

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA



DICCA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale

TESI TRIENNALE

IN

INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

## Simulazioni instazionarie per la climatizzazione del teatro Carlo Felice di Genova

### Relatore

Prof. Ing. Jan Oscar Pralits

### Correlatore

Prof. Ing. Joel Enrique Guerrero Rivas

### Candidato

Paolo Badino

*n.°* 4526733

Ottobre 2020

*A Giuse e Diego.*

# Sommario

La ricerca del comfort termico unito alla riduzione degli sprechi energetici risulta essere un campo di studio in notevole crescita. In virtù di questa tendenza, i locali di importanti dimensioni ne hanno un beneficio in quanto, per essi, realizzare contemporaneamente le giuste condizioni di climatizzazione con riferimento alla sostenibilità si dimostra una pratica complessa. Applicandosi allora ad un problema reale, in riferimento al teatro Carlo Felice di Genova per l'appunto, si è voluto approfondire il tema del comfort in quanto sono state pervenute denunce di malessere all'interno degli spazi adibiti alla scena, soprattutto nella cavità orchestrale. Dopo un primo excursus sulla storia del teatro, si è quindi data una descrizione delle geometrie dell'ampio locale e delle caratteristiche tecniche dell'impianto di climatizzazione.

Chiariti questi aspetti, si è passati a comprendere le difficoltà di ricavare una soluzione fluidodinamica del problema, che possa essere in grado di spiegare il perché di questo disagio ambientale. Si sono di conseguenza ricavate le equazioni differenziali alle derivate parziali che governano l'analisi e, constatato il fatto che esse non possano essere risolte in modo esatto, si è approcciato il problema attraverso la fluidodinamica computazionale (CFD). Grazie a tale, per via numerica, si sono raggiunte a delle conclusioni: queste hanno evidenziato che il discomfort rilevato è fondato ma che, purtroppo, esso si realizza con oscillazioni vorticose lente. Altro aspetto d'importanza osservato è che la presenza di un pubblico influenza notevolmente lo studio, provocando un importante accumulo di aria calda sopra la zona occupata che non permette la corretta miscelazione termica del locale. A valle di questa osservazione, si è simulato cosa accadrebbe se questa massa di aria calda venga evacuata attraverso delle aperture di emergenza già presenti nel teatro: ciò che si è rilevato è un netto miglioramento nella fossa orchestrale ma un lieve peggioramento sul palcoscenico e nella zona occupata dagli spettatori. Si propone quindi di continuare in linea con questa simulazione, ma proporre delle condizioni al contorno della presa dell'aria quantitativamente diverse, che possano portare una maggiore omogeneità termica nel teatro.

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Stato dell'arte . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Cenni storici del teatro Carlo Felice</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Geometria e condizioni al contorno</b>	<b>14</b>
3.1	Geometria . . . . .	14
3.2	Condizioni al contorno . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Equazioni differenziali della fluidodinamica</b>	<b>20</b>
4.1	Teorema del trasporto di Reynolds . . . . .	21
4.2	Equazione di continuità . . . . .	23
4.3	Equazione della quantità di moto . . . . .	24
4.4	Equazione di conservazione dell'energia . . . . .	26
<b>5</b>	<b>La simulazione CFD</b>	<b>28</b>
5.1	Generalità . . . . .	28
5.1.1	Identificazione del problema . . . . .	29
5.1.2	Pre-processing . . . . .	30
5.1.3	Risoluzione e post-processing . . . . .	33
5.1.4	L'analisi in transitorio: peculiarità nell'approccio computazionale . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Aspetti normativi: confronti e risultati con il caso stazionario</b>	<b>36</b>
6.1	Standard normativi . . . . .	36
6.2	L'analisi stazionaria: descrizione e risultati . . . . .	41
6.2.1	Caso 1 . . . . .	42

6.2.2	Caso 2 . . . . .	44
6.2.3	Caso 3 . . . . .	46
6.2.4	Caso 4 . . . . .	47
6.2.5	Caso 5 . . . . .	48
6.2.6	Caso 6 . . . . .	50
6.2.7	Caso 7 . . . . .	51
6.2.8	Caso tridimensionale . . . . .	52
<b>7</b>	<b>Risultati dell'analisi transitoria</b>	<b>55</b>
7.1	Strategia dell'analisi . . . . .	56
7.2	Caso 1 . . . . .	57
7.3	Caso 2 . . . . .	65
7.4	Caso 3 . . . . .	80
	<b>Conclusioni</b>	<b>91</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

Un aspetto che contraddistingue la professione dell'ingegnere del XXI secolo riguarda la necessaria sensibilità al tema del risparmio energetico: lo sviluppo di tecnologie e di approcci alla progettazione atti a mitigare un potenziale spreco risultano i nuovi campi di ricerca per l'ambito civile e non. In questo contesto, numerosi studi sono stati affrontati anche nel campo dell'analisi del comfort termico e della climatizzazione: il dispendio energetico per garantire tali, ad oggi, risulta essere uno dei principali problemi che definisce la progettazione di edifici residenziali. Quest'ultimi però non sono gli unici locali per cui deve essere garantito un determinato standard di benessere: una idonea condizione termoigrometrica deve essere presente anche negli spazi pubblici i quali, per la maggior parte dei casi, presentano volumi più complessi da dover gestire rendendo ancora più difficoltosa la progettazione e la verifica dei sistemi di climatizzazione. In favore di quest'ultimo aspetto, l'evoluzione delle capacità dei calcolatori ha condotto allo sviluppo di software di calcolo fluido-computazionale che risultano essere di grande supporto in fase decisionale e di verifica: uno di questi è FLUENT<sup>®</sup> by ANSYS<sup>®</sup>, il quale sarà il programma di riferimento per le simulazioni CFD presentate in seguito.

Alla luce di questi aspetti nasce il progetto "Storia e Aria", il quale si propone di risolvere il problema di comfort denunciato dai musicisti e attori del teatro "Carlo Felice" di Genova: l'insoddisfazione termica nel golfo mistico, ad esempio, comporta notevoli problemi di performance, che vanno oltre al semplice disagio del musicante, andando ulteriormente a ledere il suono di alcune tipologie di strumenti, che necessitano particolari condizioni termiche per esprimersi al meglio. Il progetto, coordinato dal Prof. Ing. Pralits, ha seguito una prima fase di analisi che ha condotto alla conclusione che le osservazioni da parte dei musicisti erano

fondate in quanto, dalla simulazione preliminare stazionaria, si è evinto che nella fossa orchestrale si generano correnti che non sono negli standard di benessere. Poiché il progetto coinciderà con l'elaborazione di una soluzione la quale sarà basata su queste simulazioni che evidenziano lo stato di fatto del teatro, si ritiene necessario approfondire nuovamente la fluidodinamica della sala in termini non stazionari: in generale ogni flusso è instazionario, la stazionarietà è un'approssimazione possibile solo quando è lecito trascurare le fluttuazioni instabili. Nel caso studio, trascurare una potenziale oscillazione fluidodinamica potrebbe condurre a considerazioni finali errate poiché, un potenziale squilibrio interno del fluido come accade nella convezione naturale, potrebbe portare ad istanti successivi picchi di massimi e minimi dei parametri di comfort, i quali sarebbero impercettibili in uno studio di tali mediati temporalmente.

## 1.1 Stato dell'arte

Per affrontare nel modo più appropriato l'analisi, sono necessari alcuni richiami alla letteratura presente che tratta i problemi della climatizzazione e del comfort termico in grandi spazi interni: questa sezione serve per riportare alcuni aspetti sorti a valle di ricerche passate che saranno un utile supporto per guidare i vari passaggi dello studio in transitorio svolto in questo elaborato. Un primo monito da ricordare in questo tipo di simulazioni è l'importanza di considerare il carico termico dovuto all'illuminazione (qualora esso sia sufficientemente importante): questo aspetto si rende evidente con il caso studio dell'Opera di Firenze che, per altro, condivide numerose caratteristiche con il teatro Genovese [1]. Nel teatro Fiorentino infatti, a lavori in corso, sopraggiunse il progetto scenotecnico: questo ha comportato, rispetto a quanto inizialmente previsto, un notevolissimo aumento dei carichi termici determinati proprio dall'impianto di illuminazione del palcoscenico. Tale situazione ha così reso necessaria la completa revisione del progetto esecutivo dell'impianto di climatizzazione del palcoscenico e degli spazi scenici.

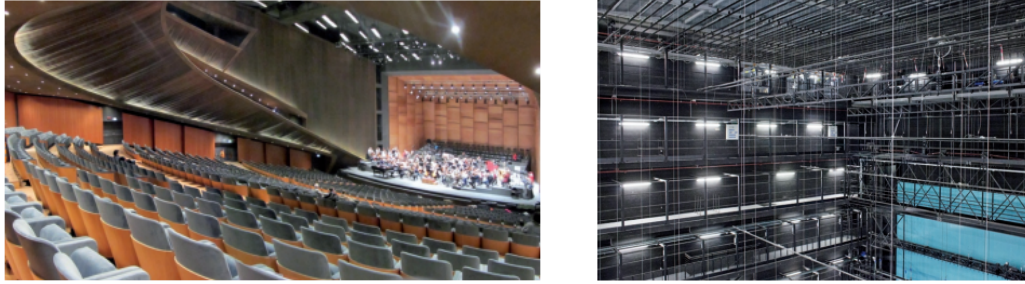


Figura 1.1: *impianto illuminotecnico dell'Opera di Firenze.*

Le analisi portate da Cheng [2] sono rivolte a chiarire i problemi maggiori che insorgono nello studio del carico di raffreddamento e del comfort termico per la progettazione di sistemi di distribuzione stratigrafica dell'aria in grandi spazi teatrali. La simulazione effettuata ha evidenziato come la migliore condizione ambientale si è ottenuta fornendo aria contemporaneamente al livello del pavimento: come hanno anche dimostrato Kim et al. [3], l'utilizzo di sistemi UFAD (Underfloor air distribution) come quello del Carlo Felice, hanno apportato un considerevole miglioramento della climatizzazione soprattutto nei grandi spazi. L'immissione dell'aria avviene direttamente nella zona occupata, ciò comporta la creazione di una stratigrafia dell'aria che, per contro, potrebbe anche ricreare delle zone di locale discomfort: questi aspetti si ritrovano nell'analisi stazionaria [4] a monte di questa trattazione e nel caso studio di Kim et alii.

Parecchia letteratura di spunto deriva anche dalle ricerche sulla climatizzazione in locali simili ai teatri, come le aule studio universitarie: è il caso trattato da Cheong et al. [5] la cui ricerca si è rivolta a valutare il comfort termico dovuto alla climatizzazione di aule dell'Università di Singapore. Molto interessante è stato l'approccio al problema, affrontato non solo con la simulazione CFD ma supportato ulteriormente da misurazioni (attraverso adeguata strumentazione) e da interpretazioni soggettive (tramite questionari sul comfort termico): l'analisi con il simulatore CFD permette di valutare la variazione di parametri tipici legati al comfort dell'interno del locale, come velocità del flusso d'aria, temperatura e umidità relativa. Questo dato, in qualche modo predetto, è stato successivamente supportato da misure sul campo. Una prima osservazione deriva proprio da questo confronto di dato: il modello risulta essere coerente con quanto misurato empiricamente e ciò fornisce una sufficiente confidenza nello strumento base dell'analisi in transitorio successivamente elaborata.



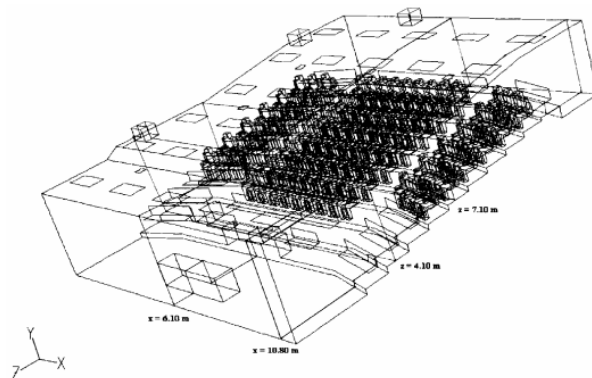


Figura 1.2: *modello geometrico dell'aula universitaria del Prof. Cheong.*

D'importanza anche i lavori di Hassan et al. [6], i quali si sono occupati di analizzare differenti tipologie di sistemi a sottopavimento in un locale densamente occupato, sostanzialmente variando la velocità di ingresso dell'aria e la posizione dei diffusori d'ingresso, da sotto i sedili o davanti a questi. Sono stati quindi studiati 5 casi differenti in 10 regioni dello spazio diverse, una per ogni altezza di seduta. Sono stati poi stimati i PMV e i PPD e si è evinto che solo in un caso è stato in grado di soddisfare i requisiti (posizione del diffusore davanti e velocità dell'aria a  $0,5 \frac{m}{s}$ , si veda figura 1.3). Quest'ultimo aspetto è dipeso soprattutto dalle condizioni al contorno, che ne risaltano l'importanza: una bassa quantità di moto iniziale unita ad impedenze sull'iniezione portano ad avere più difficoltà a vincere le forze gravitazionali. Si è subito osservato quindi che una forte impedenza era data nei casi ove il getto d'aria proveniva da sotto il sedile: quest'ultimo infatti ostacolava l'aria fresca di raggiungere i livelli più superiori. Se invece, come nel caso "vincitore", la quantità di moto iniziale è sufficiente e il diffusore è posto dinanzi alla seduta, il flusso d'aria fresca riesce a giungere nel grande pennacchio d'aria calda risalente che viene generato dalla presenza degli occupanti: ciò evidenzia l'importanza di schematizzare anche gli arredi della sala come, per l'appunto, le poltrone.

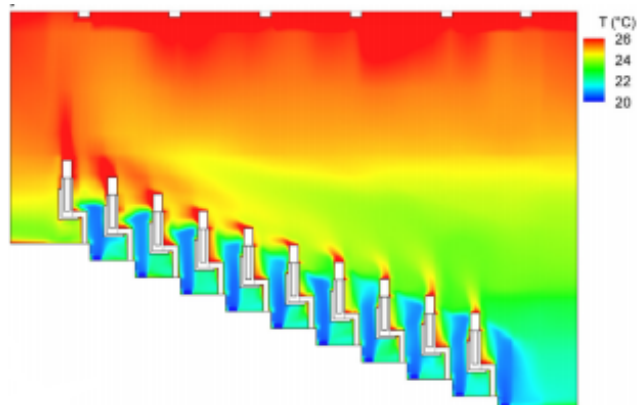


Figura 1.3: *risultato numerico della condizione "vincitrice" degli studi di Hassan.*

Ottimi risultati anche per gli studi di Hangan et al. [7], i quali hanno condotto le osservazioni sul comfort termico nel Miami Center of Performing Arts, che consiste in due grandi sale: il Teatro dell'Opera e la Sala concerti, entrambi geometricamente molto articolati. L'analisi è stata svolta con le tradizionali tecniche di temperatura e velocità in campo stazionario, ai quali è stato affiancato anche un'analisi innovativa in transitorio mirata alla valutazione della frazione di miscela fornita nel dominio. I modelli di turbolenza sono stati desunti per ottenere così delle soluzioni che permettano un'ottimizzazione in fase di progetto degli impianti di condizionamento e in generale utili per ingegneri HVAC. Le simulazioni imposte risolvono le classiche equazioni di continuità e momento così come equazioni entalpiche e di trasporto passivo scalare (per determinare, ad esempio, le concentrazioni di  $CO_2$ ). Viene poi definito uno scalare di traccia per visualizzare in modo migliore la diluizione d'aria nel locale: tale scalare è la frazione massica di aria nuovamente immessa che si ottiene eseguendo un'equivalente simulazione scalare transitoria di un'ora sovrapposta al campo di stato stazionario precedentemente ottenuto.

Particolare attenzione anche all'ambiente post occupazione di teatri: le ricerche effettuate da Kavgic et al. [8] su un teatro a Belgrado si sono concentrate sull'effetto di riempimento anche più volte nell'arco del singolo giorno. La strategia di monitoraggio si è divisa in 2 parti: misure in campo e valutazione sulla salubrità e sul comfort termico da sondaggio. Per quando riguarda le misure dirette, sono state effettuate in due sere di attività: in questo modo, lo studio si è basato su opportuni confronti, soprattutto nei parametri di temperatura e  $CO_2$ . Dalla prima, è stato registrato che in alcuni punti si è ecceduto dai valori Normativi ISO

7730, soprattutto nei frangenti ove la gente si accomodava nelle poltrone, quando applaudiva alla fine dell'atto e anche quando gli spettatori, a fine spettacolo, hanno lasciato il locale (la differenza termica tra i due giorni è da legarsi principalmente al fatto che il primo giorno è stato occupato da un numero leggermente più superiore di persone). Per i termini di  $CO_2$  invece, troviamo dei valori molto prossimi nelle due giornate di misura: è interessante osservare a quale istante si sono misurati i picchi massimi e i decrementi. Un primo picco importante è arrivato quando la gente è entrata nella sala: questo valore è calato poi con l'accomodarsi degli spettatori nelle poltrone. Altri importanti decadimenti e successivi ricrescite sono avvenute negli intervalli: infatti, molti occupanti in questo lasso temporale si sono spostati nell'atrio. Quest'ultimo aspetto dà importanza alla variazione di densità di occupazione, soprattutto nella variabile temporale percepibile con una simulazione in transitorio.

Nel lavoro di Mateus et al [9] viene evidenziato il problema della modellizzazione della stratificazione tipica nei sistemi di climatizzazione dal basso: l'aria si dispone in fasce fino a che non incontra una fonte di calore che la riscalda e, conseguentemente, è testimone di una decrescita di densità. A seguito di questo, per galleggiamento, l'aria più calda sale portandosi con sé tutte le sostanze inquinanti dalla zona occupata: si formerà uno strato, ben delimitato da una interfaccia, il quale dovrà essere assorbito dai sistemi di aspirazione per rendere l'aria più pulita. Una parte dell'analisi riguarda proprio la stima dell'altezza di questo strato che, unite alle misure effettuate con particolari sensori ad infrarossi in due locali recentemente restaurati a Lisbona (La sala concerti e la sala prove dell'orchestra), ha permesso di validare il modello di stima, il quale fornirà una dato significato per il secondo approfondimento dell'articolo, questa volta legato al "modello a tre nodi". Quest'ultimo viene definito per schematizzare sempre la stratificazione dell'aria: è detto a tre nodi perché sono tre i punti ove si definisce la temperatura dell'aria mista (un punto singolo non sarebbe ovviamente sufficiente). Questi punti vengono collocati vicino al pavimento (0,1 m dal piano di calpestio), nella zona occupata (0,65 m per occupanti seduti e 0,9 m per quelli in piedi) e nella zona sopra l'interfaccia, caratterizzante l'aspetto termico dell'aria di scarico.

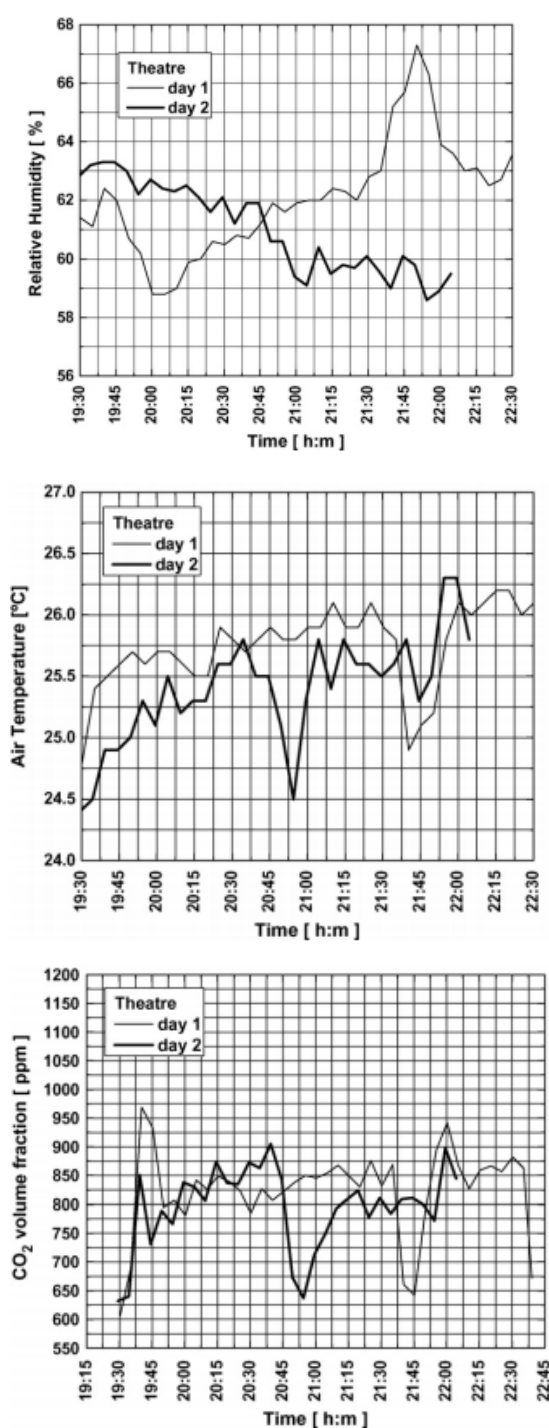


Figura 1.4: diagrammi di variazione temporale di umidità relativa, temperatura e CO<sub>2</sub>, Kavgić et al. [8].

Sempre in merito al problema della stratificazione viene presentata brevemente l'analisi condotta per il teatro Fraschini a Pavia [10]: attraverso la somministrazione di questionari e misure attraverso la centralina per microclima multicanale "Babuk-A" (figura 1.5(a)), si è potuto ottenere un confronto tra aspetti oggettivi e soggettivi che possono ledere sensibilmente il comfort di permanenza nel locale nelle varie fasce di altezza della sala (parterre e i quattro ordini di balconata). Un primo riscontro, abbastanza intuibile, è stato che nelle parti più alte si sono manifestati maggiori disagi termici, andando a misurare temperature di  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Per la valutazione del comfort termico, la Prof.ssa Ricciardi ha sfruttato la stima di " $t_n$ ", definita come quella temperatura ottimale per garantire il miglior comfort: essa si realizza quando, per il calcolo analitico, il valore di PMV (Voto Medio Previsto) si attesta su valori nulli (miglior condizione). Attraverso la stima di questo parametro con due diversi approcci ("analitico" e "adattivo"), si è osservato che quando i valori di " $t_n$ " si realizzano maggiori delle temperature operative " $t_o$ ", la tendenza è quella di percepire il luogo troppo caldo:  $t_n$  risulta quindi essere un parametro molto interessante, applicabile però quando è possibile avere un determinato valore di PMV e, di conseguenza, avere note le informazioni sull'abbigliamento, metabolismo e altre informazioni utili anche ottenibili con la somministrazione, appunto, di questionari post occupazione.

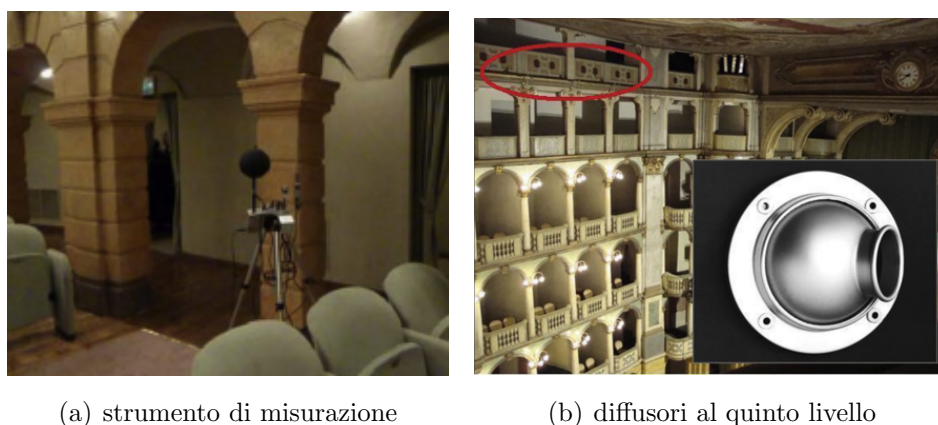


Figura 1.5: *strumento di misurazione e diffusori usati per il teatro Fraschini a Pavia, Ricciardi et al. [10].*

Dalla letteratura qui mostrata come primo inquadramento del problema, si capisce che le variabili in gioco da tenere in considerazione sono notevoli e di notevole complessità: per poter giungere a delle soluzioni funzionali è necessario procedere gradualmente, capendo quali siano le particolarità che devono essere maggiormente approfondite e successivamente modellizzate ed elaborate, questo sia che i dati provengano da analisi soggettive, da misure sperimentali oppure, come nel caso qua analizzato, attraverso simulazioni numeriche di calcolo (CFD).

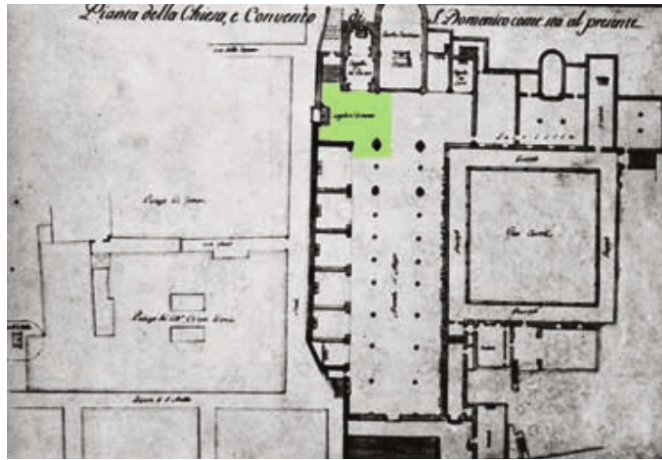
## Capitolo 2

# Cenni storici del teatro Carlo Felice

*”Il teatro è mettere in scena emozioni nude e convincere tutti che sia una finzione” - Filippo Recaneschi*

In questo capitolo si vuole dare un cenno in merito alla storia del teatro: basandosi sulla testimonianza di Elisabetta Brusa [11], si è cercato di comprendere l'importanza che il Carlo Felice ha per Genova. Per quest'ultimo infatti, l'infrastruttura rappresentava una necessità già alla fine del Settecento: l'idea lo vedeva eretto sullo spazio della chiesa sconsacrata di San Domenico (con annesso convento di Domenicani) la quale, al tempo, dava il nome a quella che oggi è la centralissima piazza De Ferrari. Il primo progetto venne presentato nel 1799 dal Tagliafichi, ma per varie vicissitudini politiche e militari l'attuazione vera e propria non si realizzò: si dovette attendere re Carlo Felice (dal quale il teatro prenderà il nome) per la ripresa definitiva degli studi e della costruzione.

Infatti, nella prima metà dell'Ottocento, venne finalmente realizzato il teatro, opera dell'architetto Carlo Barabino: esso pensò ad una pianta interna a ferro di cavallo con palchi, molto in voga in quegli anni soprattutto nei teatri all'italiana, che davano la possibilità di ricavare un nuovo spazio, detto platea, molto sfruttato per i balli. Già al tempo risultava un esempio tecnologico: l'alta torre scenica permetteva l'innalzamento senza piegatura dei pannelli scenici: un aspetto che ancora oggi contraddistingue il teatro, unito al colonnato e pronao neoclassici antistanti definiti anche questi per l'inaugurazione del 7 Aprile 1828 con l'opera "Bianca e Fernando" di Vincenzo Bellini.



(a) pianta



(b) demolizione

Figura 2.1: *pianta e demolizione chiesa e convento San Domenico.*

Ma per mantenersi come esempio di avanzamento tecnologico, il teatro Carlo Felice ha subito numerosi ammodernamenti: d'importanza si ricordano la modifica delle travi (da lignee in calcestruzzo armato) e l'ampliamento della fossa orchestrale. Nel 1892 venne dotata di illuminazione elettrica mentre, nel 1912, si installò un sipario comandato elettricamente.





Figura 2.2: *facciata del teatro a cavallo tra l' Ottocento e Novecento (foto Paul Trabert, ristampa formato cartolina Gianinazzi).*

Tanto affascinante quanto delicato, anche il Carlo Felice non scampò ai bombardamenti della Seconda Guerra Mondiale: a più riprese, tra il '42 e il '44, tutti le parti in legno andarono a fuoco e le parti metalliche crollarono, lasciando soltanto la struttura muraria. Subito al finire della guerra, numerosi concorsi si promossero alla ristrutturazione del teatro, ma purtroppo per quarant'anni il teatro rimase nelle condizioni post belliche: si deve precisare che ci furono numerosi bandi di concorso e altrettanti di questi furono vinti, si ricorda soprattutto Paolo Antonio Chessa nel 1950 e Carlo Scarpa nel 1961, ma solo nel 7 Aprile del 1987 si posò la prima pietra, con l'impresa "Mario Valle S.p.A."



