle diverse variabili di ottimizzazione con la geometria risultante dall'ottimizzazione topologica è invece presentato nel successivo paragrafo 5.3.2 in figura 5.33.

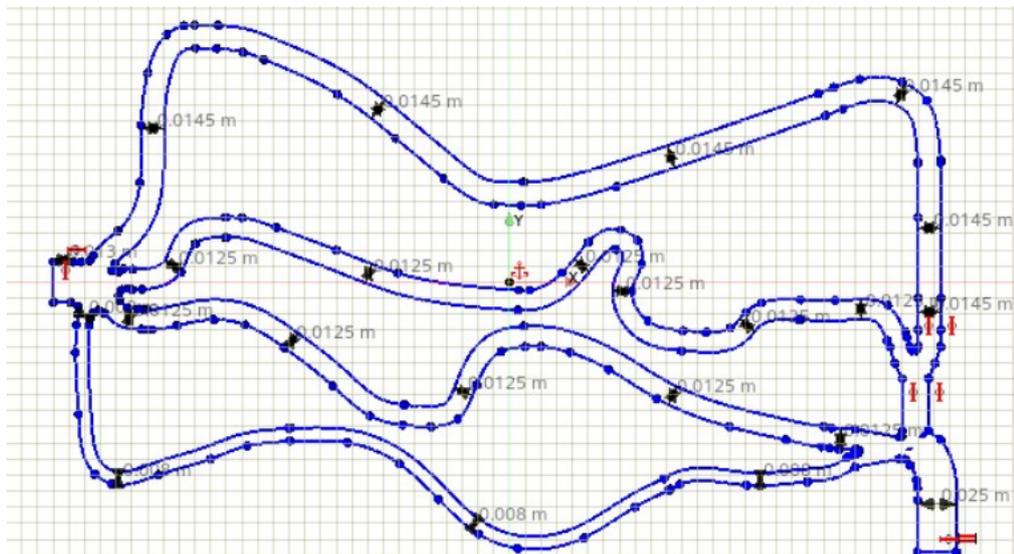


Figura 5.28: Modellazione della geometria ottimizzata per produzione mediante stampaggio

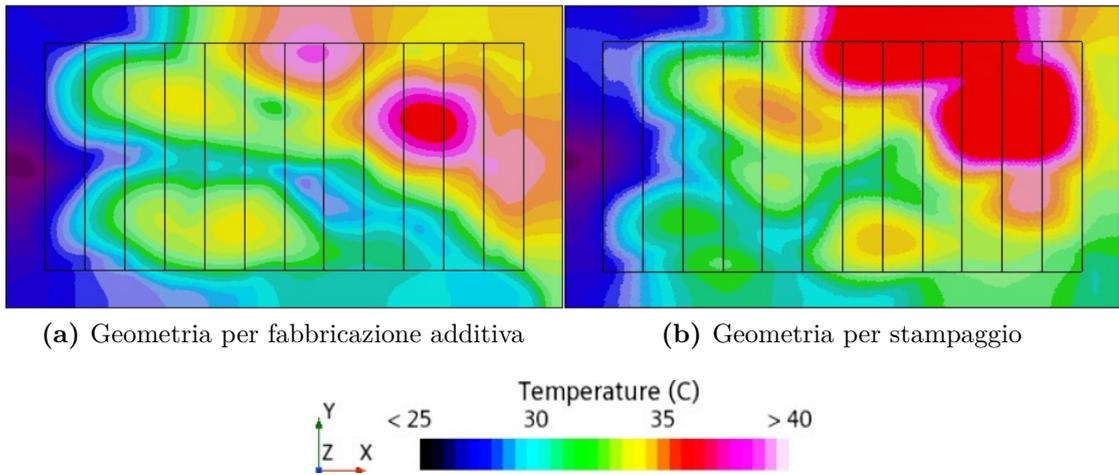


Figura 5.29: Validazione ottimizzazione: confronto distribuzione di temperatura tra geometria ottimizzata e geometria alternativa (stampaggio)