Figura 2.3: *il Carlo Felice bombardato durante la Seconda Guerra Mondiale (da fotogramma "Storia di un teatro" [11]).*

Quest'ultima, attraverso i progetti esecutivi firmati da grandi architetti come Ignazio Gardella, Aldo Rossi e Angelo Sibilla, portò alla concretizzazione del risanamento del teatro che da troppo tempo incombeva in degrado sull'antistante piazza De Ferrari. Nel XXI secolo, la concezione del teatro non è più rivolta allo sguardo ma alla rappresentazione: la sala deve essere pensata come a servizio dell'utenza, perdendo di fatto la connotazione monumentale in virtù di aspetti funzionali. Il tutto si rivolge a come meglio realizzare l'interazione scena-sala, modificando la concezione di progettazione sul singolo e dove meglio collocarlo: Aldo Rossi si rifà ai teatri del Nord Europa che presentano già questa connotazione moderna, mantenendolo però tradizionale ripristinando l'esterno sempre con colonnati e pronao neoclassici.

L'idea era di concretizzare un rapporto frontale con la scena, come in un raccoglimento in una piazza notturna: da qui la famosa caratterizzazione interna con balconi finti e reali e murature in marmo bardiglio, ottimi per l'aspetto acustico. Un altro aspetto che si volle mantenere dalle peculiarità del teatro è la sua connotazione tecnologica: lo scenografo Ezio Frigerio dotò di quattro palchi il teatro e rese altrettanto moderno tutto l'aspetto illuminotecnico. Il 20 Ottobre del 1991 il teatro si apre al pubblico e viene inaugurato con "il trovatore" di Giuseppe Verdi, diventando a tutti gli effetti il teatro comunale dell'opera di Genova.

## Capitolo 3

# Geometria e condizioni al contorno

A valle delle varie vicissitudini che hanno contraddistinto il teatro nei vari archi temporali, il Carlo Felice di Genova si identifica come un luogo innovativo e speciale, sia per gli aspetti architettonici ma anche per peculiarità impiantistiche di climatizzazione: si vuole fornire una descrizione di questi, per comprendere al meglio quali siano le geometrie e le condizioni al contorno che caratterizzano il problema.

### 3.1 Geometria

La geometria del teatro risulta essere particolare: in figura 3.1 è rappresentata la sezione longitudinale di mezzeria, identificativa per le elaborazioni successive. Come è intuitivo immaginare, queste forme non regolari unite anche alla grandezza della sala (il volume complessivo pari è a  $230000 m^3$ ) evidenziano le prime difficoltà di calcolo computazionale, aspetti che dilatano notevolmente il tempo di calcolo. Ad oggi, il Carlo Felice si presenta con una superficie di  $1600 m^2$  dedicati ai posti a sedere per la platea e la galleria (comprendendo sia la balconata che il loggione) con 1399 posti in platea, 504 posti in galleria, 76 sui palchi e 21 nelle famose balconate che si affacciano "sulla piazza notturna".

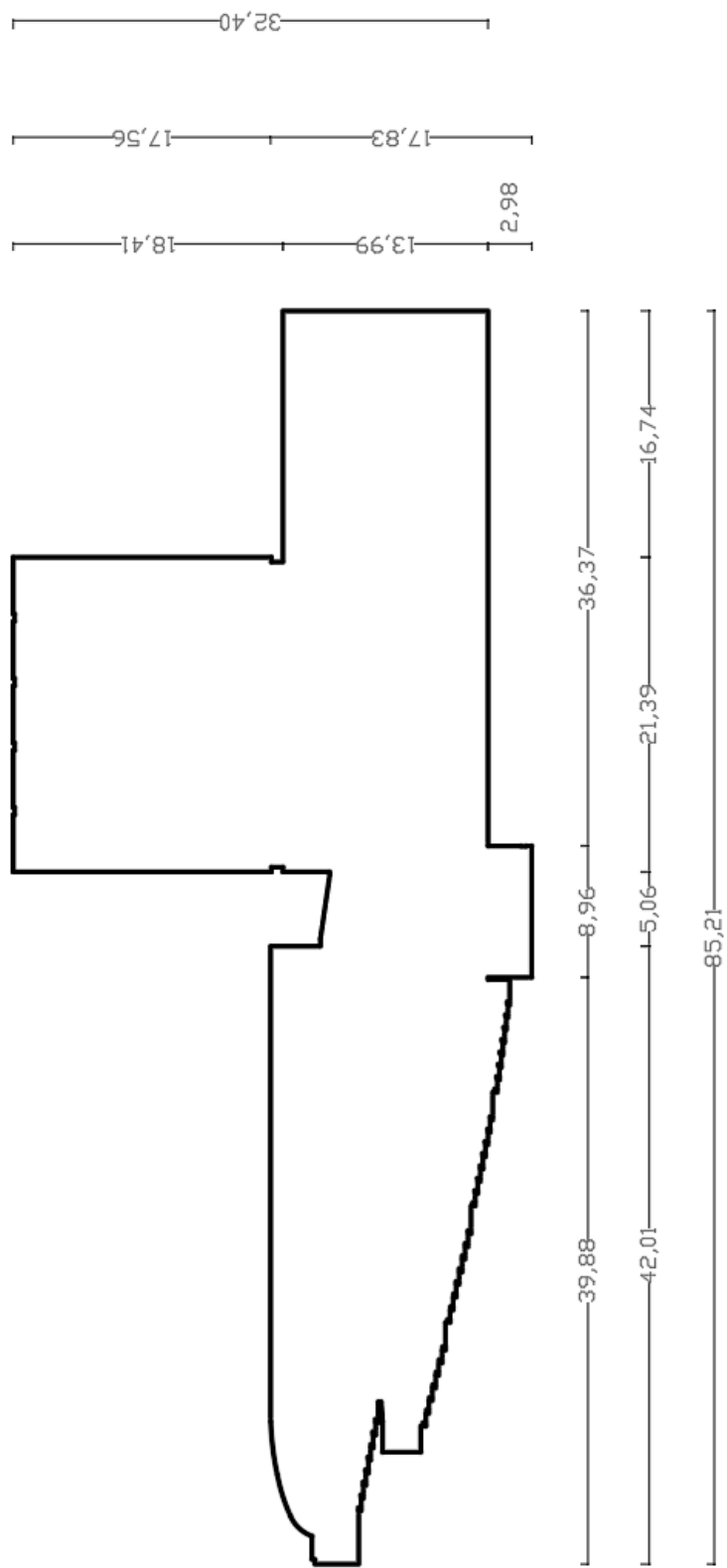


Figura 3.1: sezione longitudinale del teatro.

Il sipario tagliafuoco è composto da 125 pannelli per una superficie complessiva di  $200 m^2$ , il quale si colloca sul boccascena di dimensioni pari a  $10 \times 16 m$ , d'interesse per avere un'idea anche delle dimensioni trasversali del teatro. Per il palcoscenico principale, il Carlo Felice appare con una superficie di  $574 m^2$  mentre la fossa orchestrale si definisce con una pianta trapezoidale avente una superficie di  $120 m^2$ . Sulla base delle indicazioni fornite nella tesi stazionaria che precede questo elaborato [4], si riportano in forma tabellare le dimensioni che completano quanto sopra specificato.

Volume totale	mc	230000
Volume scene e servizi di scena	mc	118000
Volume sala e zone collegate	mc	106000
Volume fuori terra	mc	151000
Volume interrato	mc	79000
Superficie palcoscenico principale	mq	574
Superficie palcoscenico dorsale	mq	368
Superficie totale sottopalco	mq	1760
Distanza massima boccascena spettatori	m	44
Dimensione boccascena	m	$10 \times 16$
Dimensioni poltrone	cm	$55 \times 73$
Interasse poltrone	cm	85
Mc. sala utile/spettatore	mc/spettatore	8.75
Posti sala principale	n.	2000
Posti sala conferenza	n.	206
Camerini	n.	18

Tabella 3.1: *caratteristiche geometriche Carlo Felice.*

## 3.2 Condizioni al contorno

Nelle casistiche successivamente analizzate, le principali condizioni al contorno che entrano in gioco sono sicuramente quelle che vengono definite dall'impianto di climatizzazione della sala: a queste, che sono sempre presenti, si uniranno poi altre caratteristiche come la presenza di persone e di orchestrali che permetteranno la risoluzione numerica definitiva nelle varie situazioni prese in esame. Le informazioni in merito all'aspetto impiantistico sono nuovamente tratte dalla tesi delle Dott.sse Giulia Macciò e Valentina Costa [4], le quali hanno definito le caratteristiche tecniche dell'assetto di climatizzazione specifiche del teatro. Que-

st'ultimo, come tanti locali aventi grandi spazi, sfrutta un sistema di tipo UFAD (UnderFloor Air Distribution) che, come già spiegato nell'introduzione 1.1, risulta essere particolarmente efficiente in termini energetici in quanto l'immissione avviene direttamente nella zona occupata.

In particolare, per immettere aria nello spazio più grande, ovvero la platea, il teatro Carlo Felice utilizza un sistema innovativo, denominato "PDP" (diffusori a Piede Di Poltrona): dei cilindri innestati ai piedi della seduta, solitamente uno ogni due di queste, agiscono immettendo aria proveniente da un plenum sottopavimento (figura 3.2).

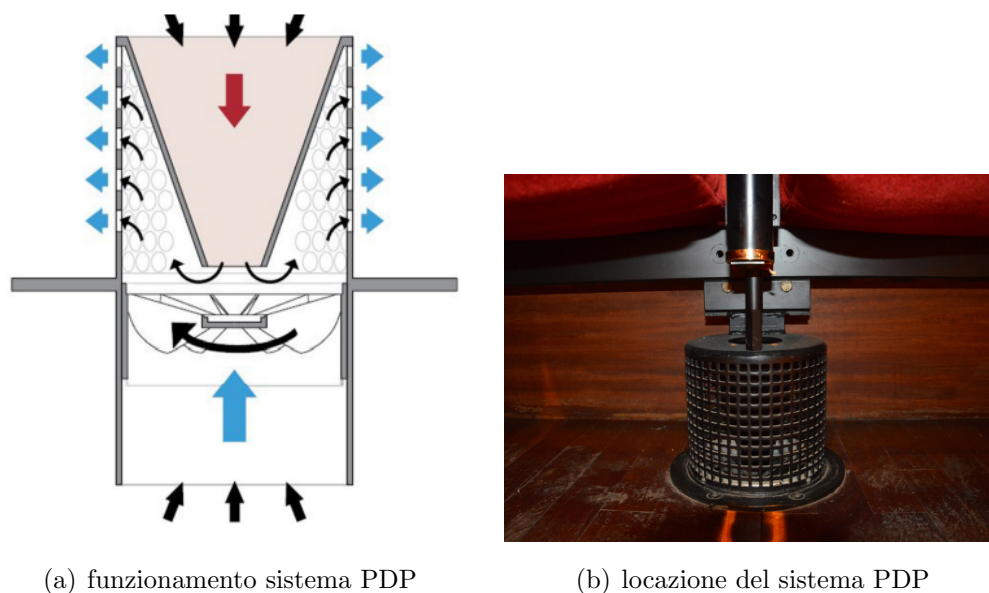


Figura 3.2: diffusore a piede di poltrona: funzionamento e installazione.

Il moto dell'aria viene modificato da assiale ad elicoidale da una serie di deflettori, i quali convogliano l'aria verso le pareti forate più esterne del cilindro, localizzando una zona interna di depressione che permette un apporto di aria già immessa che viene miscelata con quella da immettere riducendo così il rischio di discomfort per eventuali temperature troppo basse: questi sistemi si attuano con differenziali termici ambiente-aria immessa che vanno dai 5 ai 7 °C, con una temperatura effettiva di immissione di 1/2 °C inferiore rispetto a quella del locale. Si vengono a creare così dei microclimi intorno allo spettatore, i quali migliorano l'esperienza di occupazione nella sala e risultano anche essere ottimi per quanto riguarda l'impatto acustico.

Le portate unitarie sono dell'ordine rispettivamente di 60-45-30  $\frac{m^3}{h}$ , distribuite nelle varie parti del teatro in base alle esigenze, le quali attraversano sezioni di diametro di 197-123 mm: questi valori devono rimanere così tarati in quanto, per normativa ASHRAE [12], una velocità di immissione maggiore di 0.8  $\frac{m}{s}$  porterebbe importanti disagi e sarebbe, di conseguenza, fuori limite. La ripresa poi viene realizzata sul soffitto, atto a concludere il sistema a tutt'aria (aria esterna + aria riciclata) utilizzato per la climatizzazione delle sale più grandi del Carlo Felice. La fossa orchestrale presenta un sistema di climatizzazione differente, come il palcoscenico: per la prima, la mandata viene realizzata dal pavimento, sempre definendo basse differenze termiche ambiente-immissione per ridurre il discomfort. Il palcoscenico viene servito da mandate poste sulle pareti laterali e la ripresa passa attraverso apposite griglie metalliche, volta a evitare l'effetto camino. In conclusione, in figura 3.3 si riporta un'immagine della sezione longitudinale già rappresentata che indica i vari "inlet" e "outlet" identificabili nella mezzeria della sala: i contorni definiti sono da considerarsi totalmente adiabatici.

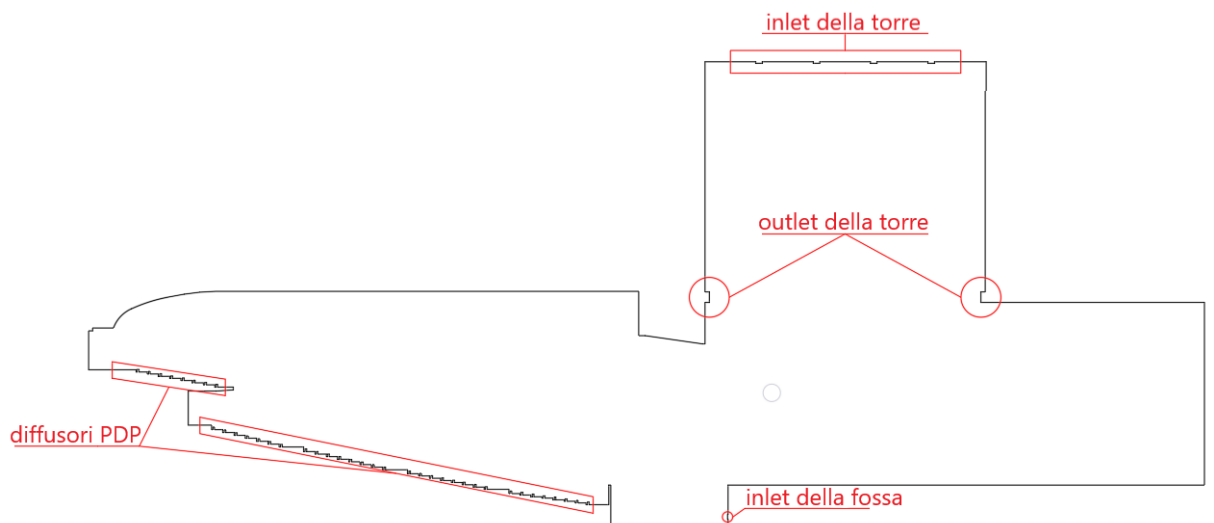


Figura 3.3: riferimenti di inlet e outlet nella sezione longitudinale di mezzeria.

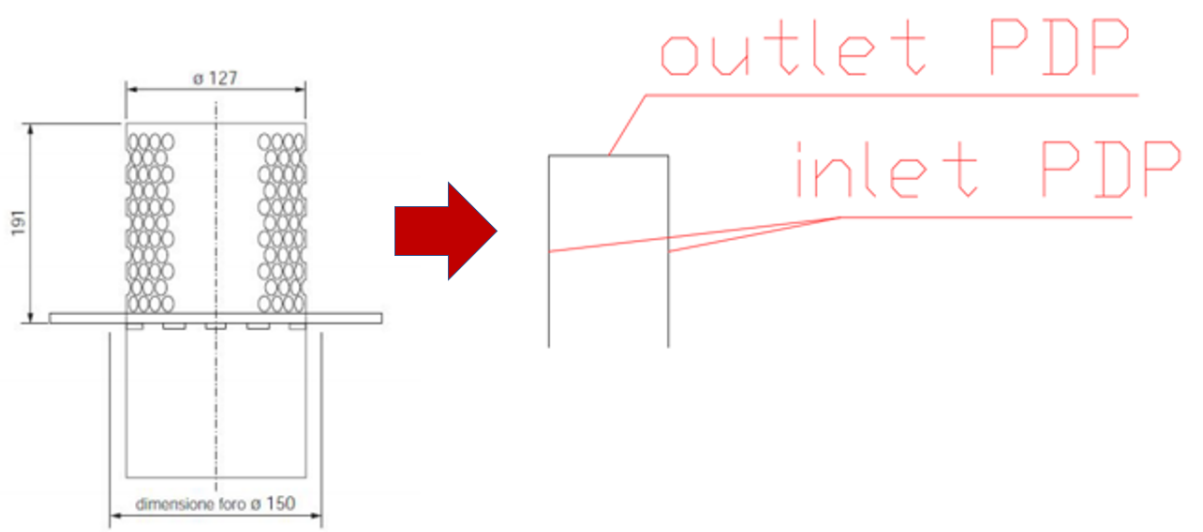


Figura 3.4: *modellizzazione dei diffusori PDP.*



## Capitolo 4

# Equazioni differenziali della fluidodinamica

Prima di passare all'approfondimento del calcolo computazionale, è bene chiarire quali sono le equazioni differenziali che governano i parametri fluidodinamici: la risoluzione di queste permetterà di ottenere dei valori numerici, dai quali si potranno formulare osservazioni ed elaborare possibili soluzioni.

In generale, i principi che definiscono un problema della meccanica dei fluidi sono:

- **principio di conservazione della massa:** *"La massa associata ad un volume materiale di fluido è costante nel tempo"*;
- **principio di conservazione della quantità di moto:** *"La derivata rispetto al tempo della quantità di moto di un volume materiale di fluido è uguale alla risultante delle forze che l'esterno esercita sul volume di fluido"*;
- **principio di conservazione dell'energia:** *"l'energia di un sistema rimane costante se il sistema è isolato all'esterno"*.

Questi principi si manifestano attraverso la combinazione di tre equazioni differenziali di bilancio alle derivate parziali, dette comunemente **equazioni di Navier-Stokes**, le quali vengono generalmente richiamate sotto un'unica espressione così definita:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \quad (4.1)$$

ove il parametro  $\phi$  varia in base all'equazione considerata:

- $\phi = 1$  per l'equazione di continuità;
- $\phi = (u, v, w)$  con  $(u, v, w)$  velocità in direzione X, Y, Z (terna di assi coordinati) rispettivamente per le equazioni della quantità di moto in direzione X, Y, Z;
- $\phi = h$  per l'equazione di conservazione dell'energia.

Nei sottocapitoli seguenti, si definiranno le equazioni sopracitate.

## 4.1 Teorema del trasporto di Reynolds

Per giungere alle equazioni cardine per la soluzione del problema di condizionamento è necessario osservare, in primo luogo, che studiare una entità fluida come l'aria non permette di utilizzare le formulazioni della fisica classiche definite per un corpo solido: infatti, la descrizione fisica Lagrangiana non è funzionale per lo studio di un soggetto fisico definito da infinite particelle fluide delle quali è impossibile definire una funzione di posizione iniziale. Sicuramente più conveniente una descrizione Euleriana: fissando un punto nello spazio, si studia la variazione dei parametri in tale locazione senza fare riferimento ad una particella fluida specifica. Se si prende in riferimento la figura 4.1, la quale rappresenta l'evoluzione temporale e spaziale di una generica particella fluida, è evidente che il vettore di posizione di un generico punto P, così come ogni altra variabile, può essere espresso come  $\underline{X} = \underline{f}(\underline{x}, t)$ . Seguendo poi il senso fisico della trasformazione, è chiaro che tale funzione risulta essere biunivoca: una particella del volume iniziale è associata ad una e una sola particella fluida nel volume finale.

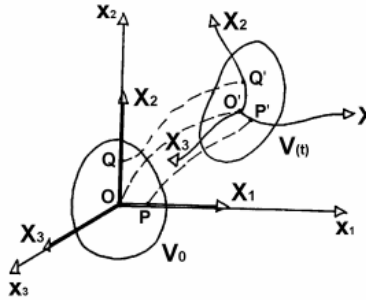


Figura 4.1: riferimenti Lagrangiani e Euleriani particella fluida.

Alla luce di questo, una generica variabile  $\underline{F}$  può essere definita:

- $\underline{F} = \underline{A}(\underline{x}, t)$  definita Euleriana;
- $\underline{F} = \underline{B}(\underline{X}, t)$  definita Lagrangiana.

È possibile allora descrivere due derivate temporali, rispettivamente chiamate locale e materiale, che esprimano la stessa grandezza fisica ma con espressioni differenti in virtù della scelta descrittiva. Elaborando tali osservazioni, si giunge all'espressione descritta nella (4.2), la quale esprime la definizione della derivata materiale (legata alla classica descrizione Lagrangiana) nei termini Euleriani:

$$\frac{d\underline{F}}{dt} = \frac{\partial \underline{F}}{\partial t} + \underline{v} \cdot \nabla \underline{F} \quad (4.2)$$

ove  $\underline{v} = (u, v, w)$  vettore velocità Lagrangiana.

Estendendo il concetto sulla singola particella fluida ad una regione e sfruttando il teorema della divergenza, si ottiene il **teorema del trasporto** (4.4): “ *la derivata materiale dell'integrale su un volume mobile di  $\underline{F}$  è uguale alla derivata locale dell'integrale della proprietà  $\underline{F}$  su un volume fisso  $V'$  più il flusso sempre di  $\underline{F}$  attraverso la superficie  $S'$  del volume  $V'$  ”, fondamentale per la definizione delle equazioni che definiscono il problema.*

Per giungere a tale relazione, è necessario fare delle precisazioni. In primo luogo, è necessario identificare la differenza volumetrica che si genera tra il volume fisso  $V'$  e il volume mobile  $V$  ad un certo  $\Delta t$  ove, all'istante di riferimento  $t_0$ , si ha  $V = V'$ . Per fare questo, bisogna porre l'attenzione sulle velocità che attraversano la superficie infinitesima  $dS'$ : infatti, è dimostrabile che a livello infinitesimo, il volume elementare di differenza è dato dal prodotto della base  $dS'$  e dell'altezza:

quest'ultima può essere ricavata ottenendo il generico vettore di traiettoria  $\underline{v}\Delta t$ , poi moltiplicata scalarmente per il versore  $\underline{n}$ . Estendendo tale concetto a tutta la superficie, si ottiene la relazione:

$$\int_{S'} (\underline{v} \cdot \underline{n}) \Delta t dS' \quad (4.3)$$

Definito questo aspetto, si può passare a chiarire  $\frac{d}{dt} \int_V \underline{F} dV$ , partendo proprio dalla definizione di derivata:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \underline{F} dV &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_V \underline{F}(t_0 + \Delta t) dV - \int_{V'} \underline{F}(t_0) dV'}{\Delta t} = \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{V'} \underline{F}(t_0 + \Delta t) dV' + \int_{S'} \underline{F}(t_0 + \Delta t) (\underline{v} \cdot \underline{n}) \Delta t dS' - \int_{V'} \underline{F}(t_0) dV'}{\Delta t} = \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{V'} (\underline{F}(t_0) + \frac{\partial \underline{F}}{\partial t} \Delta t) dV' + \int_{S'} \underline{F}(t_0 + \Delta t) (\underline{v} \cdot \underline{n}) \Delta t dS' - \int_{V'} \underline{F}(t_0) dV'}{\Delta t} = \\ &= \int_{V'} \frac{\partial \underline{F}}{\partial t} dV' + \int_{S'} \underline{F}(t_0) (\underline{v} \cdot \underline{n}) dS' \end{aligned}$$

Che conduce alla relazione (4.4) definita a inizio sottosezione:

$$\frac{d}{dt} \int_V \underline{F} dV = \int_{V'} \frac{\partial \underline{F}}{\partial t} dV' + \int_{S'} \underline{F} \underline{v} \cdot \underline{n} dS' \quad (4.4)$$

## 4.2 Equazione di continuità

Pensando al principio di conservazione della massa, l'equazione di continuità è immediatamente ottenibile dal momento che tale è enunciabile nella forma:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0 \quad (4.5)$$

Sfruttando la relazione (4.4) nella forma semplificata ove la variabile è la densità  $\rho$ , otteniamo subito la (4.6):

$$\int_{V'} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV' + \int_{S'} \rho \underline{v} \cdot \underline{n} dS' = 0 \quad (4.6)$$

Evidenziando così il fatto che ogni variazione interna ad un volume di controllo necessariamente si riconduca ad un flusso, cioè ad una transizione attraverso la superficie del volume di controllo stesso.

### 4.3 Equazione della quantità di moto

Tale equazione differenziale discende direttamente dalla seconda legge di Newton ( $\underline{\mathbf{F}} = m\underline{\mathbf{a}}$ ): è infatti dimostrabile che

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \underline{\mathbf{v}} dV = \int_{V'} \rho \frac{d\underline{\mathbf{v}}}{dt} dV' \quad (4.7)$$

che rappresenta nella classica forma Lagrangiana il secondo membro della seconda legge di Newton. In virtù di ciò, è possibile allora definire l'uguaglianza con le forze in gioco, le quali si dividono in forze di superficie e di volume:

$$\int_{V'} \rho \frac{d\underline{\mathbf{v}}}{dt} dV' = \int_{V'} \frac{\partial(\rho \underline{\mathbf{v}})}{\partial t} dV' + \int_{V'} \nabla \cdot (\rho \underline{\mathbf{v}} \underline{\mathbf{v}}) dV' = \int_{V'} \rho \underline{\mathbf{f}} dV' + \int_{S'} \underline{\mathbf{t}} dS' \quad (4.8)$$

essendo il vettore  $\underline{\mathbf{f}}$  una entità che tiene in conto le forze gravitazionali, le forze centrifughe e di Coriolis e  $\underline{\mathbf{t}}$  il vettore degli sforzi superficiali agenti sulla superficie elementare di  $S'$ . Sapendo che quest'ultimo è riscrivibile come il prodotto scalare del versore normale alla superficie  $\underline{\mathbf{n}}$  che viene scelto convenzionalmente con verso uscente dal volume di controllo e il tensore delle tensioni  $\mathbf{T}$  e ancora ricordando il teorema della divergenza, si ottiene:

$$\int_{V'} \frac{\partial(\rho \underline{\mathbf{v}})}{\partial t} dV' + \int_{V'} \nabla \cdot (\rho \underline{\mathbf{v}} \underline{\mathbf{v}}) dV' = \int_{V'} (\rho \underline{\mathbf{f}} + \nabla \cdot \mathbf{T}) dV' \quad (4.9)$$

ove, in  $\mathbf{T}$ , sono presenti le dipendenze dal vettore delle velocità e dalla pressione  $p$ . Ciò è evidente scrivendo il tensore delle tensioni alla Cauchy:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Decisamente più complessa è la dipendenza dalla velocità, intrinsecamente presente nella seconda matrice delle tensioni tangenziali in quanto l'analisi d'interesse è legata a fluidi Newtoniani isotropi. In merito a quest'ultimo aspetto, si evince che l'ultima matrice presente nella (4.10), chiamata per semplicità  $\underline{\underline{\tau}}$ , deve corrispondere ad una relazione lineare ben precisa che corrisponda alle proprietà. L'unica relazione possibile è mostrata in (4.11):

$$\underline{\underline{\tau}} = 2\eta[\mathbf{D} - \frac{1}{3}(\nabla \cdot \underline{\mathbf{v}})\mathbf{I}] + \eta_v(\nabla \cdot \underline{\mathbf{v}})\mathbf{I} \quad (4.11)$$

ove  $\mathbf{D}$  rappresenta il tensore di velocità di deformazione ( $\mathbf{D} = \frac{\nabla \underline{\mathbf{v}} + (\nabla \underline{\mathbf{v}})^T}{2}$ ) mentre  $\eta$  è il primo coefficiente di viscosità e  $\eta_v$  è definito come il coefficiente di viscosità di volume. Elaborando quindi l'ultimo termine della (4.9), si ottiene l'equazione differenziale alle derivate parziali della quantità di moto:

$$\int_{V'} \frac{\partial(\rho \underline{\mathbf{v}})}{\partial t} dV' + \int_{V'} \nabla \cdot (\rho \underline{\mathbf{v}} \underline{\mathbf{v}}) dV' = \int_{V'} (\rho \underline{\mathbf{f}} - \nabla \cdot p + \nabla \cdot (\eta(\nabla \underline{\mathbf{v}}^T)) + \nabla(\eta_v \nabla \cdot \underline{\mathbf{v}})) dV' \quad (4.12)$$

## 4.4 Equazione di conservazione dell'energia

La definizione di quest'ultima equazione differenziale alle derivate parziali che governa l'analisi deriva direttamente dalla definizione del **primo principio della termodinamica** : *"la variazione nell'unità di tempo dell'energia totale del fluido contenuto nel volume di controllo sommata al flusso netto di energia totale attraverso le facce del volume di controllo uguaglia la somma della potenza delle forze agenti sull'elemento di fluido e del flusso netto di energia termica trasmessa all'elemento di fluido per conduzione"*. Esprimendo questo concetto in forma analitica si ha che [13]:

$$\frac{dE}{dt} = q - P \quad (4.13)$$

Ove:

- $E$  è l'energia totale, esprimibile come il prodotto tra la densità  $\rho$  e l'energia totale normalizzata alla massa  $e_{tot}$ ;
- $q$  è il flusso termico trasmesso dall'esterno attraverso la superficie di controllo (convenzionalmente positiva poiché entrante);
- $P$  è la potenza meccanica che viene esercitata sull'esterno (negativa poiché con verso uscente).

Come prima fase, è necessario tradurre il primo termine con il teorema del trasporto e il teorema della divergenza:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho e_{tot} dV = \int_{V'} \frac{\partial(\rho e_{tot})}{\partial t} dV' + \int_{V'} \nabla \cdot (\rho e_{tot} \underline{v}) dV' \quad (4.14)$$

È necessario poi definire il termine del flusso termico: per farlo, si ricorre alla legge di Fourier che regola lo scambio di calore per conduzione. In (4.15), è possibile osservare nella forma vettoriale tale relazione espressa per un flusso termico specifico  $q''$ , ove  $T$  è la temperatura e  $k$  è la conduttività termica [14].

$$q'' = -k \nabla T \cdot (-\underline{n}) = k \nabla T \cdot \underline{n} \quad (4.15)$$

Dove  $\underline{n}$  è sempre il versore della superficie di controllo: poiché il suo verso è definito uscente dalla superficie, necessariamente bisogna invertire il segno per rispettare gli aspetti convenzionali. Estendendo quindi il concetto a tutta la superficie e ricordando nuovamente il teorema della divergenza si ottiene:

$$q = \int_{S'} k \nabla T \cdot \underline{\mathbf{n}} dS' = \int_{V'} \nabla \cdot (k \nabla T) dV' \quad (4.16)$$

Per definire l'espressione della potenza meccanica (P) si ricorre alla definizione proveniente dalla fisica classica  $P = \underline{\mathbf{F}} \cdot \underline{\mathbf{v}}$ . Ricordandosi poi che la forza si suddivide in due termini, di volume e di superficie, si può allora scrivere:

$$\begin{aligned} P &= \int_{V'} [(\rho \underline{\mathbf{f}}) \cdot \underline{\mathbf{v}}] dV' + \int_{S'} (\underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{\mathbf{v}}) \cdot \underline{\mathbf{n}} dS' = \int_{V'} [(\rho \underline{\mathbf{f}}) \cdot \underline{\mathbf{v}}] dV' + \int_{V'} \nabla \cdot (\underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{\mathbf{v}}) dV' = \\ &= \int_{V'} [(\rho \underline{\mathbf{f}}) \cdot \underline{\mathbf{v}}] dV' + \int_{V'} \nabla \cdot [(-p \mathbf{I} + \underline{\underline{\tau}}) \cdot \underline{\mathbf{v}}] dV' = \\ &= \int_{V'} [(\rho \underline{\mathbf{f}}) \cdot \underline{\mathbf{v}}] dV' + \int_{V'} [-\nabla \cdot (p \underline{\mathbf{v}}) + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}} \cdot \underline{\mathbf{v}})] dV' \end{aligned} \quad (4.17)$$

Con  $\underline{\underline{\tau}}$  sviluppabile come nella relazione (4.11). Unendo quindi tutti i termini e facendo attenzione ai segni della convezione, si ottiene l'equazione differenziale alle derivate parziali della conservazione dell'energia:

$$\begin{aligned} &\int_{V'} \frac{\partial(\rho e_{tot})}{\partial t} dV' + \int_{V'} \nabla \cdot (\rho e_{tot} \underline{\mathbf{v}}) dV' = \\ &= \int_{V'} \nabla \cdot (k \nabla T) dV' - \int_{V'} [(\rho \underline{\mathbf{f}}) \cdot \underline{\mathbf{v}}] dV' - \int_{V'} [-\nabla \cdot (p \underline{\mathbf{v}}) + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}} \cdot \underline{\mathbf{v}})] dV' \end{aligned} \quad (4.18)$$



# Capitolo 5

## La simulazione CFD

Con il termine CFD (Computational Fluid Dynamics) si identifica quell'insieme di procedure e metodi che, attraverso algoritmi e iterazioni svolti da software di calcolo (nel caso qui presentato FLUENT<sup>®</sup> by ANSYS<sup>®</sup>), permette di giungere ad una soluzione approssimata delle equazioni differenziali precedentemente descritte: ma come viene strutturata questa analisi? Quali sono le impostazioni necessarie da adempiere per far elaborare correttamente il programma? Come si interpretano i dati? Queste sono solo alcune domande alle quali si cercherà di dare risposta nei sottocapitoli seguenti: a valle di questi sarà presente un approfondimento dell'applicazione in transitorio, peculiarità di questo elaborato.

### 5.1 Generalità

Di base, le simulazioni CFD seguono le stesse fasi di attuazione: comprendere questo esoscheletro è importante per entrare nella filosofia del metodo e far propri i principi che definiscono questo approccio alla risoluzione.

Per la fluidodinamica computazionale si sfrutta il metodo di risoluzione ai volumi finiti (FVM): il dominio viene discretizzato in tanti volumi di controllo ove, attraverso le reciproche interazioni, vengono definiti dei legami conservativi di flusso tra una entità di discretizzazione e l'altra in virtù della loro adiacenza. Procedendo in questo modo, le equazioni differenziali alle derivate parziali vengono discretizzate in sistemi algebrici di più facile trattazione: a quel punto si procede con il calcolo numerico vero e proprio per associare al volume un determinato valore di parametro. Come si può intuire, l'approssimazione sta nel fatto che i

volumi non sono infinitesimi ma necessariamente finiti. Chiarito questo aspetto teorico, si delineano i vari passaggi per poter affrontare lo studio fluidodinamico nel modo corretto.

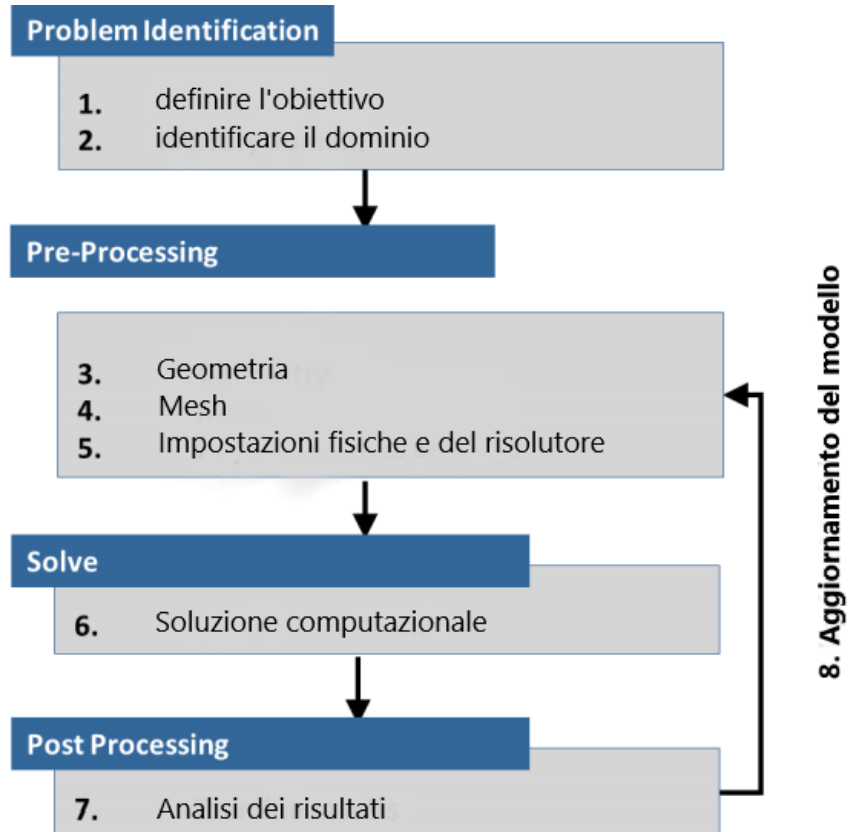


Figura 5.1: "esoscheletro" del calcolo computazionale (da "ANSYS Lecture 1.2: Overview of the CFD Process and Workflow").

Da come si può osservare dalla figura 5.1, la simulazione si attua con la realizzazione di 4 macropassaggi: identificazione del problema, pre-processing, risoluzione e post-processing. Queste fasi vanno necessariamente svolte nell'ordine così presentato, in quanto la mancata elaborazione di un punto esclude la possibilità di avanzamento nei vari livelli.

### 5.1.1 Identificazione del problema

Il primo passo di ogni simulazione deve essere quello di chiarire gli obiettivi e gli spazi che rappresentano il problema. Il tempo di calcolo e l'accuratezza sono i principali termini che muovono questa fase primaria: questi due però sono

sfortunatamente inversamente proporzionali, in quanto più il calcolo deve essere preciso maggiore sarà il tempo di elaborazione. Quest'ultimi possono anche essere molto dilazionati, a maggior ragione se si tratta una condizione non stazionaria con calcolatori non troppo potenti. Bisogna quindi, in prima mossa, definire un adeguato compromesso tra accuratezza e tempo di calcolo, aiutandosi attraverso semplificazioni geometriche (ad esempio, con le simmetrie) oppure assunzioni che però mantengano verosimile l'analisi. Altro aspetto non semplice è discendere il dominio d'interesse per i calcoli: definire dove esso inizia e termina permette di utilizzare una analisi più mirata, senza ledere sulla soluzione.

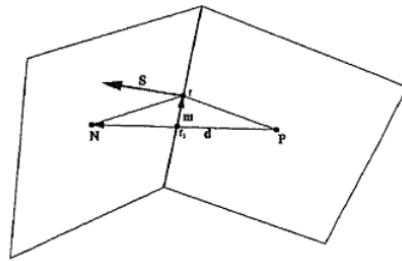
### 5.1.2 Pre-processing

Con il termine pre-processing si identificano una serie di procedure atte alla preparazione del soggetto dell'analisi alla sua risoluzione. In prima mossa, è richiesta la definizione della geometria: per il caso studio in questione, il modello è rappresentato da una sezione longitudinale della mezzeria del teatro (rappresentante la parte più significativa). La geometria è stata quindi importata da software CAD ad ANSYS® SpaCeClaim®, programma adatto per effettuare eventuali correzioni sul modello geometrico al quale si attueranno le simulazioni. Questo ultimo passaggio è stato svolto dalle Dott.sse Valentina Costa e Giulia Macciò [4]: le geometrie trattate in questa tesi sono eredità del loro lavoro.

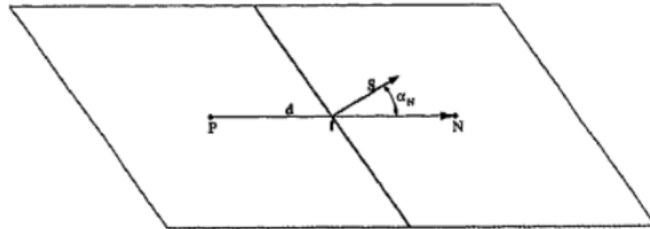
Segue la fase di discretizzazione, gergalmente riconosciuta con il termine "meshing": la mesh è un primo discriminante sulla buona (o cattiva) riuscita della soluzione. Tale può realizzarsi strutturata o non strutturata, se si realizzano celle rispettivamente quadrangolari o triangolari, in virtù di un adattamento migliore allo spazio offerto dalla geometria.

Quando le celle non sono adeguate, il risultato può essere errato e non verosimile. È chiaro che ciò vanificherebbe totalmente il lavoro eseguito fino a questo passaggio: si stima che la definizione dei volumi finiti debba richiedere circa il 30 % del tempo totale dedicato allo studio del caso. Tale attenzione è necessaria proprio per l'approssimazione che si attua andando a definire i volumi: la determinazione numerica delle grandezze sulle facce di questi viene generalmente valutata attraverso interpolazioni lineari eseguite lungo la congiungente  $\vec{d}$  di due centroidi di volumi adiacenti, in riferimento ai valori del parametro calcolati nei centroidi stessi.

In merito a ciò, si possono valutare due parametri che risultano essere significativi per la buona riuscita di una mesh: questa deve presentarsi nelle giuste conformazioni tali che attraverso le risoluzioni algebriche si possano avere delle caratterizzazioni delle interfacce corrette, essenziali nelle relazioni di semplificazione. Si parla allora di skewness quando il vettore  $\vec{d}$  non interseca la faccia nel suo centro: questo parametro, valutato come  $\frac{\vec{m}}{d}$  ove  $\vec{m}$  rappresenta il vettore che congiunge il centro della faccia e il punto d'intersezione con  $\vec{d}$  e l'interfaccia, permette di capire quanto una interpolazione è significativa nel rappresentare i termini sulla frontiera. Altro termine da tenere controllato è la non ortogonalità, definita attraverso la misura dell'angolo  $\alpha_N$  tra il vettore  $\vec{d}$  ed il vettore normale alla faccia  $\vec{S}$ . Tale angolo deve mantenersi il più piccolo possibile, in quanto nella semplificazione del calcolo il gradiente di un generica grandezza analizzata viene valutato sulla direzione di  $\vec{d}$ : poiché si deve realizzare l'ortogonalità tra gradiente ed interfaccia, si intuisce l'importanza del parametro di non ortogonalità. Quest'ultimo indice di qualità viene spesso indicato come prodotto scalare tra il vettore normale alla faccia e  $\vec{d}$ , normalizzato per il prodotto tra i moduli di questi: si ottiene così in definita il coseno dell'angolo  $\alpha_N$ , ove un valore vicino ad uno identifica una buona ortogonalità.



(a) skewness



(b) non ortogonalità

Figura 5.2: immagini esplicative dei vettori che definiscono skewness e non ortogonalità.

L'ultimo passaggio della fase di pre-processing viene caratterizzata dalla definizione dei modelli fisici ed, eventualmente, di turbolenza. L'assegnazione dei primi è variabile in virtù di molteplici fattori: in primo luogo, le analisi stazionarie o meno sfruttano equazioni che definiscono il problema diversamente, così come apporta una considerevole variabilità di casi se lo studio che si affronta è legato ad un liquido o ad una forma gassosa. Questa fase richiede anche di caratterizzare alcune proprietà del soggetto dell'analisi, quali ad esempio densità e viscosità, termini che entrano in gioco nelle equazioni di risoluzione. D'importanza è anche definire la tipologia prevalente di scambio termico, come la conduzione, l'irraggiamento e la convezione naturale o forzata oppure, se il problema lo richiede, una composizione di questi. Infine, se l'analisi presenta una condizione di moto di turbolenza, sarà altrettanto necessario definire i modelli di questi ultimi: le componenti fluttuanti di una generica grandezza causati da questa condizione caotica, a rigore risultano essere ricavabili analiticamente con notevoli difficoltà. Si riconoscono tre diversi approcci all'applicazione della modellizzazione turbolenta:

- **DNS (Direct Numerical Simulation)**: le turbolenze vengono risolte direttamente, senza sfruttare modelli, per ogni scala di vortice che si realizza: i costi di calcolo sono ingenti e proibitivi per casi in cui il numero di Reynolds è elevato;
- **LES (Large Eddy Simulation)**: si basa sulle osservazioni di Richardson in merito al trasferimento energetico tra masse vorticosi più ampie ad elementi più piccoli, fino a dissipare completamente l'apporto energetico su scale molecolari. In questo approccio vengono risolti numericamente solo i vortici più grandi e vengono modellizzate le strutture più modeste;
- **RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)**: è l'approccio più approssimativo ma che riesce a realizzarsi in tempi di calcolo modesti. Si tratta di caratterizzare le grandezze come medie su un determinato intervallo di tempo: si può quindi affermare che ogni parametro è riscrivibile come una componente media e un termine fluttuante. Quest'ultima componente è in generale ad una scala molto più piccola della parte media e questo quindi lo definisce con un'importanza minore, aspetto che permette di ridurre drasticamente i tempi di calcolo. Questo termine fluttuante va quindi modellato: per fare questo ci sono diverse possibilità come, ad esempio, i modelli a due equazioni  $k-\epsilon$  e  $k-\omega$ .

L'ultima tipologia descritta è quella più largamente applicata nelle simulazioni come nel caso del teatro Carlo Felice, per il quale viene appunto utilizzato l'approccio RANS con modello di turbolenza  $k-\epsilon$  "realizable", particolarmente adatto ove sono presenti getti d'immissione e concentrato sui meccanismi che hanno effetto sulla energia cinetica turbolenza.

### **5.1.3 Risoluzione e post-processing**

A valle di quanto descritto prima, si giunge alla fase di calcolo vera e propria che non esclude anch'essa alcune accortezze prima di essere avviata. Per quanto concerne agli studi di tipo tempo variante, il problema viene approcciato con due potenziali algoritmi di calcolo, che includono possibili iterazioni: il calcolo iterativo è necessario per la forte non linearità delle relazioni che sono altresì accoppiate, aspetto che complica ancora la risoluzione diretta. Posso avere uno schema di applicazione di tipo ITA se tutte le equazioni vengono risolte iterativamente, per un dato intervallo di tempo, fino a quando non vengono soddisfatti i criteri di convergenza; si definisce invece NITA (Non-Iterative Time-Advancement) l'approccio che non necessita di iterazioni esterne, eseguendo solo una singola iterazione esterna per passo temporale, il che accelera notevolmente le simulazioni transitorie: tuttavia, lo schema NITA consente ancora un'iterazione interna per risolvere il singolo insieme di equazioni. La scelta nel caso studio è stata fatta optando per quest'ultimo algoritmo, in unione con il metodo di soluzione PISO, particolarmente indicato per questo tipo di analisi.

Una volta completato il calcolo, è possibile passare alla fase di post-processing, ove si è in grado di poter analizzare i dati ricavati nel passaggio precedente. FLUENT<sup>®</sup> permette di fare svariati tipi di analisi, quali elaborazioni di diagrammi di variazione di generiche grandezze, "trame di contorno" ove è possibile osservare, ad esempio, zone a velocità più o meno elevate e riconoscere le linee di flusso che rimarcano l'aspetto fluidodinamico.

### **5.1.4 L'analisi in transitorio: peculiarità nell'approccio computazionale**

Sempre in riferimento all'approfondimento in merito alla simulazione CFD, si reputa necessario dare degli accenni in merito alla definizione dei parametri temporali, ovvero all'insieme degli input che guideranno il percorso di calcolo nello

scorrere del tempo. A priori della fase risolutiva, è importante definire l' "initial time" (tempo di inizializzazione, in quanto risulta necessario fissare lo zero temporale prima del calcolo) e il "total time" (tempo totale, ovvero il periodo completo dell' analisi): segue successivamente il riconoscimento del "time step" (è il passo temporale sul quale identificare, allo scorrere del tempo, le soluzioni stimate del problema), cruciale per il delineamento di una buona risoluzione.

La scelta del  $\Delta t$  è un discriminatore di una buona o cattiva riuscita del calcolo risolutivo, in quanto il passo deve essere abbastanza piccolo per risolvere nel modo adeguato il problema ma deve anche essere tale per garantire la stabilità nel passo stesso. In figura 5.3 è possibile capire facilmente come la scelta di un passo temporale errato può condurre ad una soluzione errata. Se tale è troppo grande infatti, la simulazione non è in grado di valutare i corretti cambiamenti di transitorio e il reale comportamento non viene risolto: un più piccolo  $\Delta t$  invece è in grado di portare soluzioni verosimili, ricordando però della diretta proporzionalità tra risoluzione e costi computazionali.

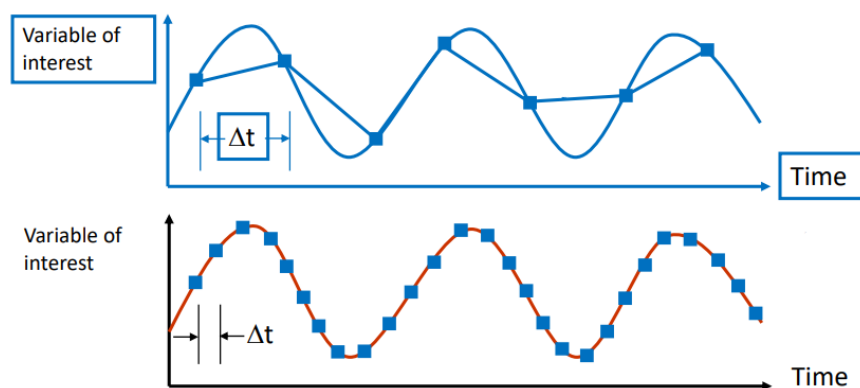


Figura 5.3: differenze con time step più o meno grande.

Per ottenere un adeguato step temporale si fa riferimento al numero di Courant, definito come  $\frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x}$  che rappresenta la velocità caratteristica del flusso moltiplicata per l'intervallo temporale, il tutto normalizzato alla dimensione tipica delle celle. Dalla relazione descritta precedentemente è evidente il significato di questo parametro: esso fornisce il numero di celle mesh attraversate nel passo  $\Delta t$ : è ovvio che per una buona risoluzione il numero di Courant deve attestarsi intorno al valore unitario ma in generale è accettato, per una corretta risoluzione, anche valori del parametro fino a 10. A livello pratico, gli approcci sul software FLUENT<sup>®</sup> possibili possono essere "CFL-based", ovvero viene fissato inizialmente il numero di

Courant e il software si adatta automaticamente con il passo temporale per tenersi al determinato target. L'alternativa (utilizzata in questa tesi) è il metodo "fixed", ovvero si definisce il passo temporale e si controlla il "cfl" (Courant-Friedrichs-Lewy, modo più generico di identificare la condizione sul numero di Courant) che non superi i valori definiti.



# Capitolo 6

## Aspetti normativi: confronti e risultati con il caso stazionario

Per concepire a pieno il problema della climatizzazione bisogna necessariamente richiamare quelli che sono i riferimenti normativi: in tali si possono riconoscere degli standard fisici e concreti, atti a delineare il concetto di comfort il quale non risulta, a priori, altrettanto facile da interpretare. Una volta note le peculiarità delle linee guida, si può passare a definire con occhio critico i risultati dello studio nel caso stazionario, punto di partenza per i successivi approfondimenti.

### 6.1 Standard normativi

Essendo il problema della climatizzazione e del comfort termico un aspetto molto soggettivo, le linee guida che contraddistinguono gli studi sono svariati: su tutti però si riconoscono gli standard ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) come i riferimenti che per la maggior parte guidano sia negli aspetti progettuali che di verifica [12], [15]. L'idea che sta alla base della realizzazione del comfort si può esprimere attraverso l'equazione di bilancio termoigrometrico:

$$\frac{\partial U_{c.u.}}{\partial \tau} = M - W - (C + R) - E_{diff} - E_{sw} - E_{ve} - C_{ve} \quad (6.1)$$

In cui:

- $\frac{\partial U_{c.u.}}{\partial \tau}$  = variazione temporale dell'energia interna del corpo umano;

- $M$  = metabolismo del corpo umano;
- $W$  = potenza meccanica scambiata corpo-ambiente;
- $C+R$  = potenza termica scambiata per convezione e irraggiamento sempre in riferimento corpo-ambiente;
- $E_{diff}$  = potenza termica scambiata mediante la diffusione del vapore sulla pelle;
- $E_{sw}$  = potenza termica per sudorazione;
- $E_{ve}$  = potenza termica dispersa attraverso la respirazione come calore latente;
- $C_{ve}$  = potenza termica dispersa attraverso la respirazione come calore sensibile.

Di conseguenza, la realizzazione di comfort si definisce quando si mantiene costante l'energia interna del corpo umano, ovvero  $\frac{\partial U_{c.u.}}{\partial \tau} = 0$ . L'equazione (6.1) diventa allora:

$$M - W = C + R + E_{diff} + E_{sw} + E_{ve} + C_{ve} \quad (6.2)$$

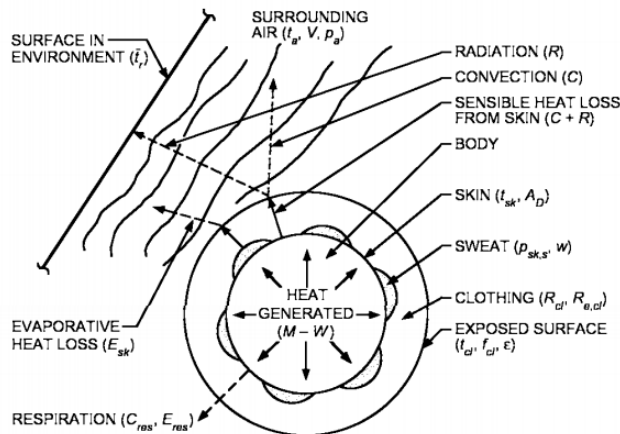


Figura 6.1: *interazione termica corpo umano-ambiente.*

Bisogna però precisare che la percezione di soddisfazione è un aspetto molto aleatorio e soggettivo, che elude la definizione descritta in precedenza: per questo

motivo, vengono introdotti i parametri PMV (voto medio previsto) e PPD (percentuale di insoddisfatti) che definiscono rispettivamente una valutazione (da -3 a +3) del comfort e una percentuale a priori di occupanti che ha percepito disagio dal clima interno.

Una delle prime correlazioni che ASHRAE propone riguarda l'equazione del livello di comfort, una relazione che identifica il termine  $Y$ : in funzione del sesso, del tempo di esposizione e dell'umidità, esso condensa in un unico termine il concetto di comfort generale. Se si considera un tempo di esposizione di 3 ore (durata comune per gli spettacoli al Carlo Felice) e si fa riferimento ad entrambi i sessi, si ha che:

$$Y = 0,243t + 0.278p - 6.802 \quad (6.3)$$

con  $t$  = temperatura ( $^{\circ}C$ ) e  $p$  = pressione di vapore ( $kPa$ ). Classificando quindi il risultato sulla scala di sensazione termica (-3 = freddo/+3 = caldo) si può avere una stima globale sulla comfort ambientale. Essendo però il problema incentrato sulla climatizzazione di un'area ben precisa (golfo mistico), è altresì importante avere dei riferimenti più specifici: in merito a questo, in seguito si riportano alcuni studi e standards che saranno di aiuto nella valutazione dei risultati stazionari.

Una grandezza da tenere sott'occhio è sicuramente l'umidità relativa: in condizioni affollate, la normativa stabilisce che tale deve assumere valori del 40 – 50%, per evitare lo sviluppo di batteri e virus con percentuali inferiori e disagi per numeri superiori. Oltre a questo aspetto, numerosi studi vengono trattati per la definizione del discomfort locale: primo fra tutti, la differenza termica testacaviglie. Se tale è sufficientemente grande, a livello locale può verificarsi un disagio, sebbene il corpo nel suo insieme sia termicamente neutro. A seguito di studi sperimentali, si è potuto definire il grafico in figura 6.2 il quale mostra, al crescere della differenza della differenza di temperatura, l'incremento della percentuale di insoddisfatti: sempre da normativa, il valore di PPD deve attestarsi per valori inferiori al 20 – 25% che allora fanno subito intuire che il massimo gradiente termico ammissibile è di 3  $^{\circ}C$ .

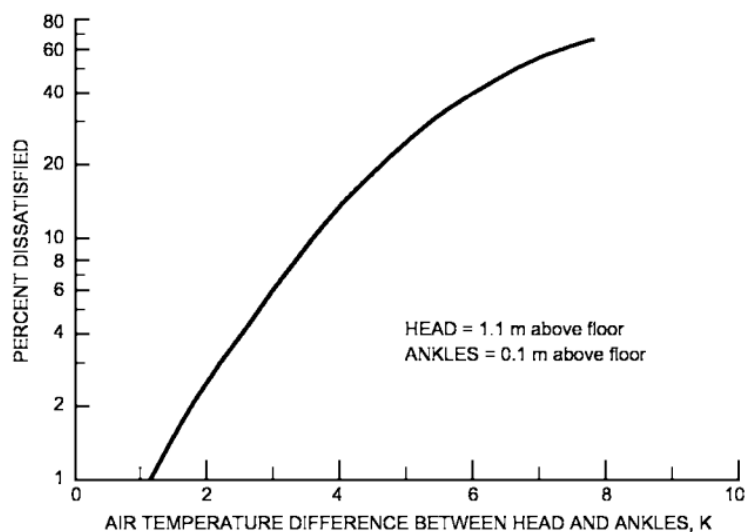


Figura 6.2: *diagramma differenza termica - PPD.*

Altro concetto da tenere in considerazione è la velocità dell'aria: essa può essere fonte di disagio e per questo va controllata e limitata. In riferimento alla figura 6.3, si può osservare che le due componenti della coppia velocità aria-temperatura possono potenzialmente identificare la stessa perdita di calore: le curve infatti rappresentano la differenza tra temperatura media radiante (temperatura di un ambiente fittizio termicamente uniforme che scambierebbe con l'uomo la stessa potenza termica radiante scambiata nell'ambiente reale) e temperatura dell'aria. Si osserva quindi che quando la temperatura  $t_a$  è minore di  $t_r$ , si necessitano velocità maggiori per ottenere certi valori di incremento termico.