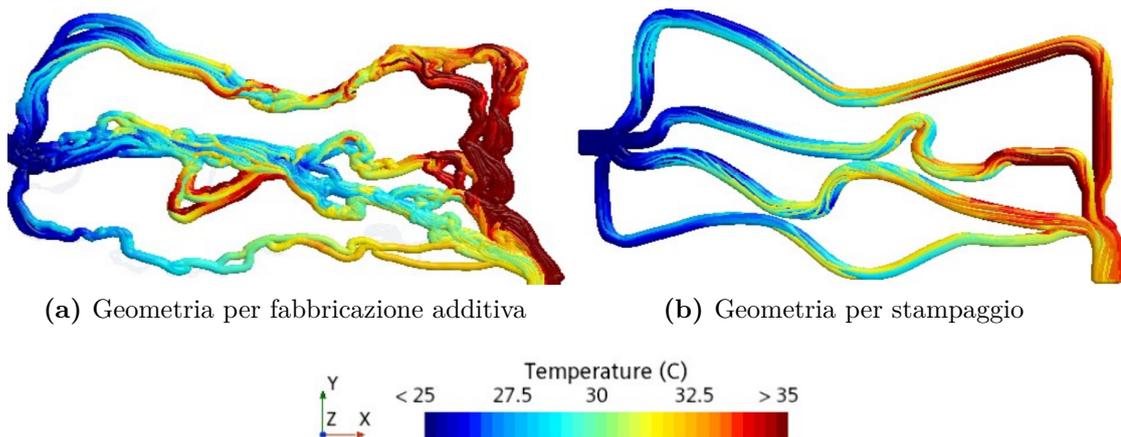


Figura 5.30: Validazione ottimizzazione: confronto temperatura del fluido tra geometria ottimizzata e geometria alternativa (stampaggio)

5.3.2 Confronto con geometria della piastra di raffreddamento realizzata con metodi di progettazione convenzionali

A conclusione dell'analisi viene realizzato un confronto con una geometria realizzata seguendo la metodologia di progettazione tradizionale (Fig. 5.31). La simulazione di questa geometria viene realizzata a parità di impostazioni della griglia di calcolo, condizioni al contorno e condizioni operative, della simulazione realizzata per

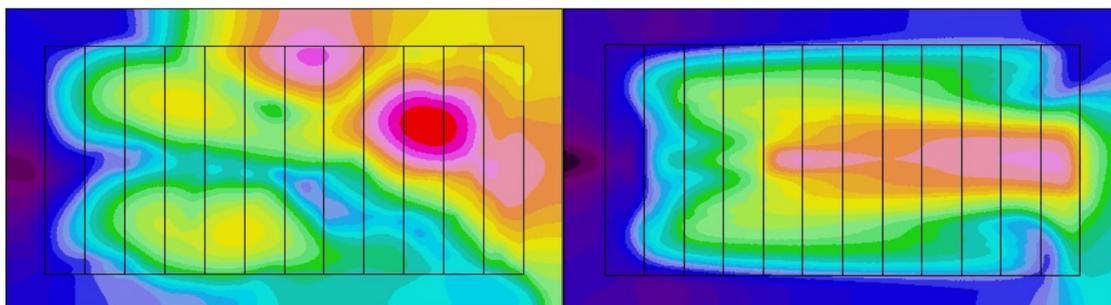
validare la geometria ottenuta mediante ottimizzazione topologica (paragrafo 5.3). Il complessivo numero di celle risulta essere di circa 14 milioni.



(a) Piastra di raffreddamento ottenuta mediante ottimizzazione topologica (b) Piastra di raffreddamento realizzata tramite processo di progettazione convenzionale

Figura 5.31

La piastra di raffreddamento ottenuta con progettazione convenzionale mostra una distribuzione di temperatura diversa rispetto a quella derivante dall'ottimizzazione topologica (Fig. 5.32): si osserva una riduzione dei picchi di temperatura registrati sulla superficie delle celle ed un peggioramento di circa 1°C sulla massima differenza di temperatura osservata tra le 12 celle. A questo proposito la figura 5.33 presenta un confronto tra i risultati delle variabili, delle simulazioni di validazione delle geometria progettata sfruttando l'ottimizzazione topologica, il suo adattamento alla fabbricazione per stampaggio e la geometria progettata con metodi convenzionali. L'analisi dei risultati permette di osservare come la piastra realizzate attraverso l'ottimizzazione topologica, ed anche quella adattata per lo stampaggio, permettano di ottenere una migliore distribuzione di temperatura sulle superfici delle celle, centrando quindi l'obiettivo principale dell'ottimizzazione. Questo vantaggio è ottenuto a spese di una peggiore capacità di asportazione del calore, come evidenziano le temperature mediamente più alte e i picchi di temperatura più elevati.



(a) Piastra di raffreddamento ottenuta mediante ottimizzazione topologica (b) Piastra di raffreddamento realizzata tramite processo di progettazione convenzionale

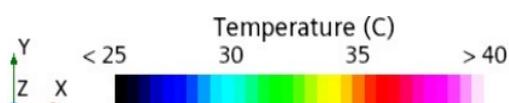


Figura 5.32: Confronto distribuzione di temperatura tra ottimizzazione topologica e progettazione convenzionale

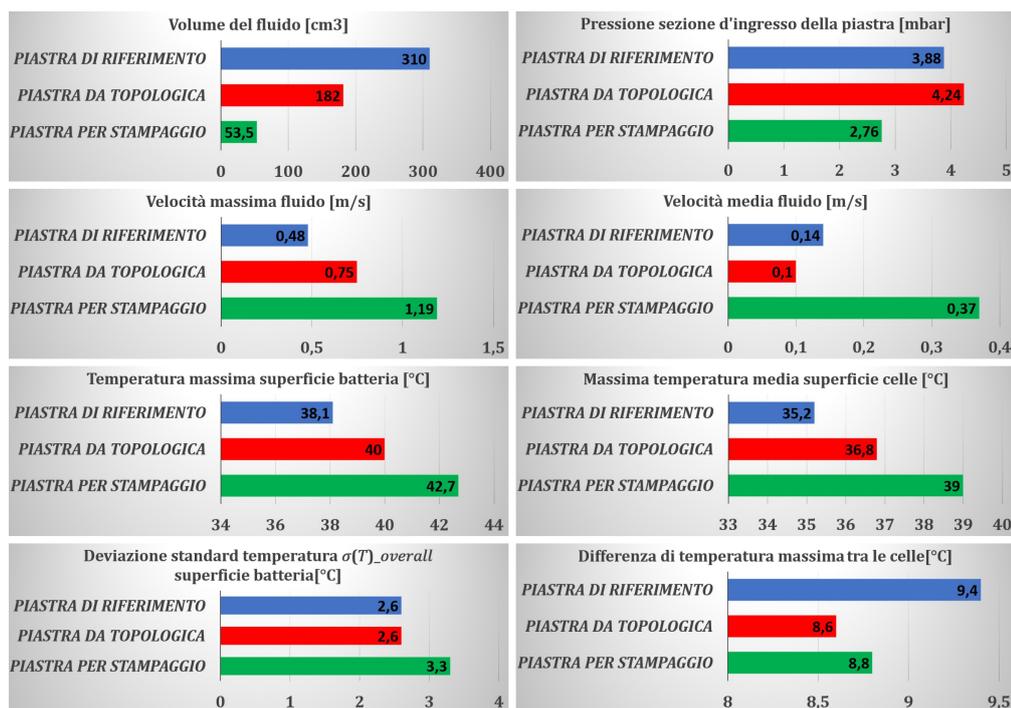


Figura 5.33: Confronto tra piastra di raffreddamento progettata mediante ottimizzazione topologica, suo adattamento alla produzione per stampaggio e piastra ottenuta con metodi di progettazione tradizionali (piastra di riferimento)

Capitolo 6

Conclusioni

L'obiettivo di questa ricerca è l'esplorazione delle potenzialità dell'ottimizzazione topologica applicata all'ambito della simulazione termofluidodinamica tridimensionale (3D-CFD) delle piastre di raffreddamento destinate al pacco batterie per applicazioni automotive.

Inizialmente è stata svolta un'attività di simulazione focalizzata su una piastra di dimensioni ridotte, in grado di raffreddare due celle di un pacco batteria, allo scopo di approfondire l'ottimizzazione topologica in un dominio semplificato caratterizzato da tempi di calcolo ridotti. Le simulazioni del modello che approssima il pacco batteria a 2 celle elettrochimiche hanno permesso di limitare i tempi di calcolo e la complessità delle analisi, raggiungendo lo scopo primario di comprensione del comportamento del solutore e delle relazioni tra i vari modelli implementati.

In questa fase è risultata evidente la complessità del problema di ottimizzazione: la dipendenza della funzione obiettivo (uniformità di temperatura sulla superficie delle celle) da fenomeni sia fluidodinamici che termici, la difficoltà di ottenere una descrizione univoca della topologia del dominio di calcolo e la risoluzione simultanea di un gran numero di equazioni approssimate per le variabili di ottimizzazione, sono i fattori principali che hanno realisticamente portato ad osservare una convergenza non monotona della funzione obiettivo durante i cicli di ottimizzazione.