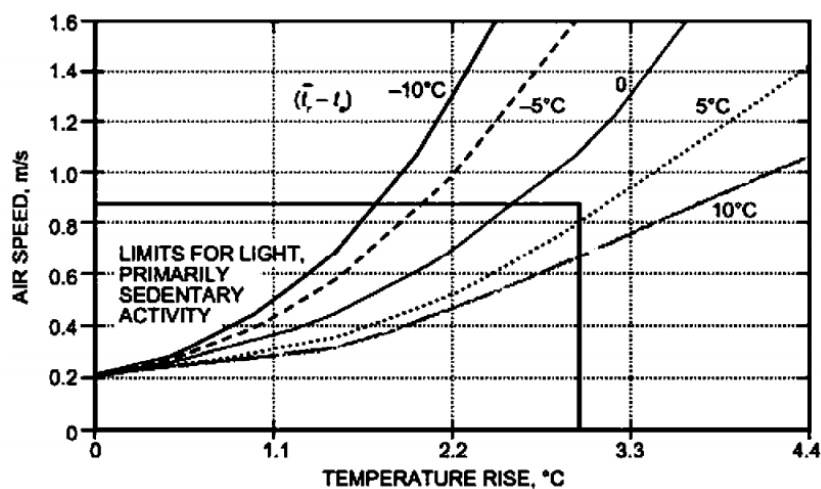


Figura 6.3: *diagramma velocità-temperatura.*

Il problema della velocità dell'aria non si ripercuote soltanto su disagi di tipo termico, ma tale può portare alla generazione di lame d'aria, ovvero correnti d'aria che possono essere davvero fastidiose e potenzialmente possono vanificare tutti gli accorgimenti visti sopra. Infatti, in figura 6.4, si può percepire come l'instaurarsi di una particolare velocità porti a richiedere un incremento termico, in virtù del bilancio analizzato in precedenza: le curve rappresentano, in questo caso, la funzione velocità media dell'aria-percentuale di insoddisfatti al variare della temperatura in quanto, come visto precedentemente, essa influenza notevolmente la sensazione di potenziale comfort.

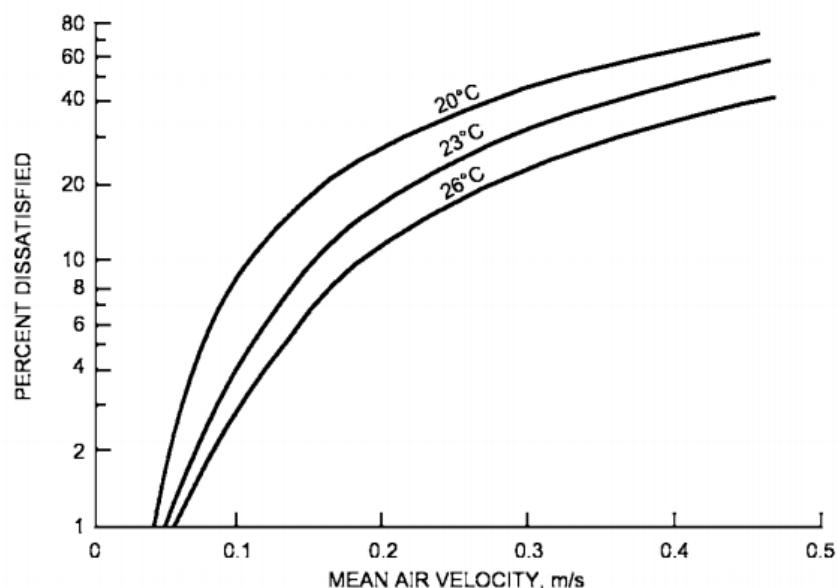


Figura 6.4: *diagramma velocità-PPD*.

Numerosi studi sperimentali sull'effetto della velocità dell'aria su tutto il corpo hanno dimostrato accettabile, in ambienti neutri, velocità dell'aria minori o uguali a  $0,15-0,25 \frac{m}{s}$ : non esistono limiti inferiori se non per definire problemi di ristagno d'aria e ricircolo in genere.

Le osservazioni sopra riportate fanno riferimento a condizioni di tipo stazionario; tuttavia, si pone la questione se gli standard sopra descritti vadano bene anche per l'applicazione in regime variabile. In particolare, si sono riscontrate alcune precisazioni legate a 2 aspetti che intercorrono appunto nel caso instazionario: i cicli di temperatura e le "derive" o "rampe" di termiche. In particolare, le norme ISO [16] definiscono come cicli di temperatura le oscillazioni periodiche

di quest'ultima: se non si verificano differenze di picchi superiori ad 1 K, non c'è influenza sul comfort. Per "derive" o "rampe" di temperatura si fa riferimento alla velocità di variazione termica in ascendenza (rampa) o discendenza (deriva): se tale risulta essere inferiore a 2 K/h, le osservazioni stazionarie sono valide. Per condizioni tempo varianti si può concludere che risulta immediato l'avvertimento della variazione termica operativa e che quindi bisogna prestare particolare attenzione a questa e che, anche a livello normativo, esiste una non trascurabile differenza dal caso stazionario.

## 6.2 L'analisi stazionaria: descrizione e risultati

Come punto di partenza occorre fare delle osservazioni sui risultati ottenuti dallo studio stazionario trattato dalle Dott.sse Valentina Costa e Giulia Macciò [4]: queste analisi sono state condotte su diverse configurazioni che definiscono il problema in svariati contesti. Sono stati introdotti 7 casi bidimensionali (sezioni longitudinali della mezzera del teatro) e un caso tridimensionale:

- **Caso 1:** è il caso più semplice: si considera il teatro vuoto e senza poltrone, con solo la presenza dei diffusori. Sempre al caso 1 appartiene anche lo studio condotto nelle stesse configurazioni geometriche ma con le portate normalizzate all'unità di profondità. In conclusione, è stata portata un'analisi ipotetica con sistema di climatizzazione OHAD (OverHead Air Distribution System) anziché utilizzare il sistema UFAD (UnderFloor Air Distribution) esistente.
- **Caso 2:** geometria avente diffusori e blocchi rettangolari rappresentanti solo le persone in platea;
- **Caso 3:** condizione rappresentante diffusori, le persone in platea e blocchi sempre rettangolari caratterizzanti i musicisti nel golfo mistico;
- **Caso 4:** geometria rappresentante i diffusori e le persone in platea ma con l'aggiunta delle poltrone schematizzate con un profilo ad L di spessore 5 cm;
- **Caso 5:** rispecchia il caso 4 con l'aggiunta dei blocchi orchestrali;
- **Caso 6:** è definito come il caso 5 ma include anche la schematizzazione delle scene, le quali sono identificate come rettangoli spessi pochi millimetri;

- **Caso 7:** geometria identica al caso 6 ma, al contrario delle precedenti sei simulazioni che immettevano aria alla temperatura di  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  canonici, qui avvengono mandate con aria alla temperatura di  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- **Caso tridimensionale:** geometria rappresentante la porzione centrale del teatro di spessore 10 m, nel quale sono collocati i diffusori, le persone in platea e nel golfo mistico con annesse poltrone.

Si passa dunque ad analizzare le soluzioni di ciascun caso, ponendo particolare attenzione alla fossa orchestrale, fulcro del problema della climatizzazione.

### 6.2.1 Caso 1

Il caso 1 rappresenta una sorta di inizializzazione, un caso comprendente solo i termini architettonici senza includere persone o arredamento. Esso, come già sopra precisato, si compone di tre condizioni differenti che però hanno condotto alla soluzione ovvia sul campo di temperatura: non essendoci particolari condizioni termiche, la temperatura si attesta sui 288 K, misura con la quale l'aria viene immessa nella sala (figura 6.5).

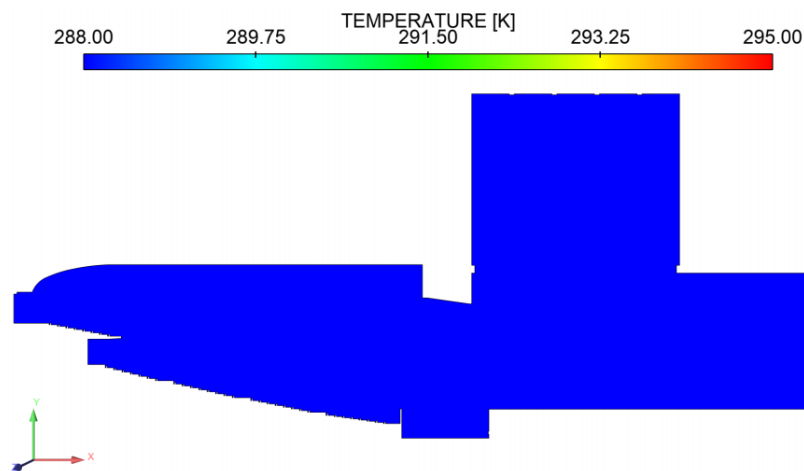


Figura 6.5: *caso 1 - campo di temperatura.*

Meno prevedibile invece il risultato ottenuto, per i vari casi, nei riguardi della velocità: nella condizione con le portate tridimensionali, si è ottenuto il risultato in figura 6.6.

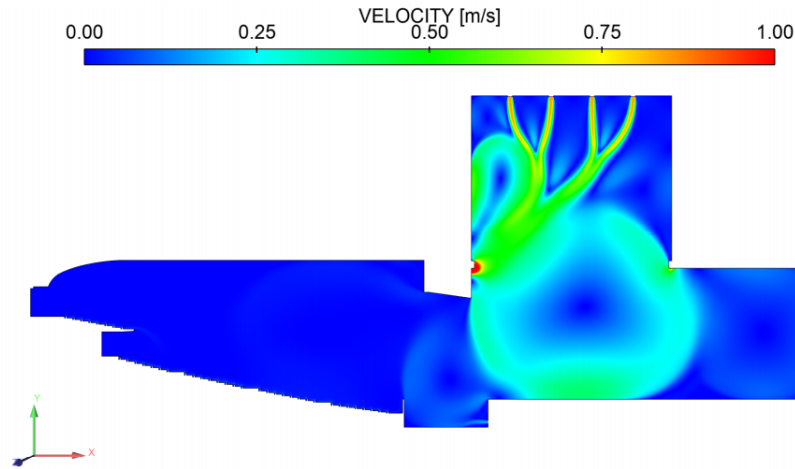


Figura 6.6: *caso 1.1 - campo di velocità.*

In questo caso si evidenziano due caratteristiche importanti: nella platea, l'architettura non favorisce un movimento d'aria e tale potrebbe essere un problema per il ristagno e la qualità della stessa mentre nella zona utilizzata dai musicisti e attori si manifestano dei vortici con velocità al di sopra della soglia dei  $0,15-0,25 \frac{m}{s}$ , parametri evidenti soprattutto nella fossa orchestrale.

Operare invece tenendo conto della geometria bidimensionale, ovvero normalizzando le portate di inlet all'unità di profondità corrispondente, porta ad ottenere risultati leggermente diversi ma più rigorosi (figura 6.7).

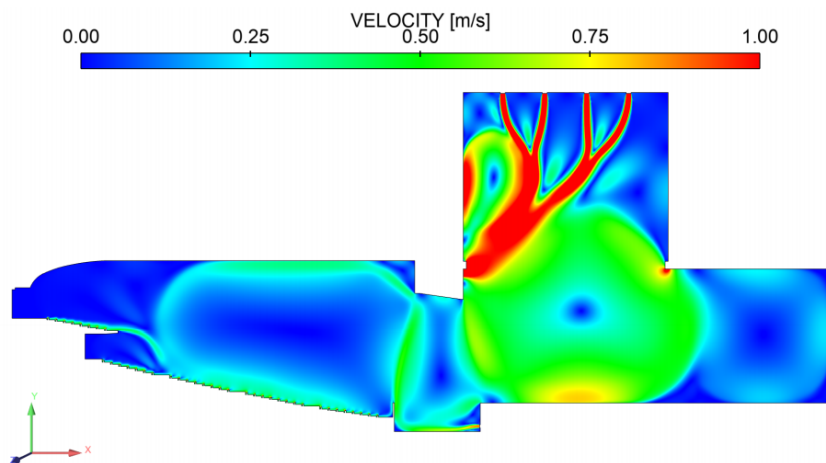


Figura 6.7: *caso 1.2 - campo di velocità.*



Si osserva in particolare che il problema riscontrato in precedenza in platea qua non si ripresenta: al contrario, si vengono a generare delle velocità al limite di comfort. Altrettanto interessante invece è osservare che, questa modifica, ha portato un forte accentuamento dei vortici descritti in precedenza: operare con le portate tridimensionali non rappresenta un'analisi in favore di sicurezza.

Per ultimo, per vedere se le ventilazioni della platea sono dipendenti dal sistema torre scenica-golfo mistico, si sono modificati gli impianti di climatizzazione con mandata superiore e ripresa nella parte inferiore: sono state realizzate 38 bocchette di immissione sul soffitto di cui 5 sotto la balconata della galleria. Partendo dal fondo, le prime 5 file sono composte da 5 bocchette mentre le ultime due da 4: 5 elementi per la fila speciale sotto la galleria.

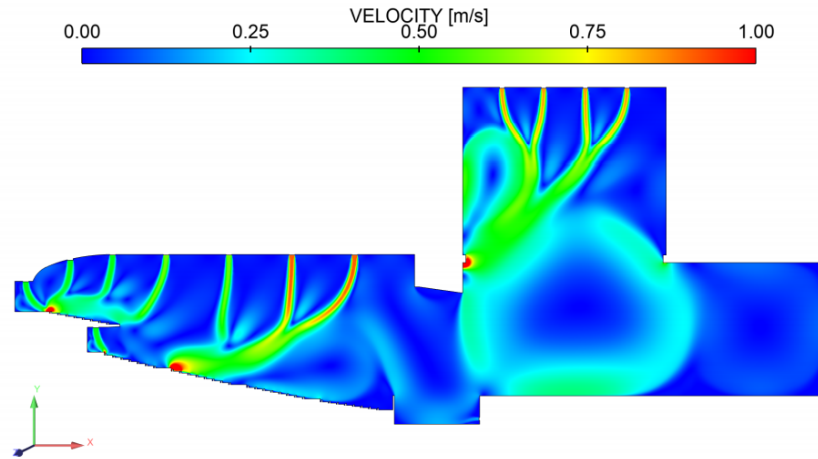


Figura 6.8: *caso 1.3 - campo di velocità.*

Dall'immagine 6.8 risulta evidente che i sistemi di climatizzazione non si influenzano a vicenda. Questa analisi rimarca anche come il sistema di climatizzazione tradizionale sia meno funzionale del sistema UFAD: inoltre, tale comporta anche lo sviluppo di velocità di  $1 \frac{m}{s}$  che sono ben al di sopra del limite a  $0,25 \frac{m}{s}$ .

## 6.2.2 Caso 2

Nel caso 2 si introducono gli spettatori, entità che rappresentano delle sorgenti termiche interne. La loro schematizzazione avviene attraverso un rettangolo di dimensioni 70x40 cm, valori atti a riprodurre una superficie esposta come quella offerta della pelle. La sorgente termica viene fissata al valore di  $60 \frac{W}{m^2}$ : quest'ul-

timo aspetto comporta delle modifiche sostanziali dal caso 1 per quanto concerne il campo di soluzione termico (figura 6.9).

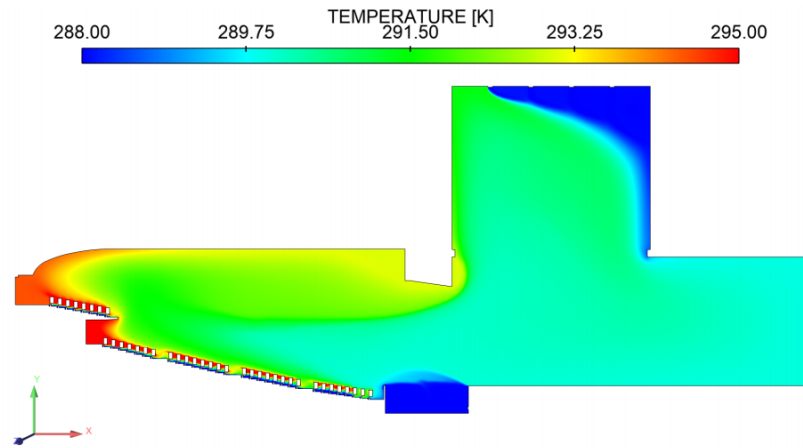


Figura 6.9: *caso 2 - campo di temperatura.*

In generale si riconosce un incremento termico quasi dappertutto, tranne proprio nella fossa mistica dove la temperatura non riesce ad aumentare dal suo valore di immissione a 288 K: non si riscontrano, di contro, particolari gradienti termici testa-caviglie.

In merito alle velocità invece si fa riferimento alla figura 6.10: la presenza di persone influisce negativamente sul palcoscenico dove si localizza un'area vasta con velocità a  $0,5 \frac{m}{s}$  sopra al limite massimo. Altro aspetto d'importanza è che nel golfo mistico risulti essere più nitido il vortice ai limiti degli standard: il problema inizia a concretizzarsi, anche perché si evidenzia inoltre che le masse d'aria della platea e della parte scenica sembrano più dipendenti l'una dall'altra.

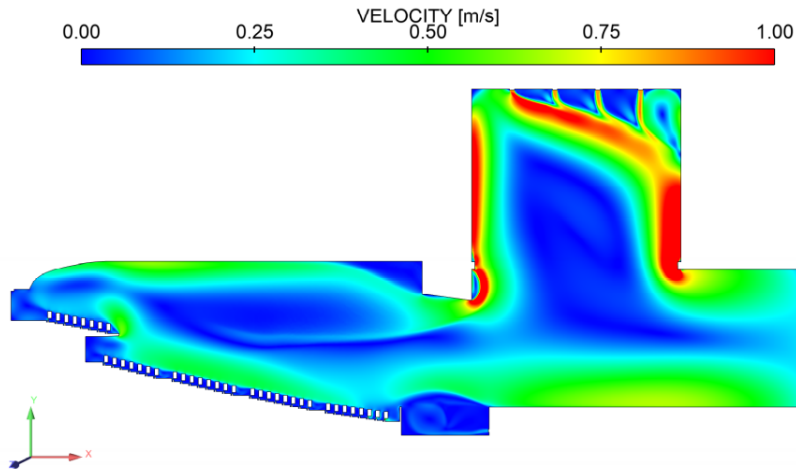


Figura 6.10: *caso 2 - campo di velocità.*

### 6.2.3 Caso 3

Si sono poi introdotti gli orchestrali, aventi le stesse caratteristiche delle persone in platea. Un dato interessante osservato è che, per ovvie ragioni, le temperature nella fossa mistica si sono alzate a valori 291-292 K unificandosi con quanto presente fuori dal golfo mistico. Si deve però sottolineare come insista, in questo caso, un gradiente termico testa-caviglie che potrebbe portare a disagio (figura 6.11): soprattutto per la fila di musicisti più prossimi alla bocchetta di ingresso dell'aria, si generano variazioni termiche pari a  $293 - 288 = 5 \text{ K}$ , sopra al limite di 3 K.

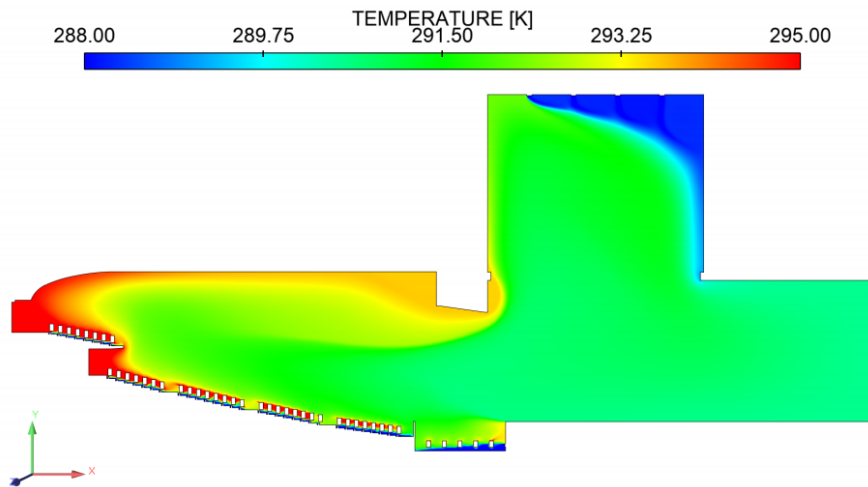


Figura 6.11: caso 3 - campo di temperatura.

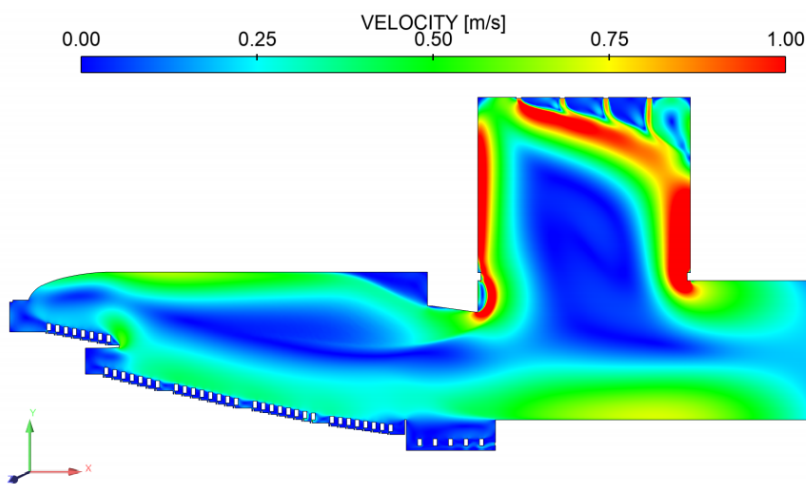


Figura 6.12: caso 3 - campo di velocità.

Nessuna particolare modifica rispetto il caso 2 per quanto concerne le velocità (figura 6.12).

#### 6.2.4 Caso 4

Come precedentemente detto, nel caso 4 si aggiungono alla condizione 2 le poltrone che è noto, anche dalla letteratura presente, influenzare sia la temperatura che il flusso d'aria. Per quanto riguarda la prima, in figura 6.13 si possono vedere i risultati: il campo termico sembra essersi riscaldato su valori più bassi, rimarcando

però il fatto che nel golfo mistico insista una zona ove non si sviluppa incremento di temperatura, aspetto già chiarito in precedenza.

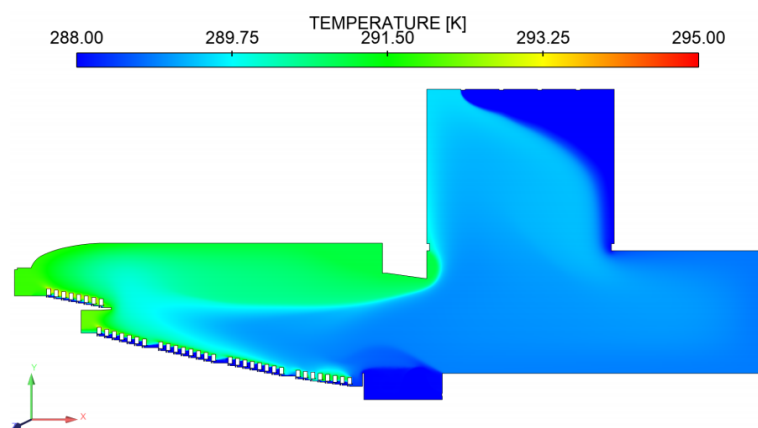


Figura 6.13: caso 4 - campo di temperatura.

Anche le velocità sembrano ostacolate dalla presenza delle poltrone: rimane però una riduzione minimamente marcata, che non permette di avere la realizzazione completa degli standard normativi.

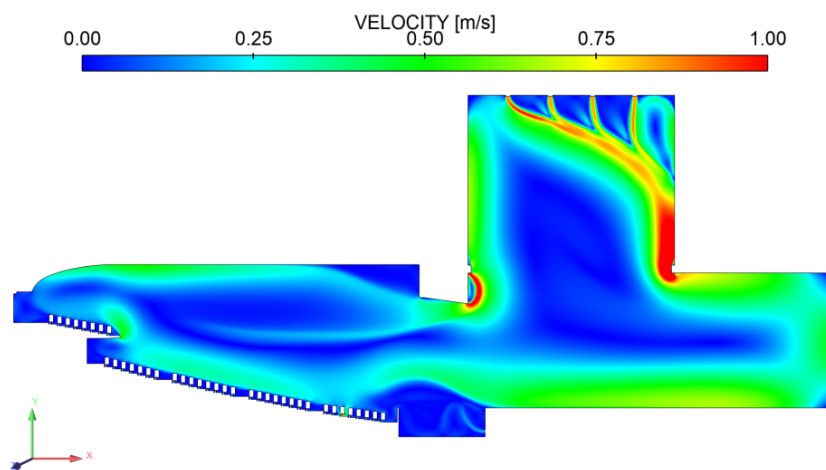


Figura 6.14: caso 4 - campo di velocità.

## 6.2.5 Caso 5

Il caso 5 ricalca il caso 3 ma sempre con l'aggiunta di poltrone: l'influenza di queste è possibile osservarla nelle figure 6.15 e 6.16, soluzioni rispettivamente di

temperatura e velocità.

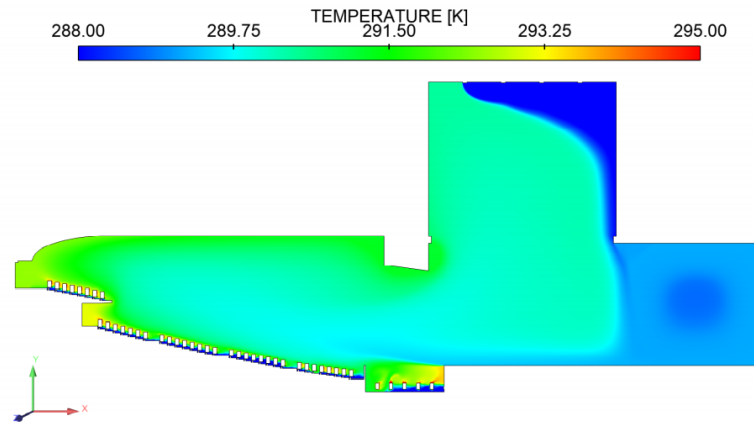


Figura 6.15: *caso 5 - campo di temperatura.*

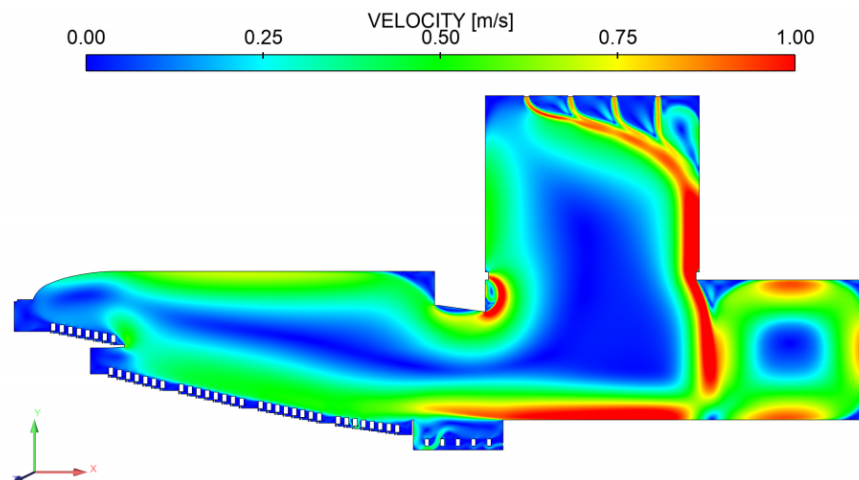


Figura 6.16: *caso 5 - campo di velocità.*

Nella prima immagine si può osservare come la collocazione delle poltrone non influenzi particolarmente il problema del gradiente termico testa-caviglie già discusso: questo aspetto porta nuovamente a concretizzare il disagio denunciato dai musicisti. Dal campo di velocità invece, si può osservare nuovamente la nascita del vortice che contraddistingue la parte scenica e la platea, qua però presentato con velocità molto importanti ( $1 \frac{m}{s}$ ).

## 6.2.6 Caso 6

La condizione del caso 6 introduce i pannelli scenici posti sulla sommità della torre: tali, a priori, potrebbero influenzare la climatizzazione come, ad esempio, incanalando l'aria dalle bocchette d'immissione nella torre scenica. Potenzialmente tali potrebbero anche "rompere" il vortice critico già descritto nei casi precedenti, ovvero quello che include la sala e la parte scenica. Dal punto di vista termico non si riscuotono grandi cambiamenti (figura 6.17, se non un'attenuazione della temperatura in genere. Interessante invece i risultati ottenuti in figura 6.18 sul campo di velocità: le scene non incanalano il flusso ma fanno generare dei vortici tra i pannelli stessi e inoltre non modificano la definizione del grande vortice che viene a crearsi tra palcoscenico e platea: permane quindi il problema anche nella condizione di modellizzazione più raffinata.

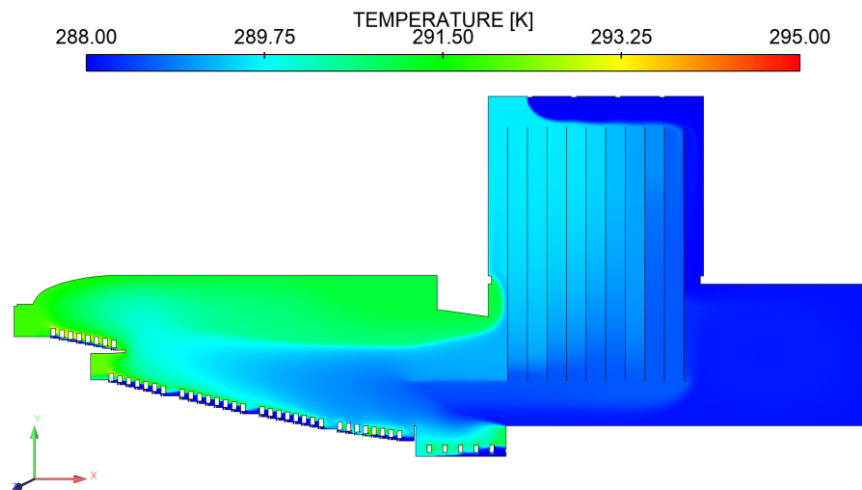


Figura 6.17: caso 6 - campo di temperatura.

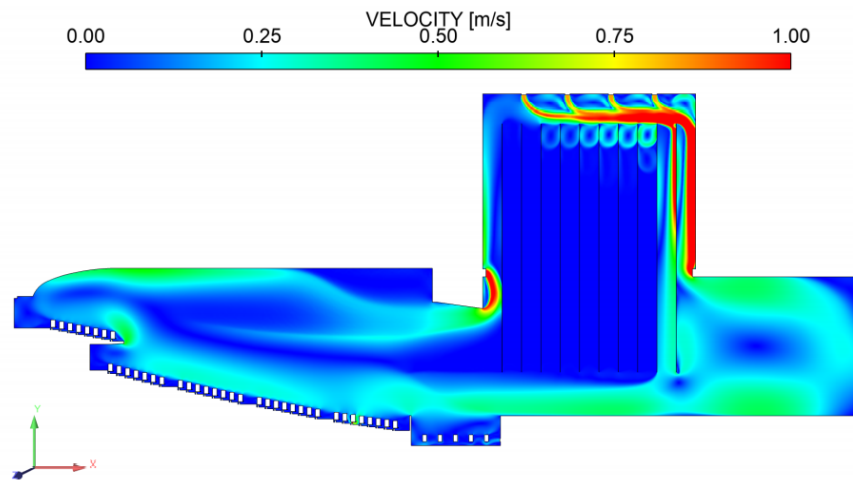


Figura 6.18: caso 6 - campo di velocità.

### 6.2.7 Caso 7

Ultimo dei casi bidimensionali, il caso 7 prende le geometrie del caso 6 ma modifica la temperatura di immissione: dai dati forniti dalla "Fondazione Teatro Carlo Felice" la temperatura di immissione utilizzata fino ad ora è pari a 288 K (15 °C), la quale viene ipoteticamente modificata a 293 K (20 °C) misura che rientra maggiormente negli standard.

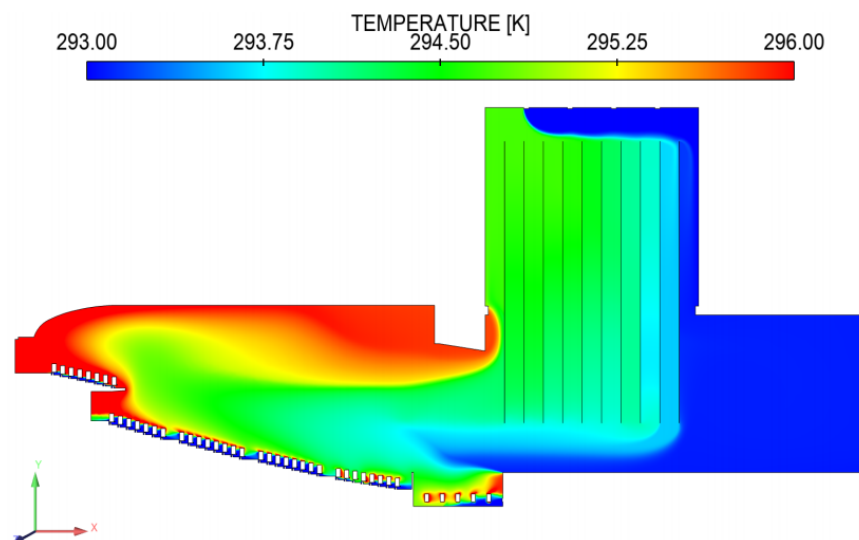


Figura 6.19: caso 7 - campo di temperatura.



Si può osservare, dalla figura 6.19, che fornire un incremento termico all'aria in ingresso comporta uno sviluppo di gradienti termici importanti soprattutto nella fossa mistica, soggetto principale del problema. Si vengono inoltre a formare delle vaste zone calde a 296 K sopra tutta la platea, delineando una grande eterogeneità con il resto della sala.

Nei termini di velocità invece, l'immissione a 293 K porta ad una attenuazione delle velocità, fenomeno in qualche modo legato alla convezione naturale.

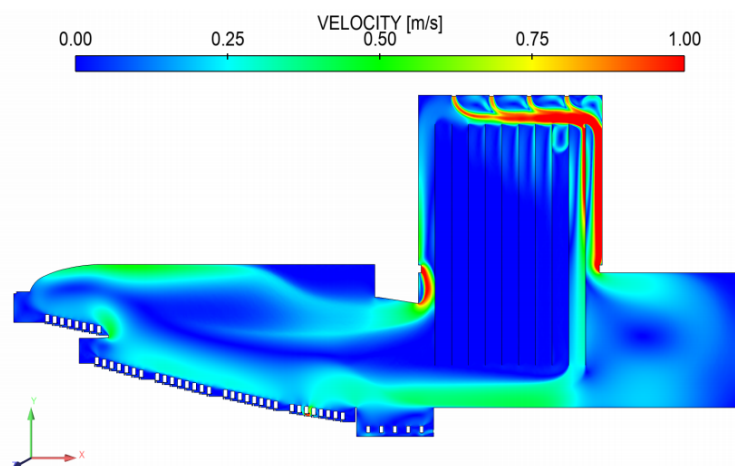


Figura 6.20: caso 7 - campo di velocità.

### 6.2.8 Caso tridimensionale

Come ultimo caso, le Dott.sse Valentina Costa e Giulia Macciò hanno approfondito l'aspetto tridimensionale e come tale influenzato gli studi. Sono state riconosciute sette sezioni significative: due in corrispondenza della mezzeria delle bocchette di immissione dell'aria della torre (A1-A2) e quattro nella mezzeria delle bocchette della fossa degli orchestrali (B1-B2-B3-B4) e infine una (C1) nella mezzeria del volume completo.

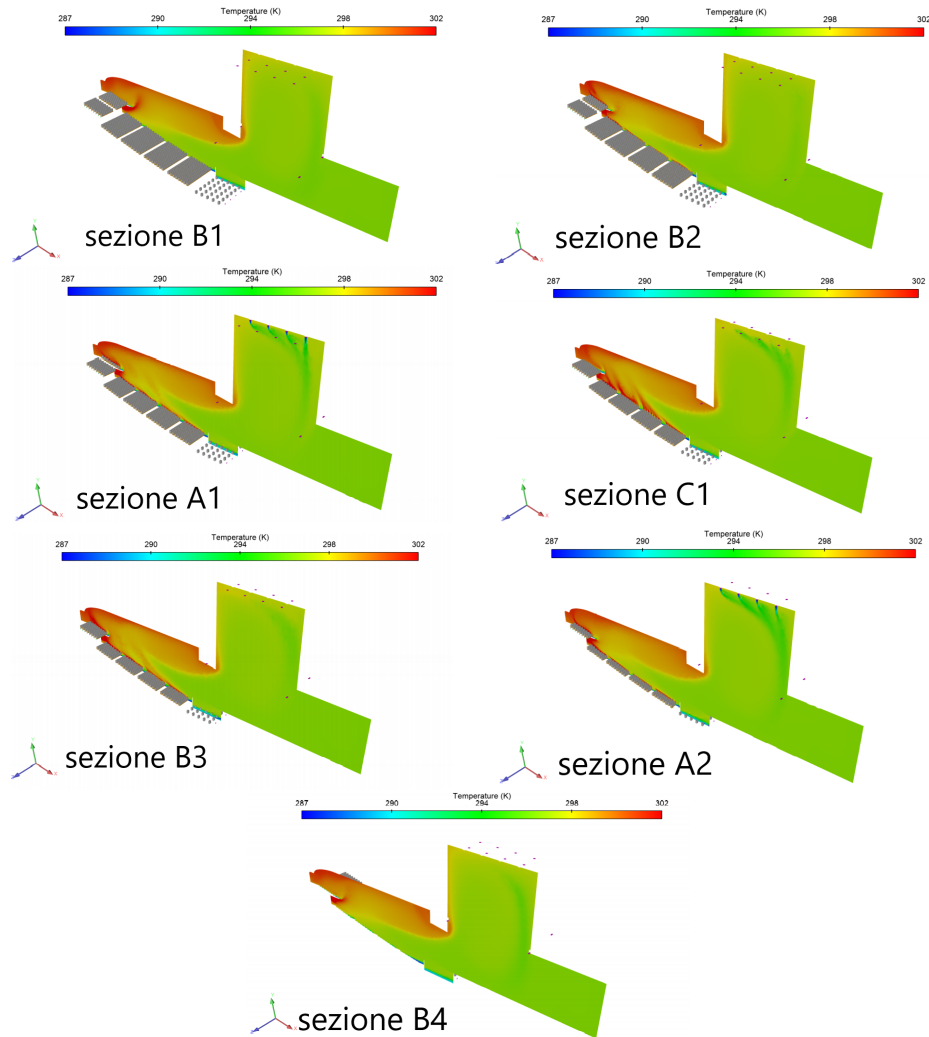


Figura 6.21: *caso tridimensionale - campo di temperatura.*

Da come si evince dalle figure 6.21, la tridimensionalità conferma quanto visto negli aspetti bidimensionali: importanti gradienti termici vengono a generarsi, producendo una forte eterogeneità che favorisce il moto di grandi masse convettive. Risulta particolarmente evidente la stratificazione termica che si realizza nella platea, raggiungendo anche valori particolarmente critici per le parti più superiori.

Tutti questi aspetti in qualche modo motivano anche i vortici che tendono a generarsi nel teatro, facendo sempre riferimento ai moti convettivi espressi nelle figure 6.22.

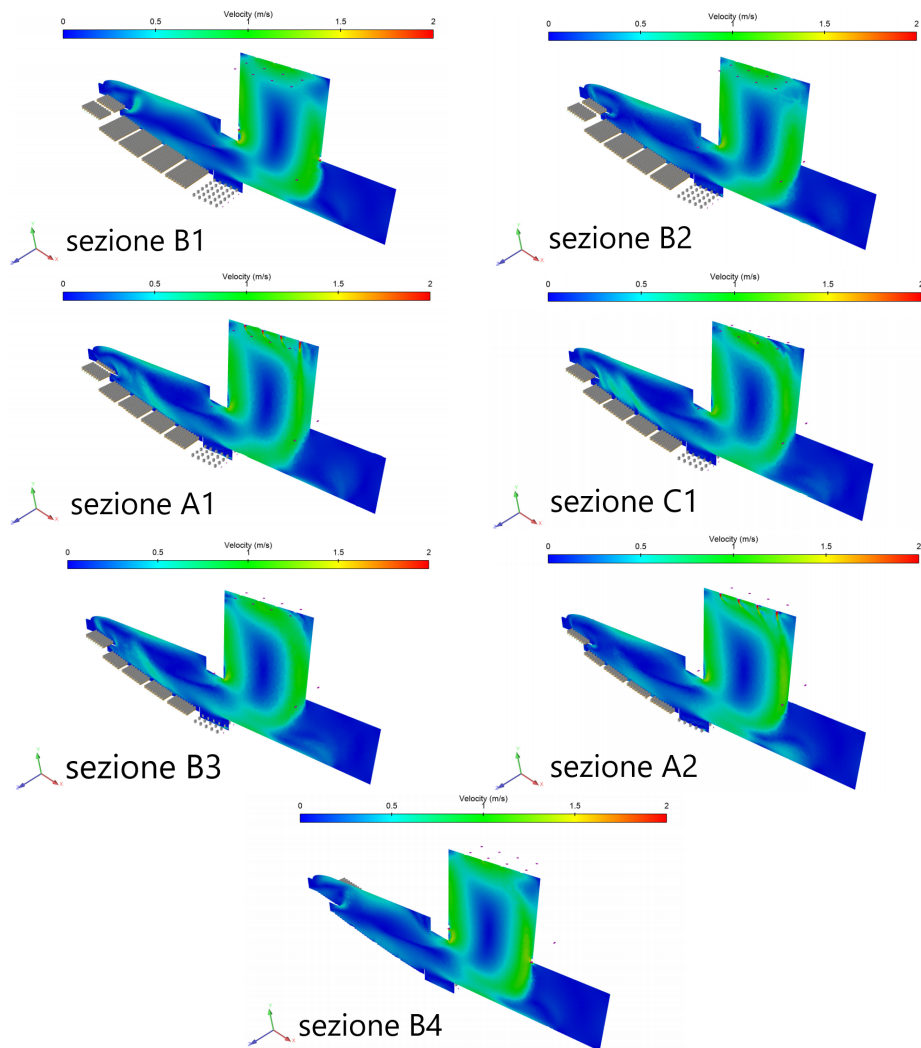


Figura 6.22: *caso tridimensionale - campo di velocità.*

In conclusione, questo capitolo chiarisce la necessità di un'analisi più approfondita, in quanto le simulazioni numeriche nel caso stazionario hanno effettivamente evidenziato ciò che era stato dichiarato. Lo studio deve quindi proseguire per vie instazionarie, in quanto la turbolenza sopra rappresentata è ben lontana dall'essere indipendente temporalmente.

# Capitolo 7

## Risultati dell'analisi transitoria

In questo capitolo di conclusione si presentano le simulazioni instazionarie fatte per tre casi studio differenti in merito al problema di climatizzazione del teatro Carlo Felice di Genova. Le condizioni scelte sono state le seguenti:

- **caso 1:** è l'equivalente del caso stazionario trattato nella tesi [4]. Esso mantiene l'obiettivo che lo ha fatto concepire, in merito soprattutto all'aspetto di inizializzazione: a valle dello studio con questa configurazione infatti, sia nel caso stazionario che transitorio, si è in grado di dare un primo delineamento della tempistiche di simulazione e riconoscere una prima soluzione che permetta di materializzare il fenomeno ancora incognito.
- **caso 2:** come per il caso 1, nella seconda configurazione si riprende il caso 2 trattato però con simulazioni transitorie. Si ricorda che questa configurazione presenta il contributo dato dalla presenza di persone in platea, le quali già nella tesi [4] apportavano delle differenze sostanziali rispetto il caso di teatro vuoto.
- **caso 3:** questa configurazione è una peculiarità di questa tesi, definita in seguito alle osservazioni che sono state fatte sui risultati stazionari e transitori. I problemi riguardanti la generazione di un'importante vortice che include tutto il contorno del teatro e all'accumulo di aria calda che si viene a generare sopra la platea potrebbero essere facilmente risolti facendo utilizzo di una apertura presente sopra l'arco scenico già esistente per contesti di emergenza incendio.

## 7.1 Strategia dell'analisi

Un primo aspetto che bisogna sottolineare riguarda la strategia con la quale si affronteranno i problemi instazionari, ovvero definire come e che tipo di dati saranno necessari ma soprattutto capire quando una simulazione non stazionaria può ritenersi conclusa. Per questo ultimo aspetto, considerando i già esistenti studi in regime stazionario, si è pensato di ritenere esaustivo l'analisi quando i vari parametri che saranno soluzione del problema si conserveranno mediamente invariati nello scorrere del tempo: in altri termini, questo rappresenta l'informazione che il comportamento del flusso risulti sempre analogo al variare del tempo, indice del raggiungimento di una indipendenza temporale.

Un quesito però che ci si è posti è come ottenere i dati, in particolare di temperatura e velocità, alla variazione del flusso temporale: l'approccio è stato quello di identificare, in tutto il dominio del teatro, dei punti di misurazione notevoli. Come una sorta di sensori "virtuali", questi ultimi hanno graficato le variazioni rispetto il tempo di velocità e temperatura, utili sia per il confronto con i risultati stazionari che per attuare valutazioni dal punto di vista normativo. Tramite FLUENT<sup>®</sup>, è possibile definire questi punti per i quali poi si possono disegnare grafici di qualsiasi grandezza, assegnabile direttamente nella "definizione dei report".

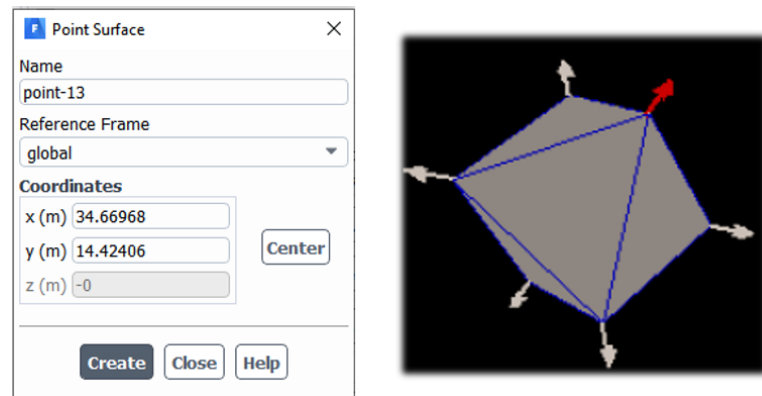


Figura 7.1: creazione e forma del point tool: si attueranno dei "vertex average" per definire univocamente il parametro di soluzione.

## 7.2 Caso 1

Come primo caso analizzato si è voluto approfondire in termini transitori l'equivalente prima configurazione trattata in modo stazionario: in particolare, tra le tre condizioni studiate dalle Dottoresse Macciò e Costa, si è scelta la casistica in cui le condizioni al contorno di immissione presentano le portate tridimensionali: è possibile ritrovare i riferimenti sulle condizioni al contorno al capitolo 3 che tratta in modo approfondito le caratteristiche tecniche dell'impianto di climatizzazione del teatro. Si ricorda che questo caso presenta solo elementi architettonici, cosa che rende questo problema di per sé poco significativo ma utile per dare un primo delineamento della soluzione: è noto infatti che gli arredi e la presenza di persone influisce in modo sostanziale nella dinamica in gioco, cosa che risulterà evidente nei casi seguenti.

Si è poi scelto di sfruttare la mesh utilizzata nel caso stazionario: questa si presenta con 428588 elementi e 886041 nodi, con grandezza media di 0,1 m e raffinamenti locali a 0,01 m, vicino alle bocche di mandata. La qualità di questa, come già denotato nella tesi [4], si presenta molto bene in termini di skewness e ortogonalità, come si può osservare nelle figure 7.2 e 7.3: lo skewness si attesta a valori pressoché nulli, senza mai superare 0,5, mentre l'ortogonalità si attesta su valori per lo più superiori a 0,8.

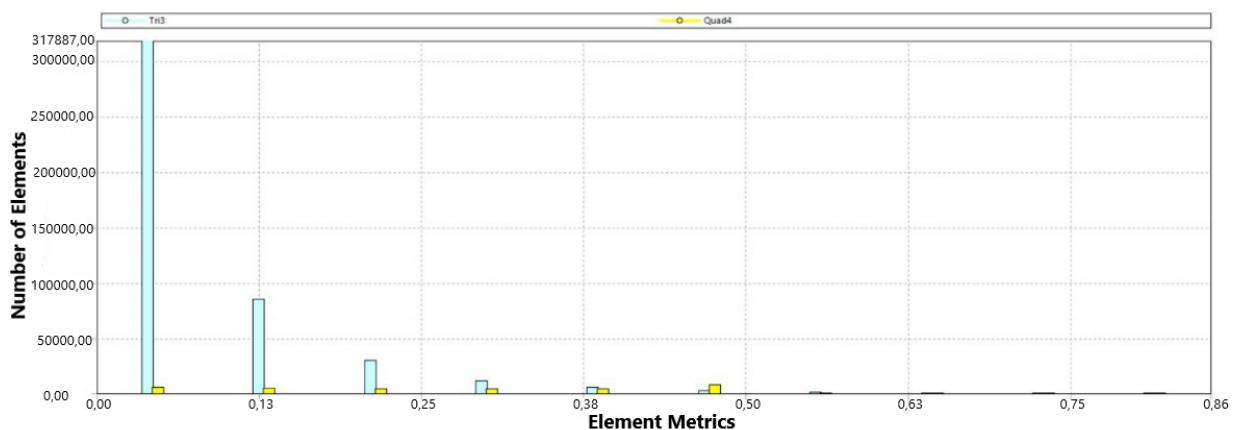


Figura 7.2: *grafico dello skewness per la mesh del caso 1.*

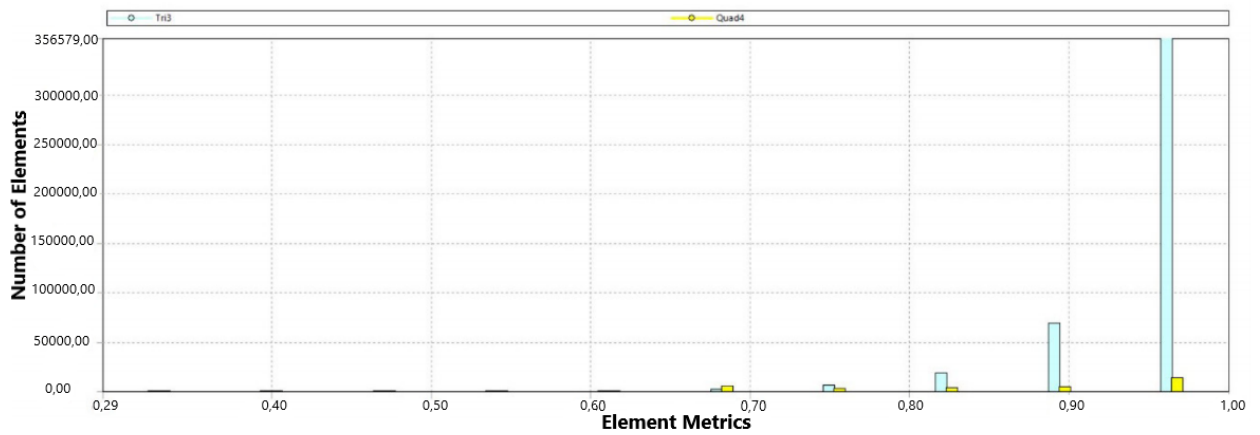


Figura 7.3: grafico dell' ortogonalità per la mesh del caso 1.

Prima di avviare il caso, come precedentemente descritto, si sono definiti i punti significativi ove "misurare" le grandezze fisiche utili a fare una valutazione sul comfort e anche per effettuare un confronto con i risultati stazionari: in merito a questo, si è scelto di definire la variazione di velocità e la temperatura per i punti rappresentati in figura 7.4.

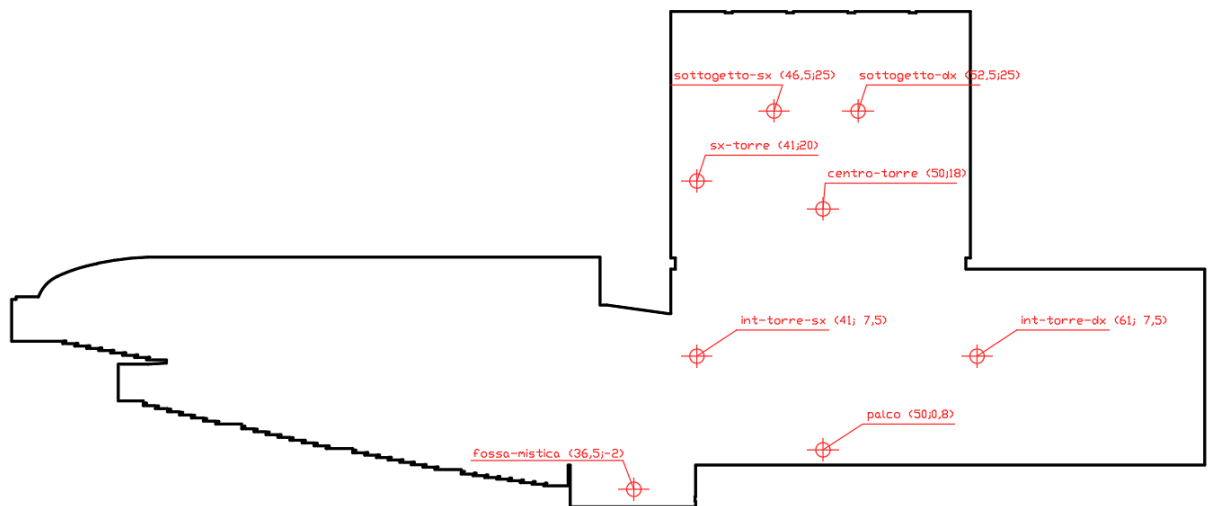


Figura 7.4: "sensori" per il caso 1.

La scelta dei punti sopra riportati è stata fatta seguendo i risultati del caso stazionario: per essere significativi, i sensori devono essere in grado di captare i vortici che si vengono a generare i quali, a priori, sono incogniti. Per questo

motivo, nella platea non sono state effettuate misurazioni in quanto, per il caso stazionario, non si sono osservati particolari movimenti di aria.

Si presentano ora i diagrammi ottenuti per i vari punti: da come si potrà evincere, per questo caso non si è attesa la stazionarietà in quanto, con queste geometrie e mesh, i tempi di calcolo sono stati parecchio lunghi. Infatti, una mesh così dettagliata ha portato il calcolo di simulazione per quasi 3 settimane, nelle quali la simulazione ha raggiunto il settantesimo secondo: in merito a questo, nel caso seguente si è attuato un approccio differente che verrà spiegato in seguito. I valori ottenuti sono comunque lo stesso significativi in quanto confermano ciò che è stato osservato nell'ambito stazionario, ovvero la genesi del vortice nella torre scenica e una poca variazione termica dal valore iniziale di temperatura (288 K): quest'ultimo aspetto è ancora coerente in quanto, si ricorda, in questo caso non ci sono sorgenti termiche interne. Inoltre, sempre in merito alla temperatura e trascurando la componente di umidità (così come suggerisce il Prof. Hangan [7]), viene naturale osservare che il coefficiente di comfort globale  $Y$  risulta avere valori intorno a -3 ("molto freddo"): questo perché la temperatura si assesta intorno a poco più di  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , come si potrà osservare nei diagrammi.