L'analisi di sensitività alle condizioni al contorno ed alla dimensione della griglia di calcolo ha messo in evidenza l'estrema sensibilità della soluzione alle impostazioni del calcolo. E' quindi necessario inizializzare l'ottimizzazione con una soluzione iniziale (primal flow) che sia il più possibile accurata, riducendo le approssimazioni alle sole indispensabili.

Le simulazioni di validazione delle geometrie ottenute hanno mostrato un decadimento limitato delle prestazioni termiche rispetto a quelle attese. Maggiore

scostamento si registra in termini di volume solido all'interno del dominio di ottimizzazione, segnale di una certa incoerenza tra il parametro che discrimina la presenza di fluido e solido ed il campo di velocità simulato attraverso il modello fisico topologico.

L'analisi di sensitività ai parametri dell'algoritmo di ottimizzazione ha permesso di evidenziare i fattori maggiormente influenti sulla stabilità di convergenza della soluzione. Un equilibrio del peso numerico dei diversi vincoli all'interno della funzione lagrangiana aumentata risulta fondamentale per ottenere un'evoluzione bilanciata dell'ottimizzazione, escludendo che il soddisfacimento di un particolare vincolo prevalga sull'obiettivo.

La normalizzazione dei vincoli mediante gli scostamenti percentuali rispetto alle soglie e la calibrazione del passo di ottimizzazione risultano le strategie più promettenti per stabilizzare la soluzione, tuttavia i test svolti non hanno permesso di ottenere una convergenza finale asintotica del processo di ottimizzazione.

Si evidenzia quindi un attuale limite del metodo del gradiente, per il problema in analisi, il quale non riesce a convergere in modo asintotico verso un ottimo: le cause possono essere legate alla complessa dipendenza della funzione obiettivo dalle variabili e dai vincoli di ottimizzazione.

Il modello di piastra di raffreddamento per un modulo di batteria con 12 celle elettrochimiche permette di valutare il contributo che l'utilizzo di questa metodologia può apportare ad applicazioni nel campo automotive.

La geometria ottimizzata, realizzabile esclusivamente mediante fabbricazione additiva, evidenzia un effettivo miglioramento dell'uniformità della distribuzione di temperatura rispetto a una geometria analoga ottenuta con processo di progettazione convenzionale. Rispetto ad una geometria a serpentina dei condotti della piastra il miglioramento è quantificabile in circa 1°C di massima differenza di temperatura nella più critica delle 12 celle. Il guadagno sull'uniformità è ottenuto però a spese di un incremento di circa 2°C sulla temperatura media della superficie di tutte le celle e di $1,5^{\circ}\text{C}$ sulla temperatura massima registrata.

Il miglioramento del parametro di uniformità di temperatura che si ottiene anche dalla simulazione di una geometria della piastra ispirata alle forme individuate con l'ottimizzazione topologica, ma adattata per essere realizzata mediante processi produttivi convenzionali, apre possibili spiragli per l'utilizzo di questa metodologia attraverso un approccio più flessibile che ne estenda il possibile impiego.

Il risultato dello studio è quindi sintetizzabile con un giudizio positivo delle potenzialità dell'ottimizzazione topologica per la realizzazione delle piastre di raffreddamento, sia come metodo di progettazione per una fabbricazione con adduzione di materiale, sia come base di partenza per un'ottimizzazione della geometria dei condotti ottenibili per stampaggio. Allo stato dell'arte, tuttavia, affinché la metodologia risulti

realmente implementabile in fase di progettazione, sono necessari ulteriori sviluppi e miglioramenti dei modelli e degli algoritmi di ottimizzazione implementati nel codice di simulazione 3D-CFD, che mirino in particolare a rendere monotono il processo di ottimizzazione della funzione obiettivo e che consentano all'utente di introdurre vincoli geometrici elaborati riguardanti il volume di ottimizzazione.

Voglio esprimere la mia profonda gratitudine alla mia figlia, mio papà, mia sorella, Santinella ed Emanuel che mi sono stati di enorme supporto in questi anni. Mi hanno aiutato a gestire i momenti di sconforto, ad imparare dagli errori e a non arrendermi mai. Mia sorella Federica in particolare è stata necessaria a mitigare la mia estrema razionalità ed a farmi ragionare in modi diversi da come sono solito fare. Vi voglio un bene indescrivibile!

Grazie mamma per avermi donato i tratti caratteriali che ti hanno contraddistinto e mi hanno permesso di affrontare le sfide con caparbia e non arrendermi mai! Questa giornata è per te!