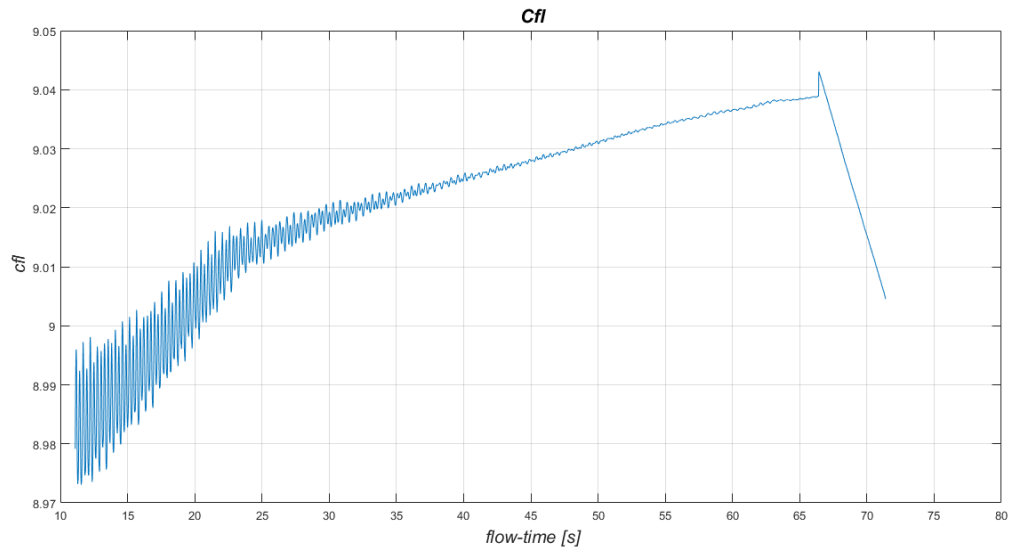


Figura 7.5:  $cfl$  per il caso 1.

In figura 7.5 si può capire la variazione del parametro  $cfl$  nel processo simulato: il suo valore si attesta intorno a nove, ove dieci è il massimo ammissibile oltre il quale la risoluzione non sarà più idonea. Lavorare con un  $cfl$  così alto si è



reso necessario viste le grandi tempistiche che si sono realizzate nel processo di simulazione, in quanto a tale cfl viene associato un passo temporale di 0.0001 secondi: oltre a questo non è possibile ottenere una soluzione idonea.

In primo luogo si analizzano i risultati dei punti "sottogetto-sx", "sottogetto-dx" e "sxtorre" in quanto essi nascono con l'intento di captare un eventuale situazione transitoria nella parte alta della torre.

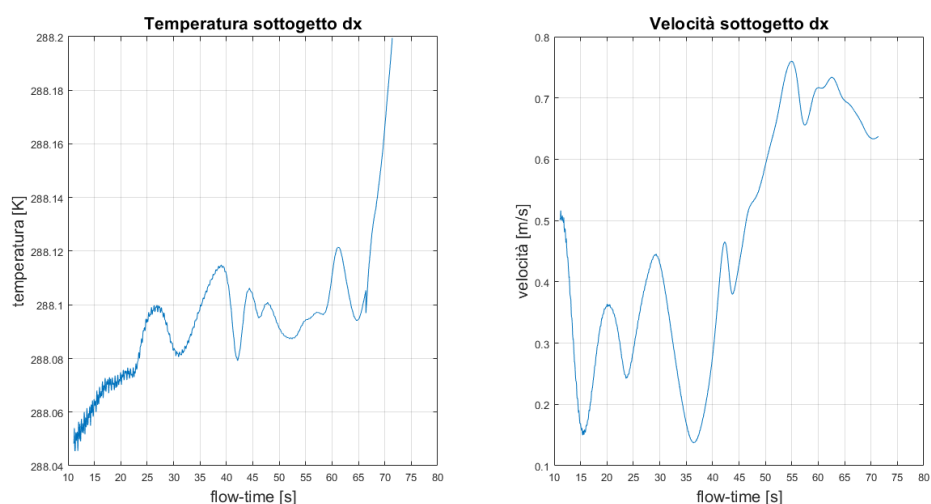


Figura 7.6: *velocità e temperatura "sottogetto-dx" del caso 1.*

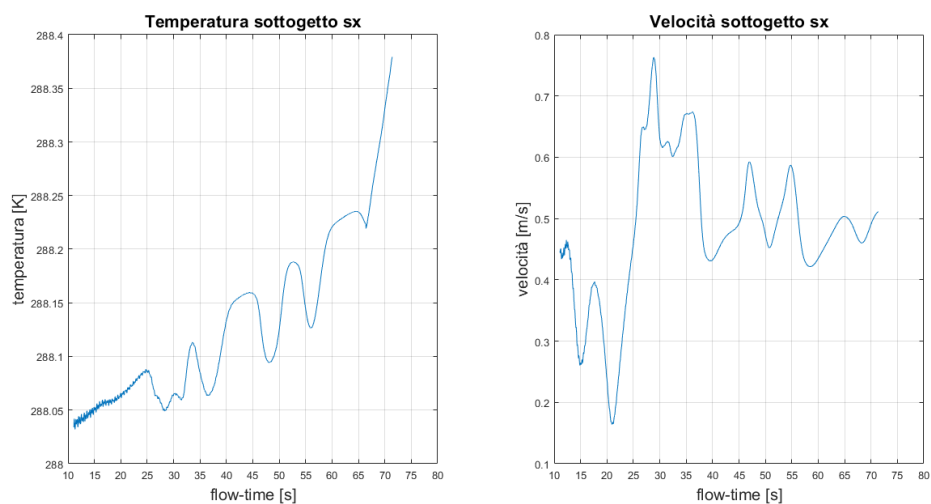


Figura 7.7: *velocità e temperatura "sottogetto-sx" del caso 1.*

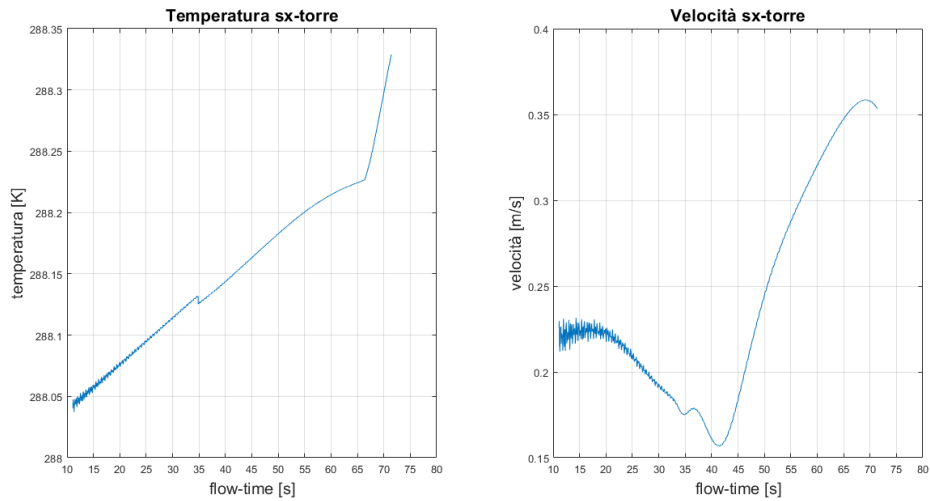


Figura 7.8: *velocità e temperatura "sx-torre" del caso 1.*

Da questi primi grafici si può evidenziare che il processo è fortemente transitorio: tutti i diagrammi andrebbero analizzati per un tempo più lungo, in quanto non si può evidenziare una netta costanza del valore medio. L'unico punto dove si può percepire una potenziale stazionarietà è "sottogetto-sx" in merito al parametro di velocità. Sempre legandosi a quest'ultima grandezza è possibile, attraverso la statistica d'ordine, dare una caratterizzazione probabilistica al superamento del valore di velocità critica per normativa, posto a  $0,2 \frac{m}{s}$ . Attraverso quindi un riordinamento dei dati di velocità in modo crescente e sfruttando la definizione di probabilità frequentistica, si è evito che in questi punti la probabilità di superamento del quantile di velocità è pari a 89 % per il punto "sottogetto-dx", 97 % per quanto concerne il sensore "sottogetto-sx" e infine si ha il 67 % di probabilità di superamento del valore di  $0,2 \frac{m}{s}$  per la misura in "sx-torre": questi valori non devono sorprendere in quanto essi descrivono un'area del teatro ove l'aria deve immettersi, considerando inoltre che tali aree non sono adibite ad ospitare eventuali occupanti. In merito a questo, sono forse più di interesse i grafici 7.9 e 7.10, i quali rappresentano le misure sempre di velocità e temperatura per aree però potenzialmente occupate.

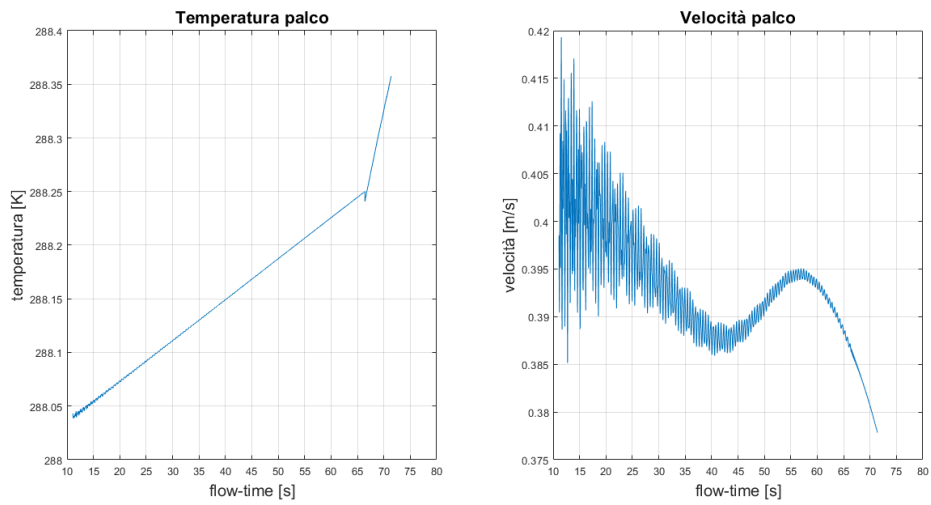


Figura 7.9: *velocità e temperatura "palco" del caso 1.*

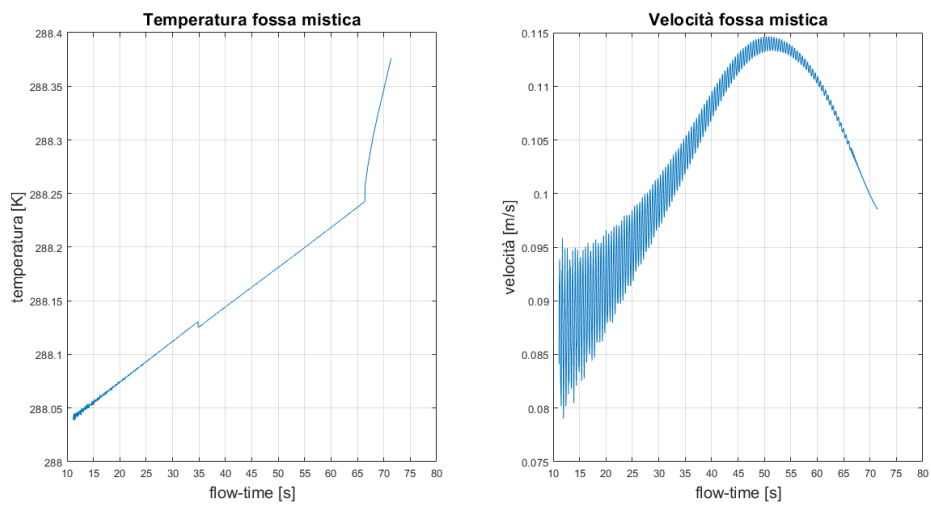


Figura 7.10: *velocità e temperatura "fossa mistica" del caso 1.*

Da come si può osservare nei diagrammi che elaborano i dati delle misurazioni nella fossa orchestrale, non si riscontrano velocità superiori a  $0,2 \frac{m}{s}$ , ottimo per quanto concerne il limite normativo di discomfort: si deve però tenere a mente che il processo è fortemente transitorio e le tempistiche non sono comunque sufficienti per dare un'approvazione certa di queste osservazioni. Più critica è invece la situazione nel palcoscenico: in questo punto le velocità si mantengono sempre sopra valori che superano i limiti normativi, talvolta raddoppiandoli. Il motivo lo si

può ricondurre alla manifestazione del vortice che nel caso solo dell'architetonico intercorre in tutta l'altezza della torre scenica: per investigare tale, si sono quindi studiati i punti "intermedio-torre-dx", "intermedio-torre-sx" e "centrotorre", i cui grafici sono presentati a seguire.

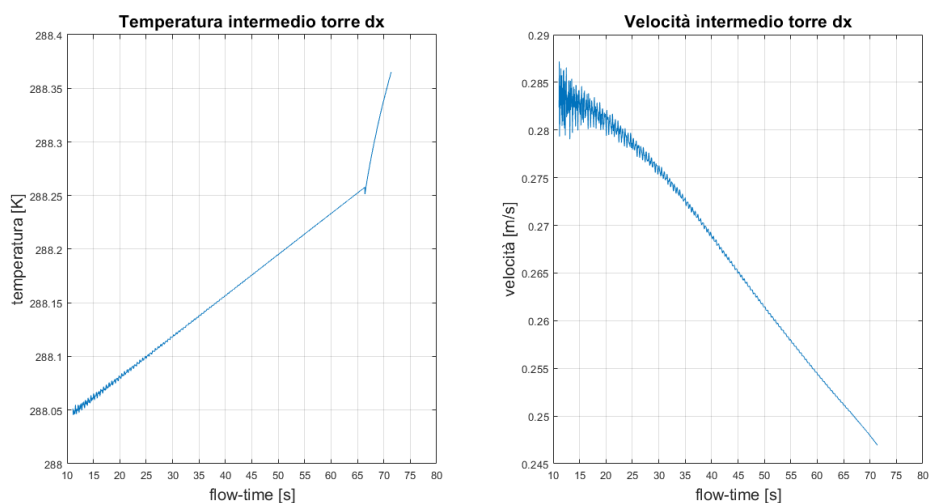


Figura 7.11: *velocità e temperatura "intermedio-torre-dx" del caso 1.*

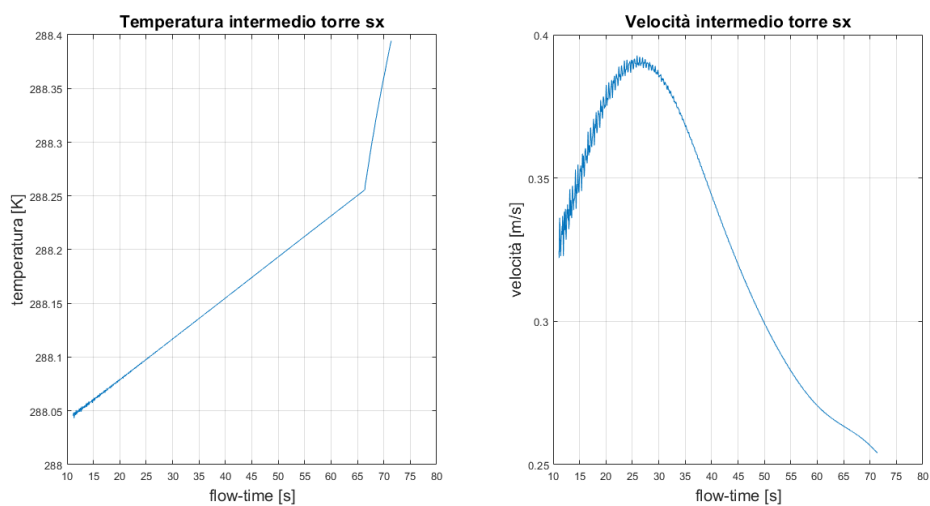


Figura 7.12: *velocità e temperatura "intermedio-torre-sx" del caso 1.*

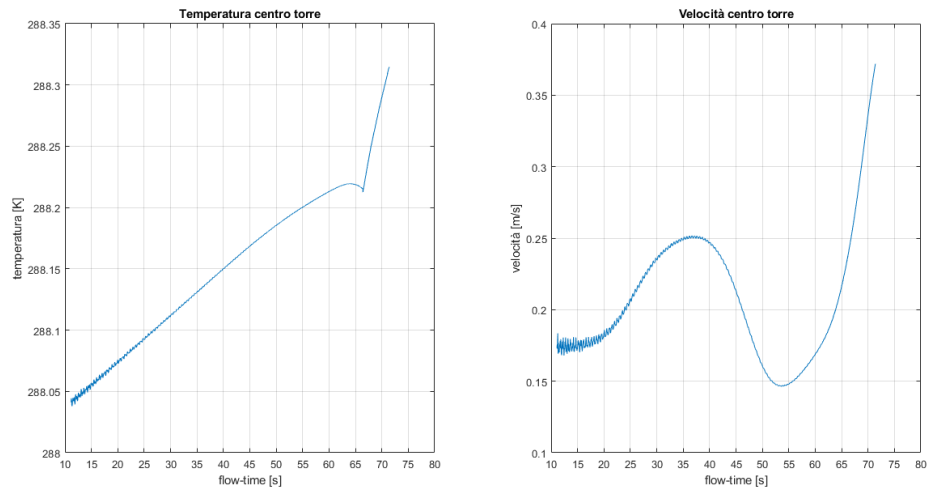


Figura 7.13: *velocità e temperatura "centro torre" del caso 1.*

La manifestazione di questo vortice porta ad avere velocità abbastanza elevate, del tutto o in gran parte superiori al quantile normativo. Tale vortice conferma quello già visto nell'aspetto stazionario (figura 7.14): la massa di aria vorticososa che nasce sembra essere indipendente dalla platea.

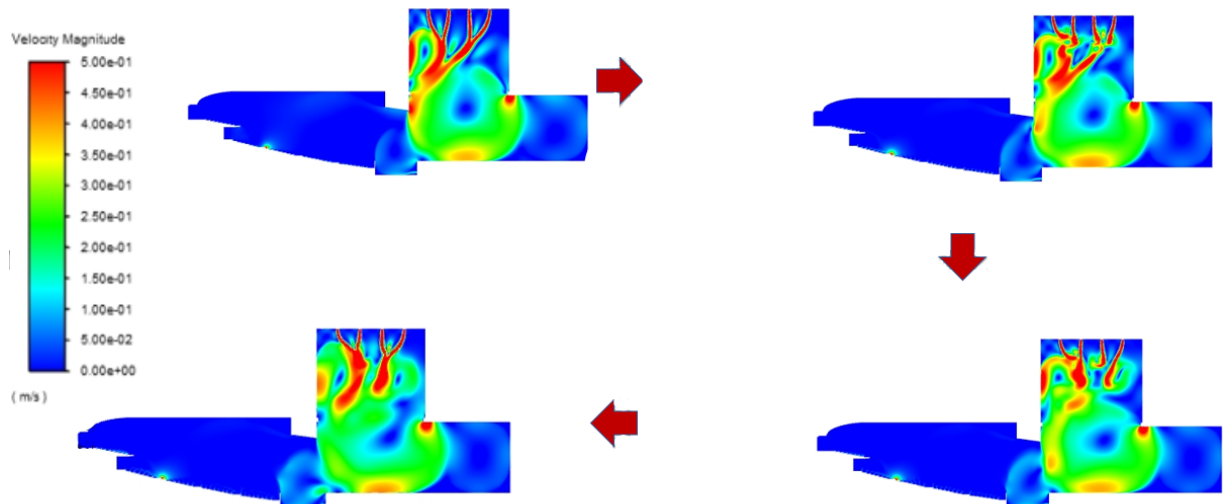


Figura 7.14: *contour plot della velocità ad istanti temporali differenti.*

## 7.3 Caso 2

L'analisi, a questo livello, deve iniziare a realizzarsi in una configurazione più comune, ovvero il caso ove la platea viene totalmente occupata dagli spettatori: questa condizione, nell'ambito stazionario, evidenziò delle interessanti osservazioni. L'approfondimento in transitorio è dovuto soprattutto per confrontare i risultati con quelli indipendenti dal tempo ed inoltre si vuole capire come impatta sulle conclusioni la presenza di sorgenti termiche interne quali le persone, schematizzate opportunamente con un rettangolo 70x40 cm con potenza termica imposta a  $60 \frac{W}{m^2}$ .

Per il caso 2 l'approccio al problema ha richiesto di ridefinire le mesh, dal momento che dal caso 1 non si è potuto raggiungere completa stazionarietà: da questo però si è evinto come le masse di aria hanno un moto molto lento e che trascurare le oscillazioni temporali potrebbe non permettere una corretta valutazione delle condizioni di comfort nel locale. Di conseguenza, l'analisi in questione eredita la sola geometria dal caso stazionario, richiedendo una ridefinizione dei volumi discreti di calcolo: seguendo le osservazioni fatte nella tesi [4], si è andati a discretizzare il volume sempre con mesh non strutturata ma con dimensioni medie di 0,1 m, andando a tralasciare potenziali raffinamenti nelle zone più insidiose della sala. Si è quindi optato per un metodo "all triangles", ove tutti gli elementi sono triangolari: questo modo di definire le griglie è particolarmente indicato per le geometrie complesse. Come si può osservare nelle figure 7.15 e 7.16, la qualità della mesh è buona, con valori di skewness prossimi allo zero e di ortogonalità vicino a uno.

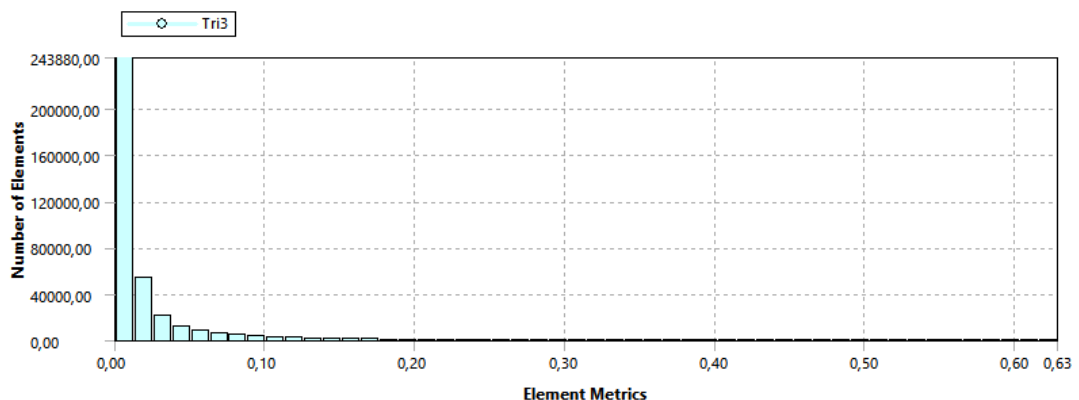


Figura 7.15: *valori di skewness del caso 2.*

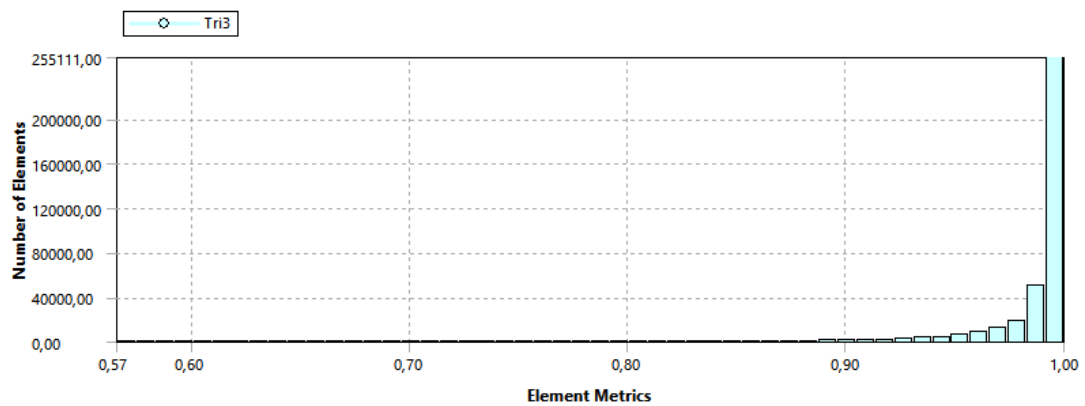


Figura 7.16: *valori di ortogonalità del caso 2.*

Si ritrovano, alla fine dell'elaborazione di definizione della mesh, un numero pari a 363938 di elementi per 184104 nodi, contro 536265 elementi e 289399 nodi della tesi stazionaria: con l'alleggerimento di 172327 elementi e 105295 nodi, si sono ridotti considerevolmente i tempi di calcolo. Si è così potuto, in tempi piuttosto contenuti (circa due settimane), analizzare più di mezz'ora di simulazione: questo si è reso possibile grazie al cfl (figura 7.17) che si è sempre tenuto su valori ottimali.

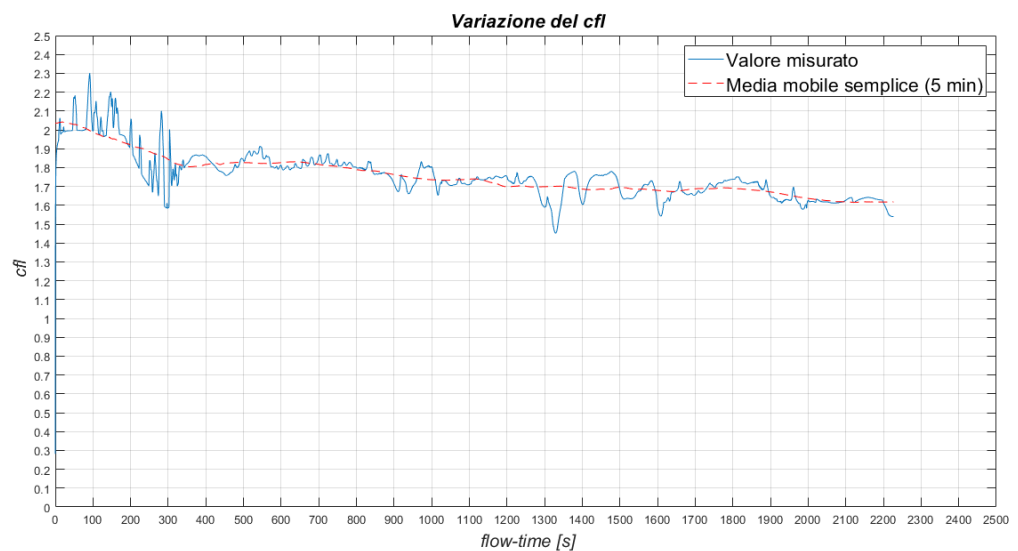


Figura 7.17: *variazione del cfl del caso 2*

Da come si può osservare nella figura sopra, aiutandosi anche con la spezzata rossa rappresentante la media mobile valutata su finestra di 5 minuti, è possibile

vedere che il parametro  $cfl$  si mantiene in un intervallo che va da 1,4 a 2,3, molto buono per quanto riguarda la risoluzione della soluzione: tali valori di questo parametro si sono realizzati con passo temporale di 0,01 secondi, che ha sensibilmente ridotto i tempi tecnici di elaborazione.

Ulteriore accortezza adottata rispetto il caso 1 è l'aggiunta considerevole di nuovi punti: i sensori, per questo caso, sono 24, disposti su tutto il dominio (figura 7.18): questo aumento si è reso necessario per avere una maggiore percezione delle varie strutture dei vortici, utili soprattutto per individuare in modo più corretto il raggiungimento della stazionarietà.

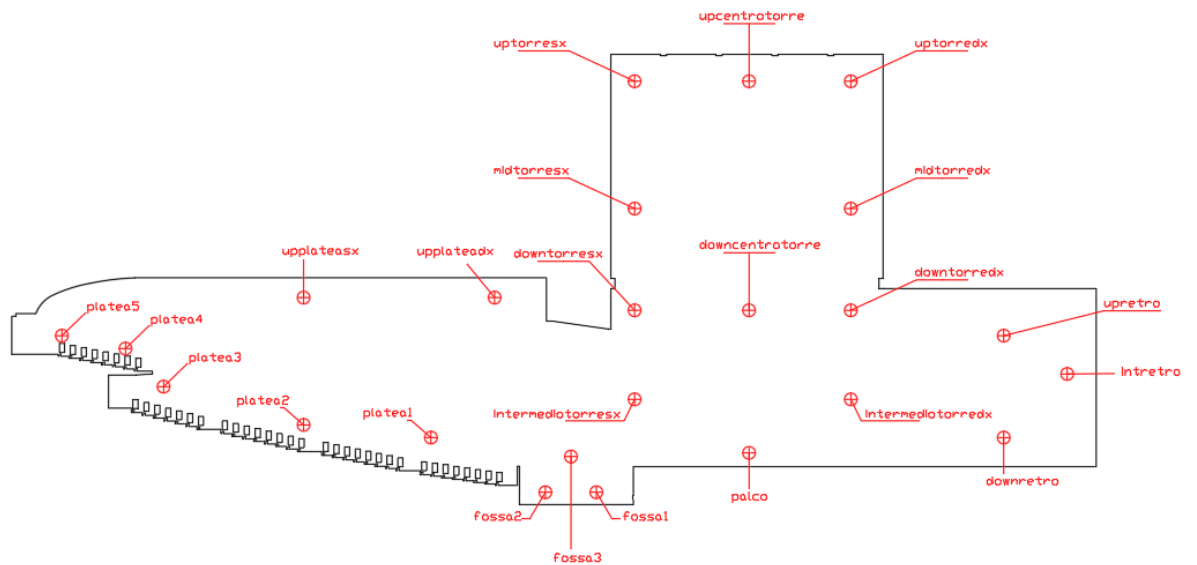


Figura 7.18: "sensori" per il caso 2.