Grazie ai miei zii ed al resto della mia famiglia per esserci stati sempre. Siete la famiglia migliore che si possa desiderare.

Un enorme ringraziamento al professor Millo per l'opportunità che mi ha permesso di cogliere facendo quest'esperienza di crescita importantissima.

Un ringraziamento speciale ad Andrea, mio tutor aziendale, per essermi stato costantemente di supporto e di ispirazione nella realizzazione del lavoro. E' stata una fortuna poter apprendere qualcosa dalla tua enorme esperienza e professionalità.

Un ringraziamento ad Enrico e tutto il team di POWERTECH per avermi accolto in questi mesi come membro del team e fatto godere di tutto il necessario per affrontare al meglio il lavoro.

Grazie ai miei grandi amici per avermi aiutato nei momenti di svago a distrarmi dal lavoro e dagli studi. Alessandro grazie per avermi stimolato sempre a fare meglio, ad avere fiducia in me e per il tuo supporto lato informatico. Luca grazie per essermi stato sempre vicino e per il tuo supporto tecnico da maestro quale sei! Elia e Corrado grazie perchè mi siete sempre accanto anche se siamo lontani fisicamente e riuscite sempre a strapparmi un sorriso anche nei momenti difficili.

Grazie al mio amico di studi Marco per le giornate interminabili condivise nelle aule studio, nonostante il carico di studio siamo riusciti a trovare i modi per sorridere.

Grazie ai miei compagni di avventura tesisti Mattia, Edoardo e Gabriele che

hanno condiviso con me i momenti iniziale del percorso di tesi. Siete stati profondamente di supporto.

Grazie al Politecnico di Torino come istituzione e tutti i suoi membri per l'enorme esperienza formativa e i tanti servizi offerti agli studenti. Tornando indietro nel tempo continuerei a sceglierti sempre.

Riconosciamo PRACE per averci concesso l'accesso alle risorse dell'infrastruttura Fenix presso CINECA (IT), che sono parzialmente finanziate dal programma di ricerca e innovazione dell'Unione Europea Horizon 2020 attraverso il progetto ICEI, nell'ambito dell'accordo di finanziamento n. 800858.

We acknowledge PRACE for awarding access to the Fenix Infrastructure resources at CINECA (IT), which are partially funded from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme through the ICEI project under the grant agreement No. 800858

RINGRAZIAMENTI

Voglio esprimere la mia profonda gratitudine alla mia figlia: mio papà, mia sorella, Santinella ed Emanuel. Mi siete stati di enorme supporto in questi anni. Mi avete aiutato a gestire i momenti di sconforto, ad imparare dagli errori e a valutare meglio le mie scelte.

Papà sai quanto sono orgoglioso di essere tuo figlio e quanta stima ho di te. Spero in futuro di riuscire ad essere di esempio come tu lo sei stato per me. Non ti sarò mai abbastanza grato. Grazie!

Federica sei stata indispensabile a mitigare la mia estrema razionalità ed a farmi ragionare in modi diversi da come sono solito fare. Spero di poterti essere di supporto con la piccola Emma in arrivo come tu lo sei stata con me sempre! Sei mia sorella e sono grato che tu lo sia. Vi voglio un bene indescrivibile!

Grazie mamma per avermi donato i tratti caratteriali che ti hanno contraddistinto e mi hanno permesso di affrontare le sfide con caparbietà e non arrendermi mai! Questa giornata è per te!

Grazie ai miei zii: Corrado per avermi donato questa passione e Pinella per l'attenzione ed il bene indescrivibile che mi vuoi e che io ricambio per voi. Grazie zii Carmelo e Rita e grazie al resto della mia famiglia per esserci stati sempre. I momenti insieme sono sempre fonte di gioia. Siete la famiglia migliore che si possa desiderare.

Un enorme ringraziamento al professor Millo per l'opportunità che mi ha permesso di cogliere facendo quest'esperienza di crescita importantissima.

Un ringraziamento speciale ad Andrea, mio tutor aziendale, per essermi stato costantemente di supporto e di ispirazione nella realizzazione del lavoro. E' stata una fortuna poter apprendere qualcosa dalla tua enorme esperienza e professionalità.

Un ringraziamento ad Enrico e tutto il team di POWERTECH per avermi accolto in questi mesi come membro del team e fatto godere di tutto il necessario per affrontare al meglio il lavoro.

Grazie ai miei grandi amici per avermi aiutato nei momenti di svago a distrarmi dal lavoro e dagli studi. Alessandro, amico di una vita, grazie per avermi stimolato sempre a fare meglio, ad avere fiducia in me, grazie perchè mi comprendi senza che

parli e per il tuo supporto continuo lato informatica. Luca, fratello mio, grazie per i bei momenti e per quelli che ci saranno, grazie per essermi sempre vicino e per il tuo supporto tecnico da maestro quale sei! Elia e Corrado grazie perchè siete miei fratelli e mi siete vicini sempre anche se siamo lontani fisicamente. Riuscite sempre a rendermi felice anche nei momenti difficili. Vi voglio bene

Grazie al mio amico di studi Marco per le giornate interminabili condivise nelle aule studio, nonostante il carico di studio siamo riusciti a trovare i modi per sorridere.

Grazie ai miei compagni di avventura tesisti Mattia, Edoardo e Gabriele che hanno condiviso con me i momenti iniziale del percorso di tesi. Siete stati profondamente di supporto.

Grazie al Politecnico di Torino come istituzione e tutti i suoi membri per l'enorme esperienza formativa e i tanti servizi offerti agli studenti. Tornando indietro nel tempo continuerei a sceglierti sempre.

Riconosciamo PRACE per averci concesso l'accesso alle risorse dell'infrastruttura Fenix presso CINECA (IT), che sono parzialmente finanziate dal programma di ricerca e innovazione dell'Unione Europea Horizon 2020 attraverso il progetto ICEI, nell'ambito dell'accordo di finanziamento n. 800858.

We acknowledge PRACE for awarding access to the Fenix Infrastructure resources at CINECA (IT), which are partially funded from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme through the ICEI project under the grant agreement No. 800858

Bibliografia

- [1] Pesaran A.A. «Battery thermal models for hybrid vehicle simulation». In: *Elsevier* 110.2 (2002), 377–382, doi:10.1016/S0378-7753(02)00200–8. (Cit. a p. 2).
- [2] Feng X.; Ouyang M.; Liu X.; Lu L.; Xia Y.; He X. «Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review». In: *Energy Storage Materials* 10 (2018), 246–267, doi:10.1016/j.ensm.2017.05.013. (Cit. a p. 2).
- [3] Bizzari A. *Thermal management for batteries in E-mobility applications*. 2018. URL: <https://www.kivi.nl/uploads/media/5b23b49ab2834/11.00-Priatherm-Batenburg.pdf> (cit. a p. 2).
- [4] Bernardi D.; Pawlikowski E.; Newman J. «A General Energy Balance for Battery Systems». In: *J. Electrochem. Soc.* 132 (1985), 5–12, doi:10.1149/1.2113792. (Cit. a p. 2).
- [5] Kizilel R.; Lateef A.; Sabbah R.; Farid M.M.; Selman J.R.; Alhallaj S. «Passive control of temperature excursion and uniformity in high-energy Li-ion battery packs at high current and ambient temperature». In: *Elsevier* 183.1 (2018), 370–375, doi:10.1016/j.jpowsour.2008.04.050.) (cit. a p. 3).
- [6] Ye B.; Rubel M.R.H.; Li H. «Design and Optimization of Cooling Plate for Battery Module of an Electric Vehicle». In: *Applied Sciences* 9.4 (2019), 754–774, doi:10.3390/app9040754. (Cit. alle pp. 6, 7).
- [7] Chen S.; Peng X.; Bao N.; Garg A. «A comprehensive analysis and optimization process for an integrated liquid cooling plate for a prismatic lithium-ion battery module». In: *Applied Thermal Engineering* 156 (2019), 324–339, doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.04.089. (Cit. a p. 7).
- [8] *Simcenter STAR-CCM+ theory guide*. Siemens. 2022 (cit. alle pp. 16, 17, 21–23, 26).
- [9] Rodriguez S. «Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling». In: Springer, 2019. Cap. 2 (cit. a p. 19).

- [10] Boyd S.; Vandenberghe L. «Convex Optimization». In: Cambridge University Press, 2004. Cap. 5 (cit. a p. 22).
- [11] Wright S.J. *Augmented Lagrangian Methods*. 2016. URL: https://pages.cs.wisc.edu/~swright/nd2016/IMA_augmentedLagrangian.pdf (cit. a p. 22).
- [12] Durlofsky L.; Brady J.F. «Analysis of the Brinkman equation as a model for flow in porous media». In: *Physics of Fluids* 30.11 (1987), 3329–3341, doi:10.1063/1.866465. (Cit. a p. 24).