I risultati del caso 2 per quanto concerne i punti del golfo mistico (fossa1, fossa2 e fossa3) sono riportati nelle figure 7.19, 7.20 e 7.21: è interessante osservare che i punti "fossa1" e "fossa2" all'interno della cavità non presentano velocità tanto elevate, con probabilità di superamento sempre calcolata attraverso la statistica d'ordine pari rispettivamente a 1,43 % e 2,34 %. Valori più critici si hanno sui diagrammi termici, che evidenziano come nella cavità le temperature non si discostino di molto da 288 K, valore che denota che l'aria non si miscela correttamente: quest'ultimo aspetto è stato già percepito nell'ambito stazionario. Il sensore "fossa3" sembra quasi essere un complementare dei primi due: questo, collocato ad un livello superiore, riconosce alte velocità e anche maggiori tempe-



rature in quanto capta il grande vortice incluso nello spazio complessivo, già visto nella tesi stazionaria e ricorrente, come si vedrà in seguito, anche nella simulazione transitoria.

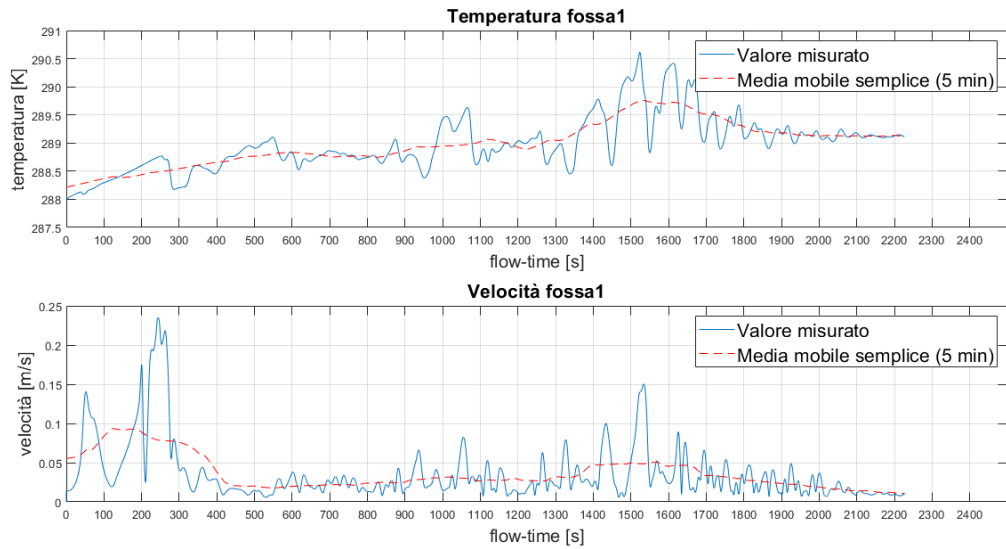


Figura 7.19: *variazione di temperatura e velocità fossa1 per il caso 2.*

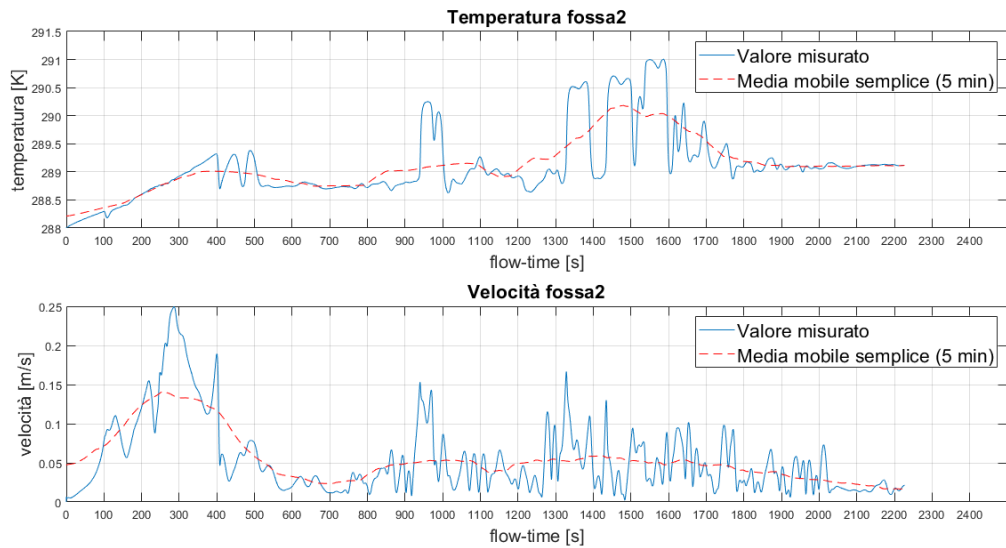


Figura 7.20: *variazione di temperatura e velocità fossa2 per il caso 2.*

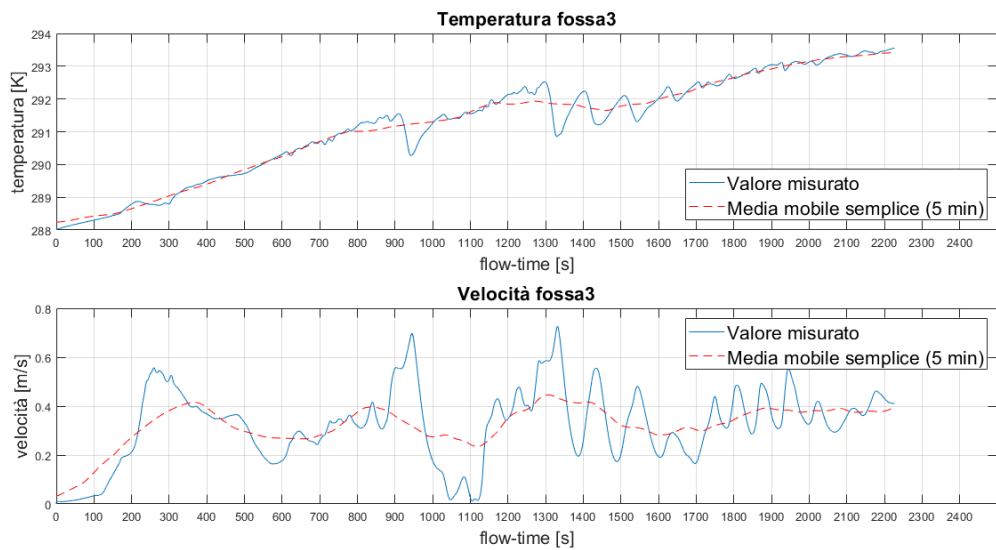


Figura 7.21: *variazione di temperatura e velocità fossa3 per il caso 2.*

Sempre focalizzando l'attenzione nella zona della fossa orchestrale, si è elaborato il coefficiente di comfort globale  $Y$  (figura 7.22) per avere una più chiara informazione sulla percezione dell'ambiente, partendo da un valore di  $-3$  (freddo) a  $+3$  (caldo). A conferma di quanto visto in precedenza, la configurazione qui trattata definisce valori di  $Y$  bassi, ancora una volta a sottolineare che il problema è reale e va risolto.

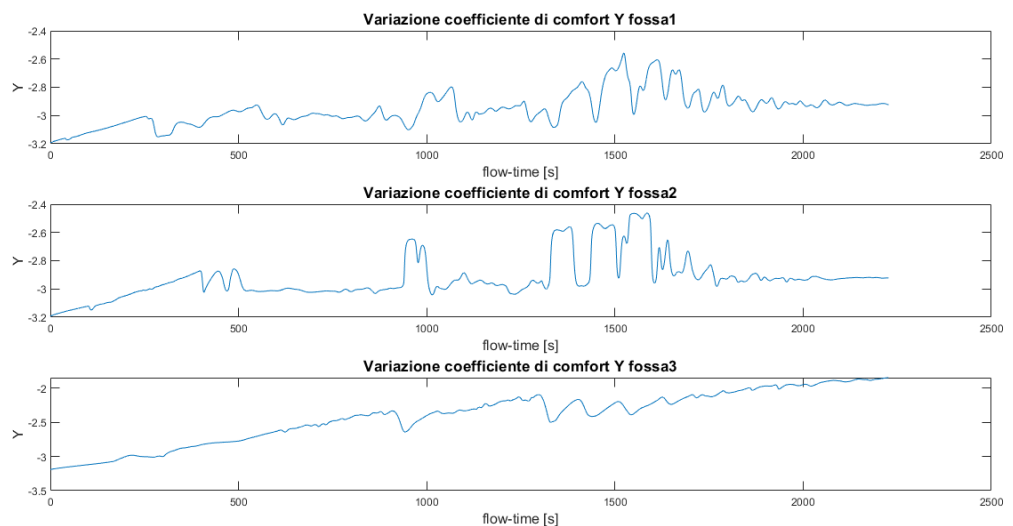


Figura 7.22: *variazione di  $Y$  per i punti riguardanti il golfo mistico.*

Altro punto d'importanza evidenziato nel caso stazionario è il palcoscenico: dai risultati lì ottenuti, si sono osservate velocità abbastanza importanti, pari a circa  $0,5 \frac{m}{s}$ : anche la soluzione transitoria conferma questo, con probabilità di superamento del quantile normativo pari a circa il 53 % e analogamente pari al 4 % in riferimento alla probabilità di superamento di  $0,5 \frac{m}{s}$ : la temperatura si attesta intorno a valori bassi, confermando la criticità della zona.

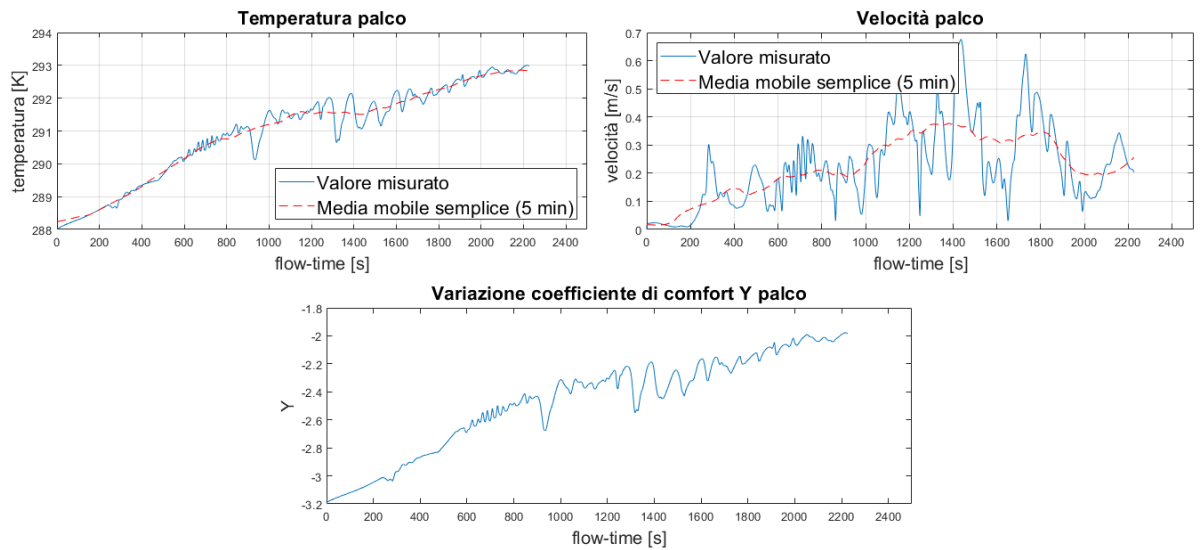


Figura 7.23: *variazione di temperatura, velocità e Y per il palcoscenico.*

I sensori posti nella parte maggiormente occupata del teatro (platea1, platea2, platea3, platea4 e platea5) hanno definito i grafici a seguire: da tali, risulta abbastanza evidente come la zona destinata agli ospiti tenda a raggiungere stazionarietà prima del golfo mistico e del palcoscenico. Prima osservazione critica che si può fare riguarda le entità di velocità: in tutti i punti qui riportati, non è possibile escludere la definizione di valori di velocità superiori al  $0,2 \frac{m}{s}$ . Infatti, escludendo il punto "platea5" che probabilmente risente delle configurazioni geometriche della parte posteriore del teatro, si può riconoscere un trend di possibilità di superamento decrescente, salendo dalla zona più bassa verso la più alta: nelle sedute più basse si raggiungono velocità che hanno possibilità di superamento del quantile normativo pari al 91 %, mentre in concomitanza di "platea4" si trovano probabilità del 25 %, nettamente inferiori. Questi aspetti potrebbero essere connessi allo scambio massivo che si realizza in concomitanza del boccascena, tra sala e palco-

scenico, considerazione già denunciata nello studio stazionario e successivamente qua approfondita con il caso 3.

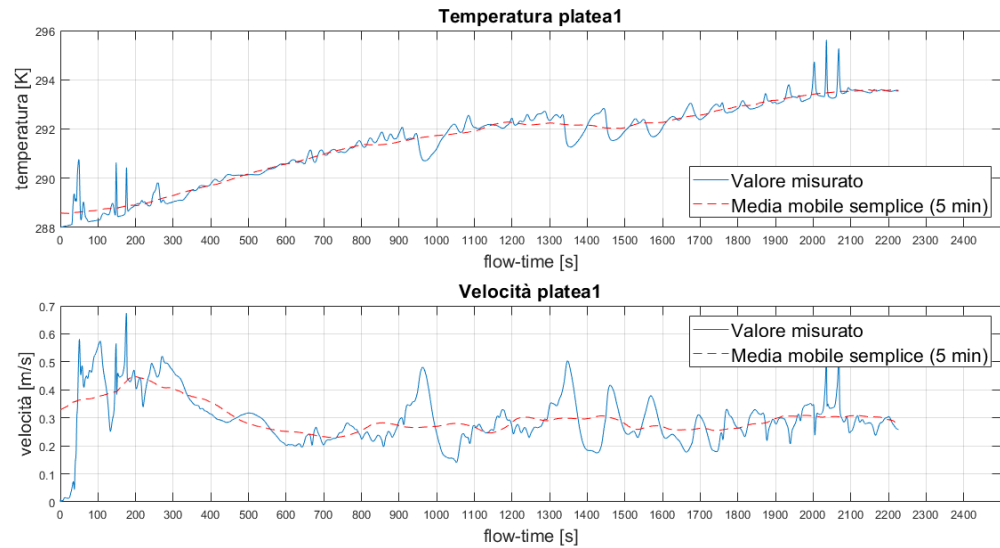


Figura 7.24: *variazione di temperatura e velocità platea1.*

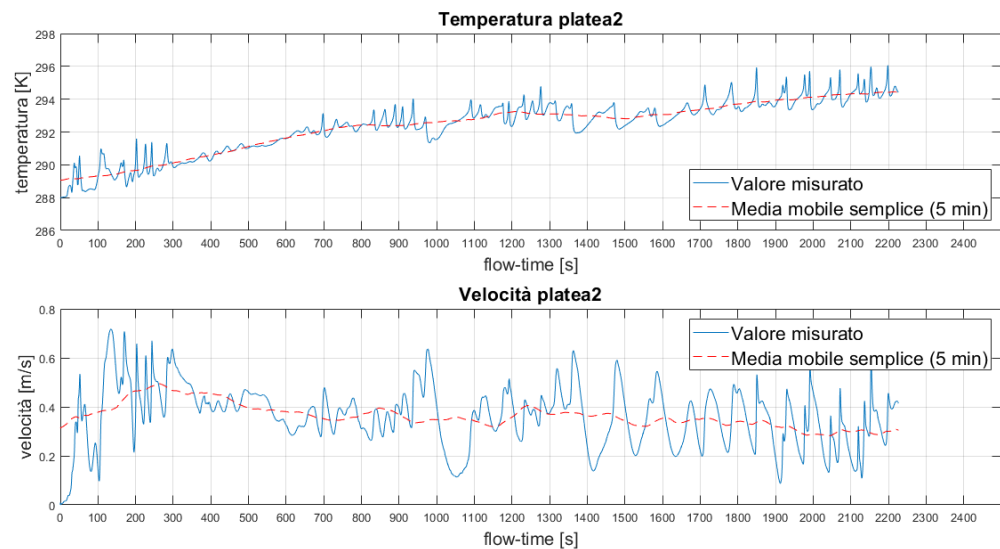


Figura 7.25: *variazione di temperatura e velocità platea2.*

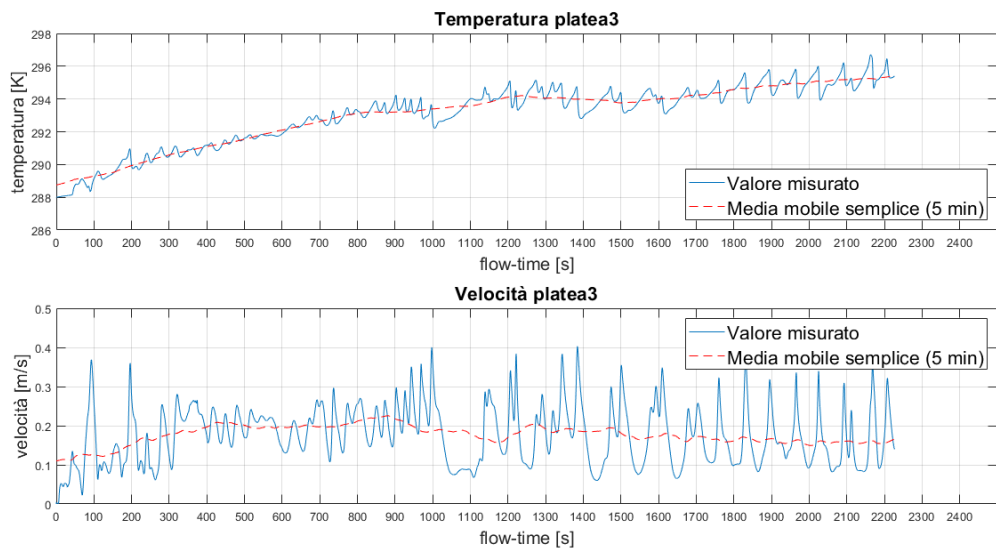


Figura 7.26: *variazione di temperatura e velocità platea3.*

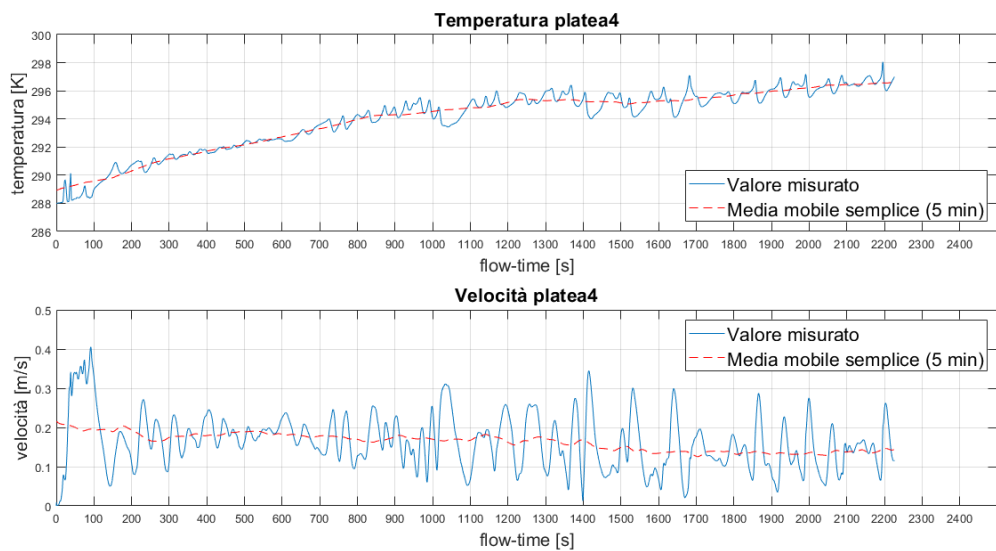


Figura 7.27: *variazione di temperatura e velocità platea4.*

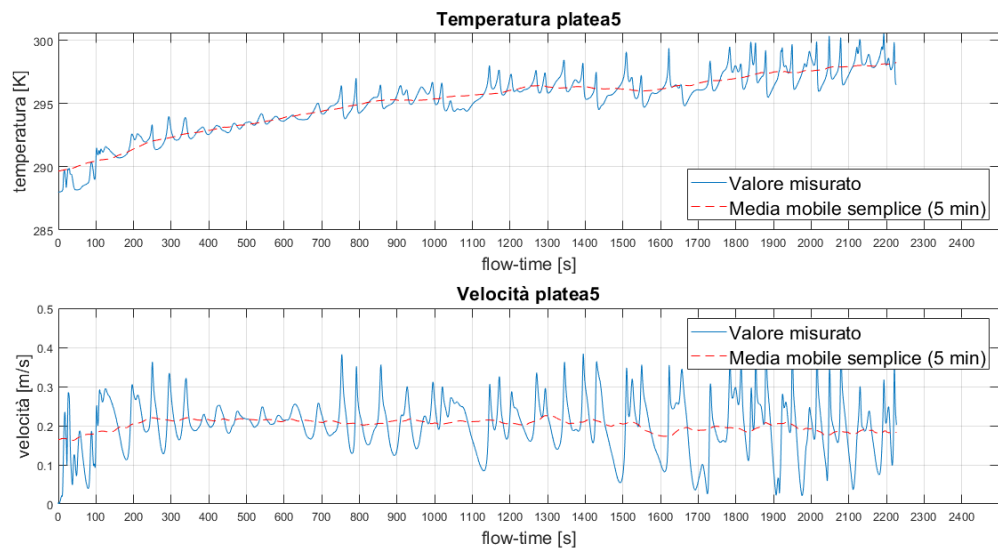


Figura 7.28: *variazione di temperatura e velocità platea5.*

Altro argomento d'interesse sempre legato alla zona della sala adibita agli ospiti riguarda il coefficiente di comfort globale  $Y$ : dall'immagine 7.29, si può osservare come a salire verso il retro della sala si ottengono valori di  $Y$  più ottimali. Nella figura sottostante infatti, nella quale si riportano le SMA di  $Y$  (Simple Moving Average) su finestra sempre di 5 minuti, è possibile puntualizzare nuovamente come la zona più critica è quella localizzata nell'intorno del boccascena.

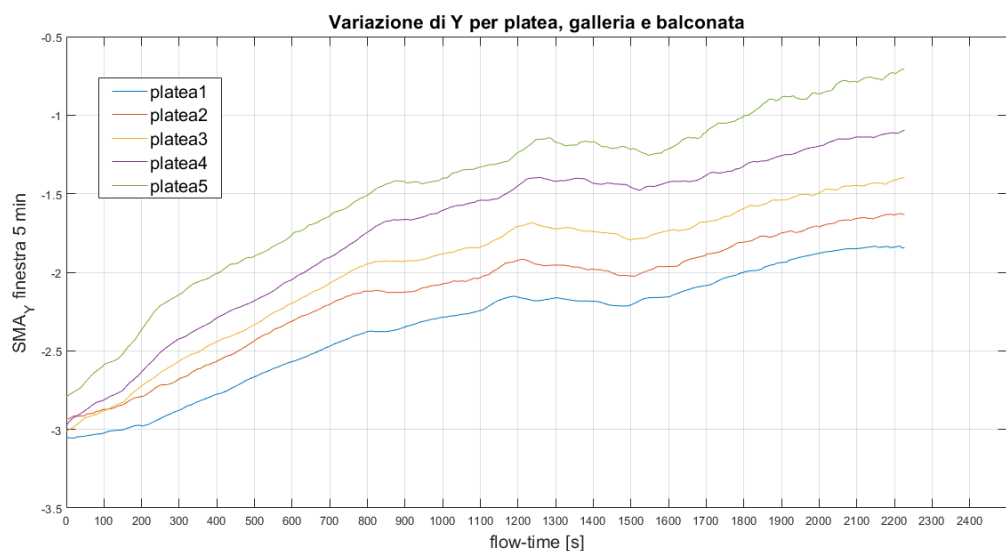


Figura 7.29: *media mobile semplice (5 min) sui valori di  $Y$ .*

I punti "upplateadx" e "upplateasx" sono stati scelti per completare la caratterizzazione dell'aria nella zona di occupazione durante uno spettacolo. Dalla figure 7.30 e 7.31 si può notare come il flusso, dopo dei primi istanti di transitorio, tenda ad avere velocità nulle, sinonimo di potenziale ristagno dell'aria al quale coincide un netto incremento termico: questo ultimo aspetto è scontato ma è bene evidenziarlo in virtù di una corretta interpretazione del fenomeno.

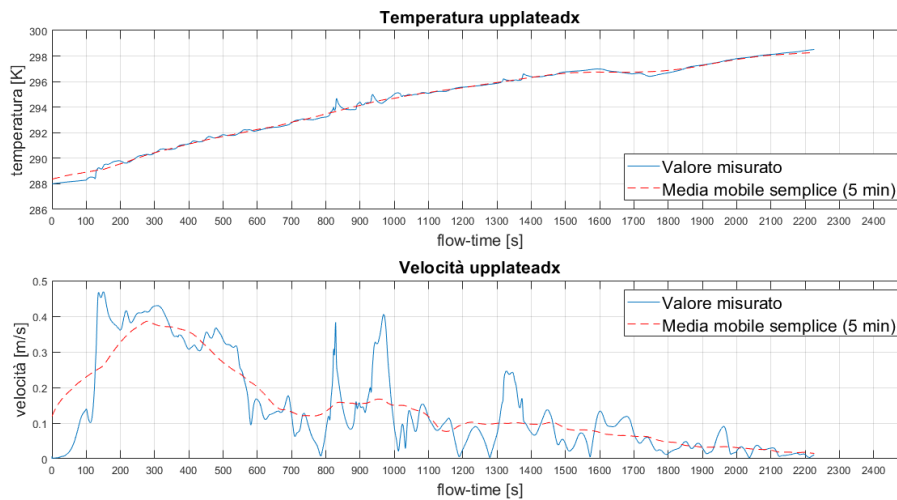


Figura 7.30: *variazione di temperatura e velocità "upplateadx".*

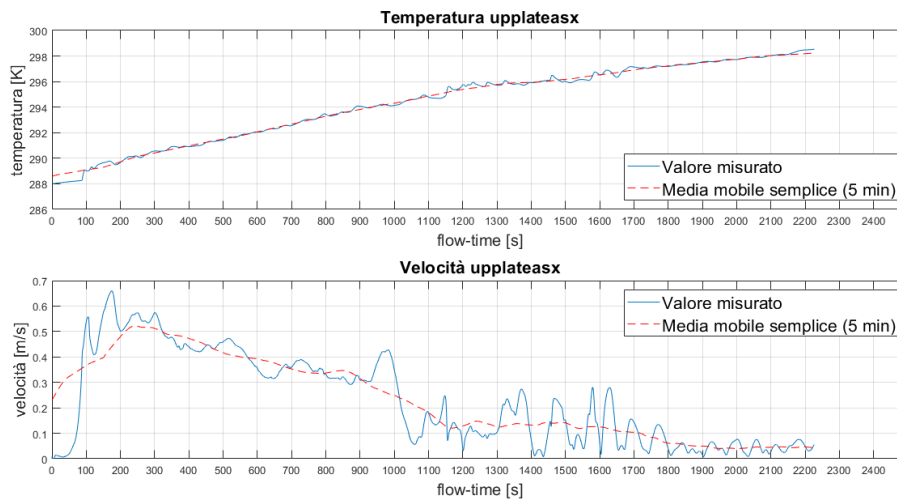


Figura 7.31: *variazione di temperatura e velocità "upplateasx".*

In conclusione, si sono prodotti i "contour plot" in riferimento sempre alla velocità e alla temperatura: questi danno una percezione immediata di come si manifesta il flusso durante lo sviluppo temporale. Nell'immagine 7.32 è rappresentata la distribuzione dei moduli di velocità nei primi istanti di simulazione: si può nitidamente percepire la creazione del vortice che influenzerà la simulazione, al momento ancora indipendente dalle turbolenze della torre scenica. Da come si può percepire nella scala riportata a fianco, le velocità più alte si manifestano anche in platea, problema già visto nei grafici precedenti.

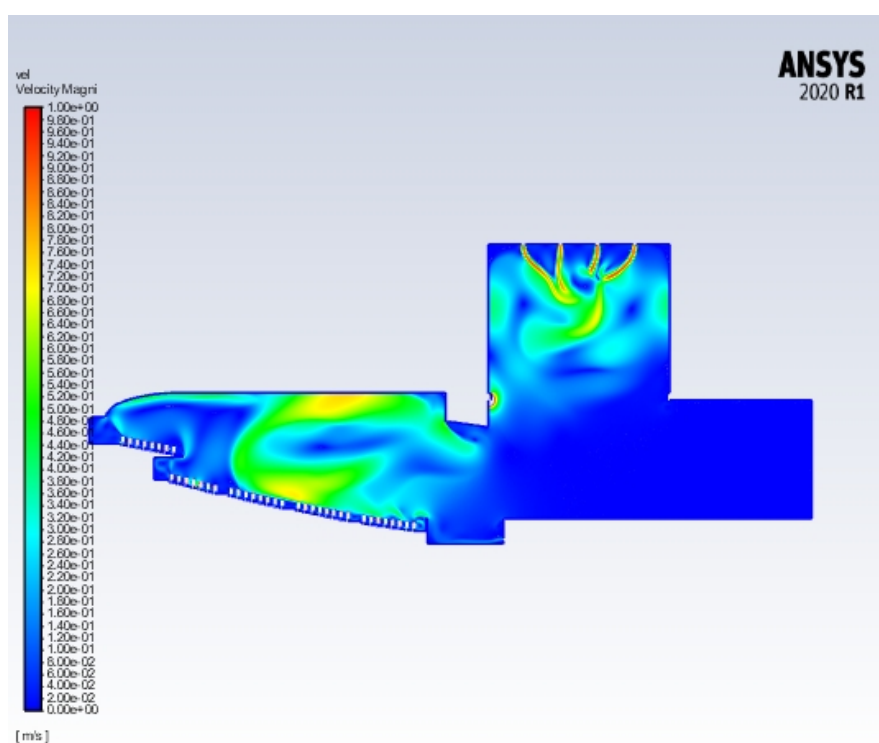


Figura 7.32: *creazione del vortice nella zona occupata.*

Proseguendo con la simulazione, si è potuto constatare che il vortice principale manifesta una iniziale tendenza ad espandersi nell'intero dominio, andando a definire velocità d'importanza anche nel golfo mistico: in figura 7.33, si può osservare come una lama d'aria che attraversa il boccascena si insidia nella cavità orchestrale, definendo delle locali problematiche di comfort. A questo istante di simulazione, è già possibile percepire come uno scambio massivo di aria tra la zona adibita a spettacolo e quella occupata comporta serie criticità, come fu anche formulato nella tesi stazionaria.



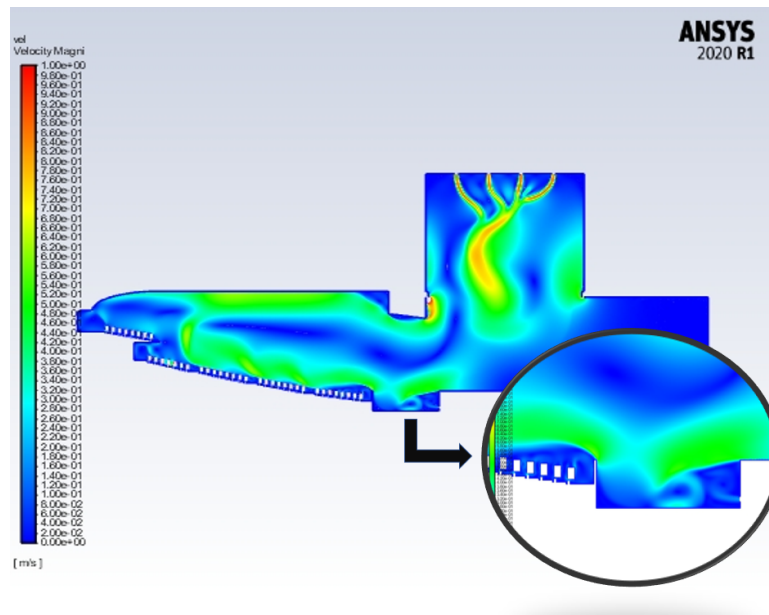


Figura 7.33: *incremento di velocità nel golfo mistico.*

Una volta che si è definita la scia di flusso congiungente i due spazi principali, si è potuto osservare la nascita del fenomeno di "lid driven cavity": aspetto noto in letteratura, esso si verifica quando una cavità aperta viene lambita sopra la zona di apertura da un flusso. Tale flusso provoca la nascita di un vortice localizzato, che nel caso specifico si può osservare in figura 7.34 e che tenderà ad estinguersi una volta identificata una configurazione più stazionaria.

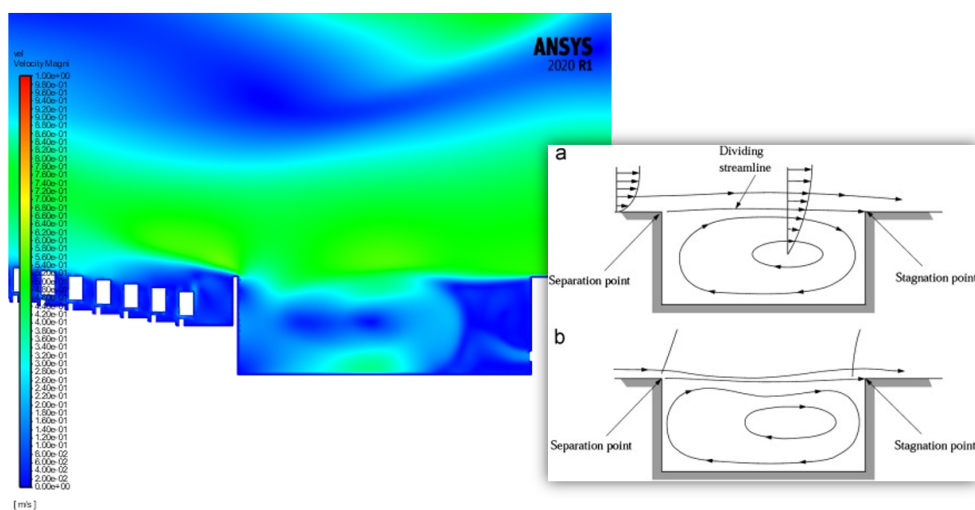


Figura 7.34: *definizione del vortice per "lid driven cavity".*

Inoltrandosi nella simulazione si può, ad un certo istante, percepire come un vortice interessante la zona scenica venga incanalato verso il palcoscenico, inducendo velocità abbastanza notevoli che precludono l' idoneità normativa in merito alla climatizzazione nella parte più bassa della torre scenica.

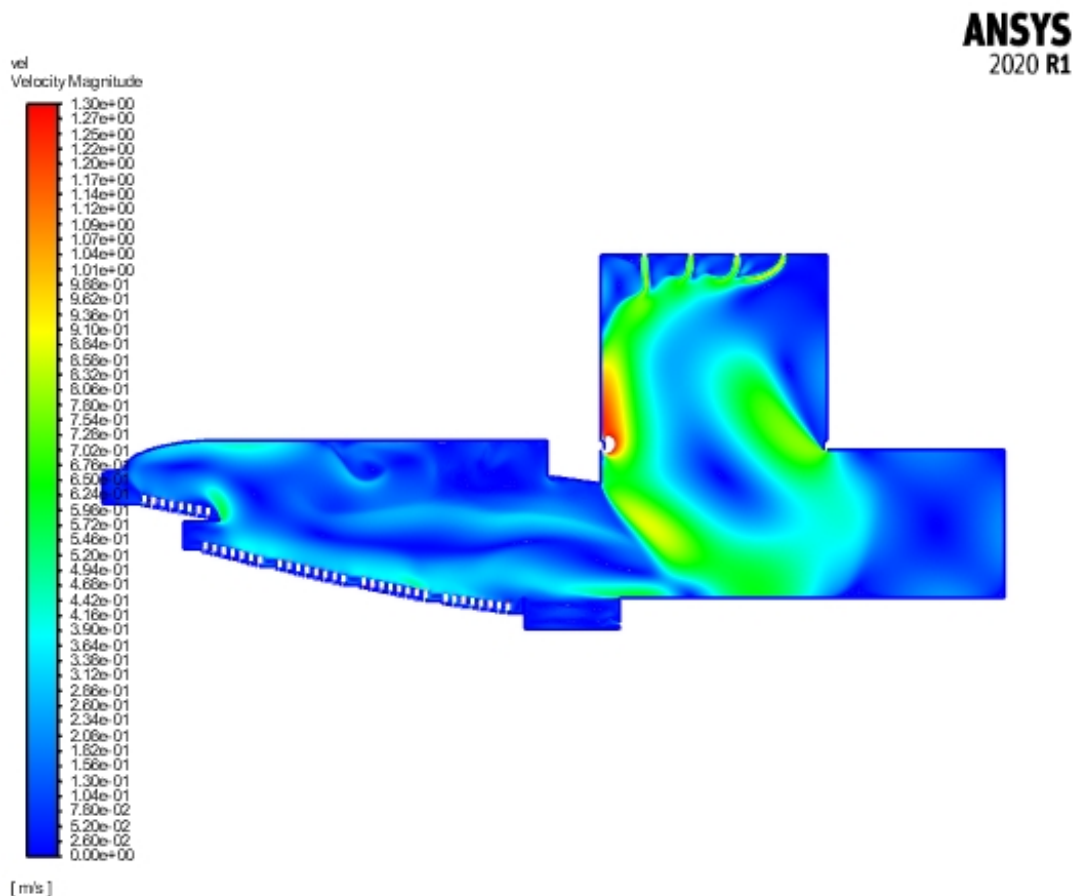


Figura 7.35: *definizione del vortice che interessa il palcoscenico.*

A conclusione della simulazione, si evidenziano, nella zona occupata dalle persone, una successione di oscillazioni di velocità che lambiscono il pubblico (indicate in figura 7.36). D'interesse è osservare come si realizzino, nella zona più superiore, punti di ristagno ove l'aria ha modulo di velocità nullo, in evidenza anche in queste rappresentazioni già trattate con i diagrammi.

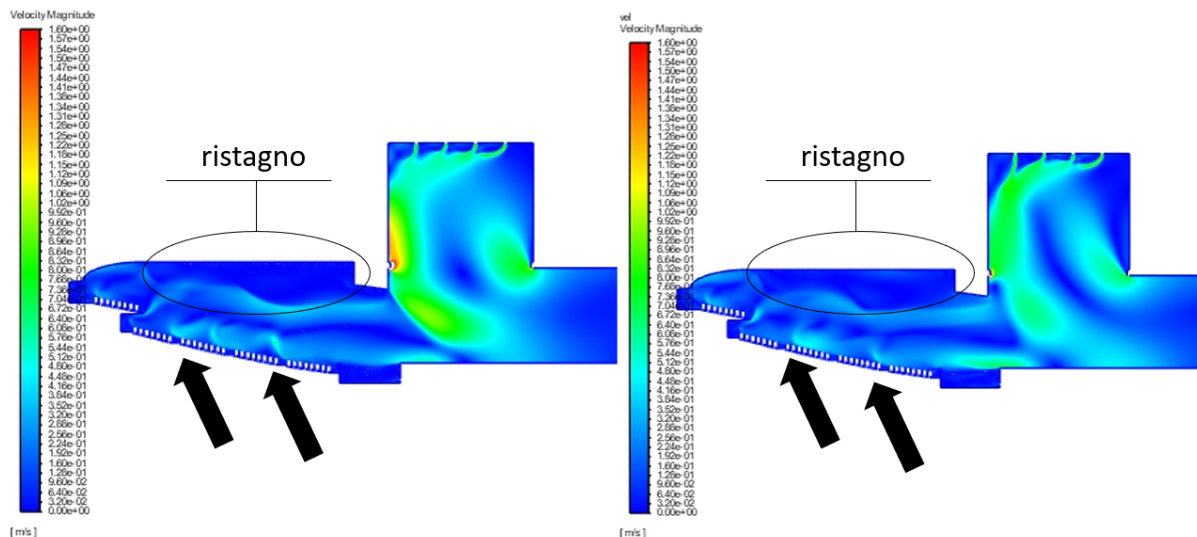


Figura 7.36: le oscillazioni sul pubblico e il ristagno sopra la zona occupata.

Per quanto concerne al "contour plot" della temperatura, si può osservare una iniziale (e ovvia) risalita dell'aria calda dalle sorgenti termiche poste a simulare il pubblico: dopo alcuni istanti temporali, la configurazione termica si presenta come in figura 7.37. In questa immagine è possibile percepire una forte eterogeneità nei confronti della temperatura cosa che, anche in letteratura, è sempre stato rimarcato come sinonimo di cattivo approccio di climatizzazione. Inoltre, si può vedere che la zona più calda accumulata nella parte alta della platea e della galleria si pone a "barriera" nei confronti della fossa orchestrale: in essa non riesce a raggiungere una corretta miscelazione dell'aria, attestando valori termici bassi soprattutto nella fossa.

Questo aspetto risulta ancora più evidente se si avanza con la simulazione: in figura 7.38, si può percepire come questo fenomeno vada sempre più ad evidenziarsi, parvenza di una configurazione già osservata nel caso stazionario e riportata sempre in figura 7.38 come confronto.

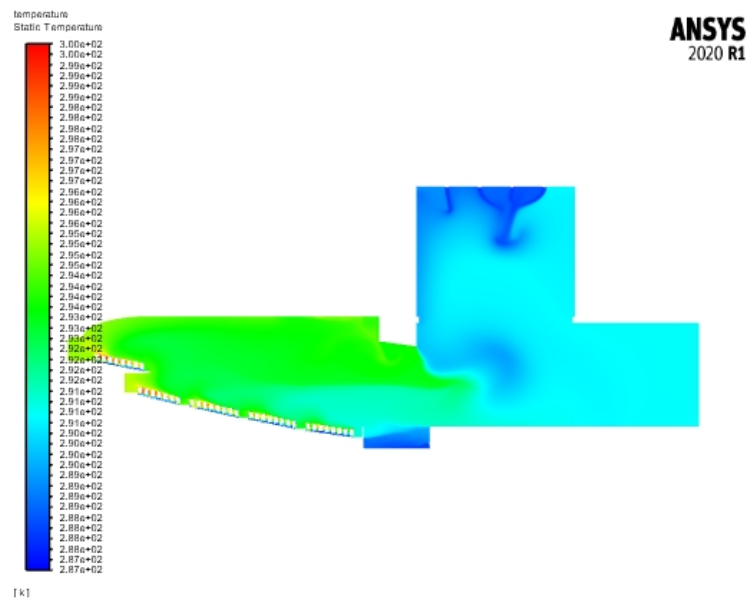


Figura 7.37: particolare termico a simulazione inoltrata.

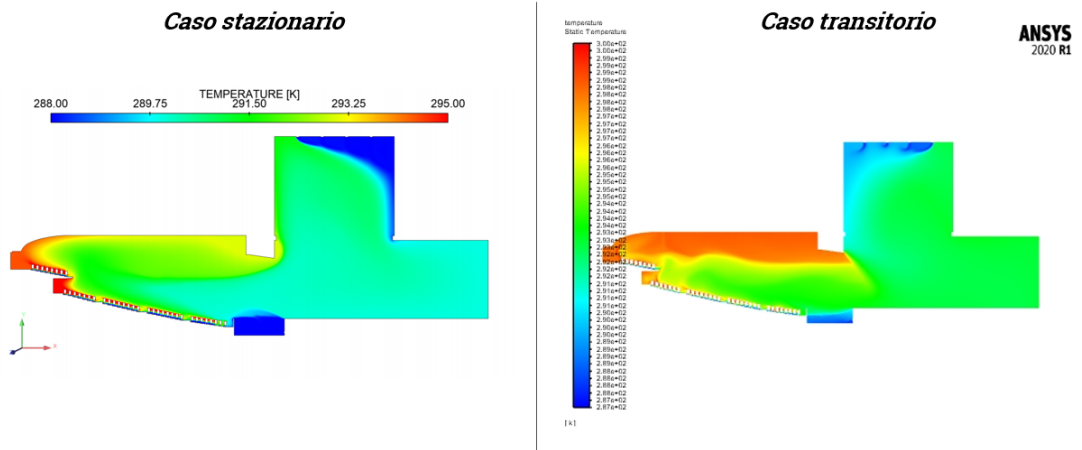


Figura 7.38: confronto termico caso stazionario-transitorio.

## 7.4 Caso 3

Come ultima configurazione trattata in questa tesi si riporta una variante del caso 2: principalmente, in quest'ultimo, si è osservato un fenomeno importante di accumulo di aria calda nella parte superiore della zona occupata. Si veniva quindi a definire una forte eterogeneità nel teatro, soprattutto per le temperature legate al golfo mistico. Altra evidenza riguarda lo scambio di massa attraverso il boccascena: il dominio scenico e quello occupato sembrano essere connessi da un vortice che definisce delle velocità anche notevoli che interessano gran parte dello spazio del teatro. Si propone quindi di simulare una configurazione che possa andare a modificare questi comportamenti: una possibile soluzione è quella di aprire dei sistemi di emergenza posti sopra il boccascena (figura 7.39). In questo modo, si predispone una nuova uscita dell'aria, che permetta di far evacuare questo importante accumulo e potenzialmente favorire il comfort del locale: si cerca, inoltre, di andare a "rompere" questo scambio massivo di aria che provoca effetti sfavorevoli come il "lid driven cavity" nel golfo mistico.

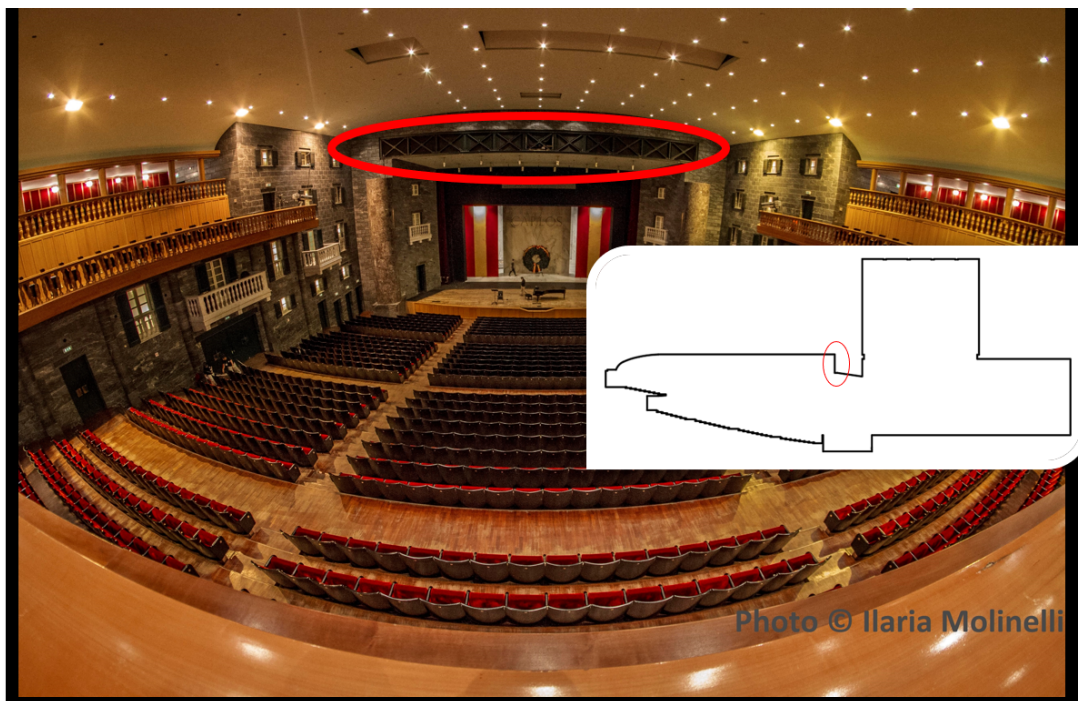


Figura 7.39: bocche di apertura per sistema di emergenza.

A livello tecnico, la simulazione è stata preparata analogamente al caso 2 presentato in precedenza: i domini sono analoghi così come le mesh e si tratta sempre

di una variante della configurazione con la massima occupazione da parte degli spettatori, sempre analizzata con i punti di misurazione del caso precedente. Un primo problema annesso all'impostazione riguarda la definizione delle nuove condizioni al contorno: nella configurazione specifica, si vuole aggiungere un "outlet", ovvero una presa di uscita dell'aria. Bisogna però ricordare che una prerogativa della definizione delle condizioni al contorno è che tali devono presentarsi in bilancio di massa in quanto, qualora ci fosse uno squilibrio in questo senso, si potrebbero avere accumuli o rarefazioni di aria che non possono essere ammessi.

Si è pensato allora di interpretare questa presa come una terza fuoriuscita della torre: come condizione allora si è identificata la portata massica uscente appartenente alla zona scenica ( $2,041 \frac{kg}{s}$ ) e si è divisa in due, una uscente dall'apparato di emergenza e l'altra sempre dalle prese sui lati della torre.

Avendo sviluppato la stessa impostazione del caso 2, si sono potuti nuovamente riscontrare le tempistiche di calcolo di quest'ultima configurazione con i parametri  $cfl$ , soprattutto a lungo termine, ottimali: da come si può evincere dalla figura 7.40, l'analisi tende ad una migliore risoluzione rispetto ai volumi di discretizzazione sfruttati.

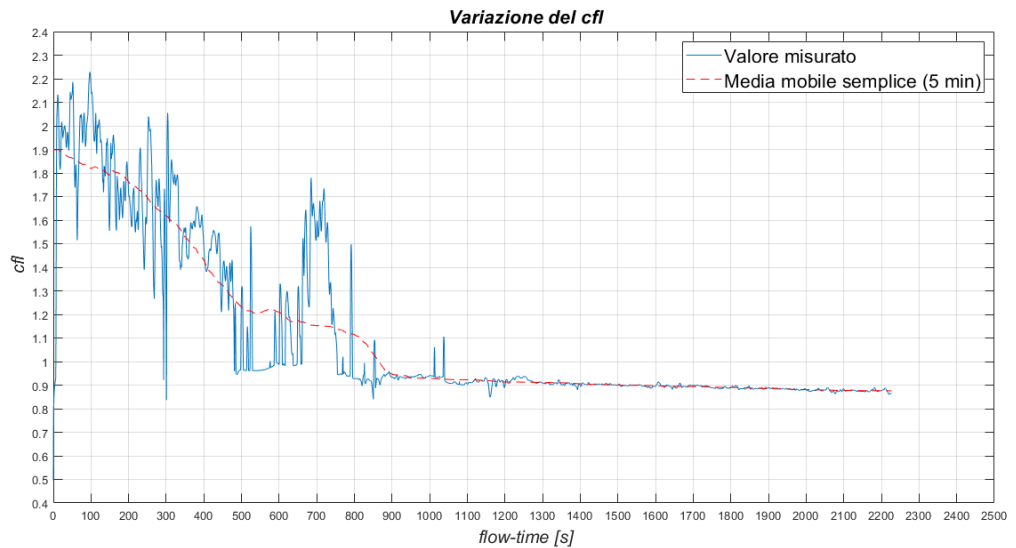


Figura 7.40: *variazione parametro  $cfl$  per il caso 3.*

Per quanto concerne ai risultati ottenuti, essi si presenteranno con delle osservazioni di confronto rispetto il caso 2: l'obiettivo dell'analisi infatti è sempre

quello di definire un paragone, per poter attuare valutazioni critiche se, questa nuova condizione al contorno, può apportare dei benefici.

Partendo proprio dai lati positivi, si rimarca la soluzione nei punti della fossa orchestrale (figure 7.41, 7.42 e 7.43).

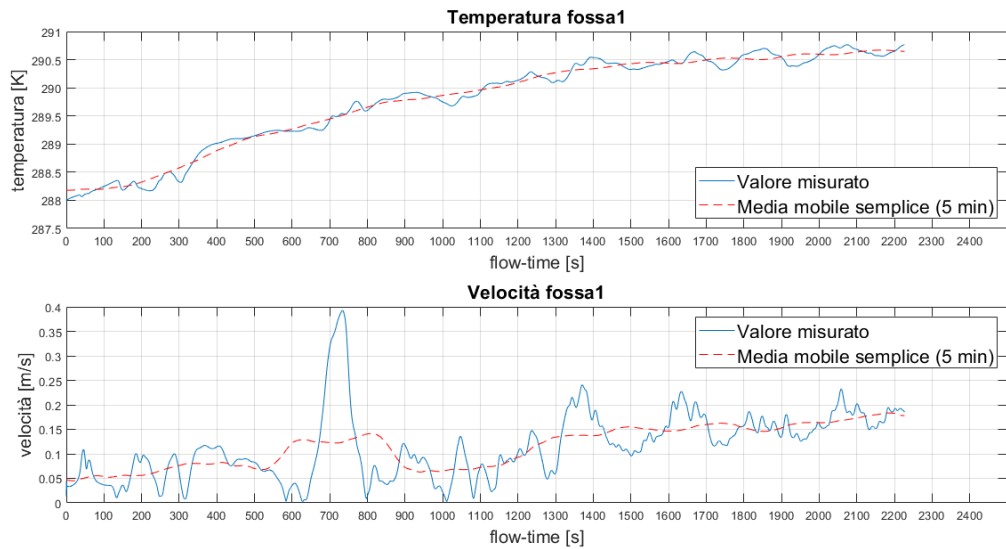


Figura 7.41: *variazione della temperatura e della velocità fossa1.*

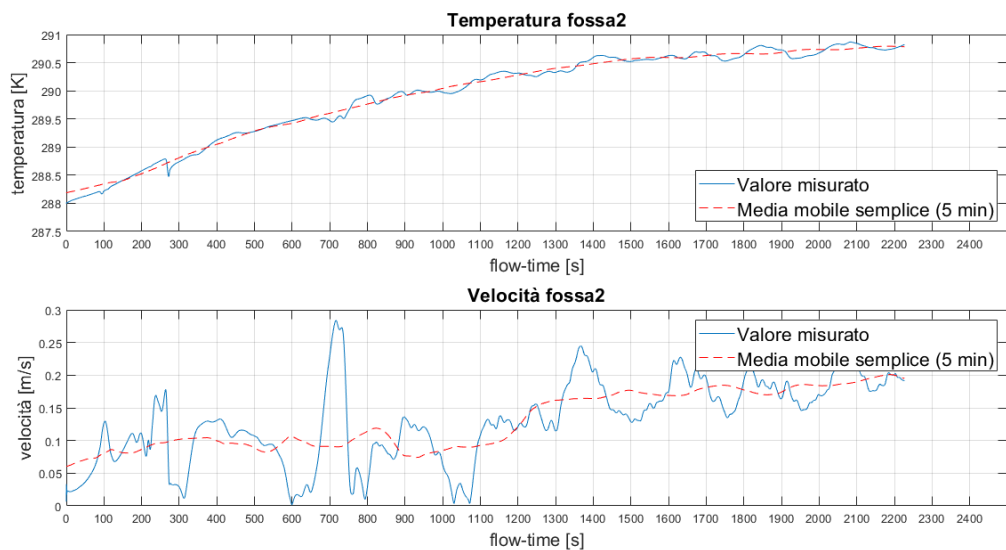


Figura 7.42: *variazione della temperatura e della velocità fossa2.*

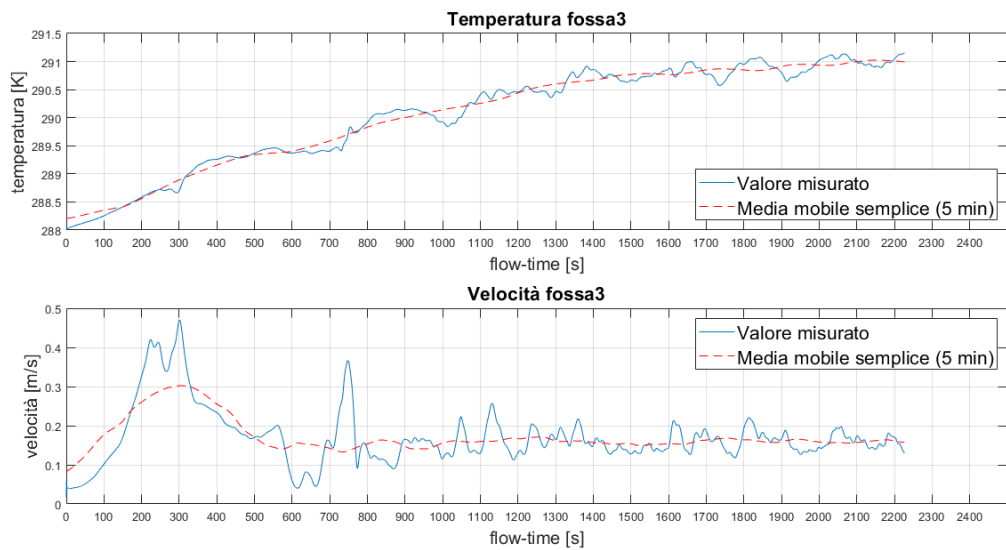


Figura 7.43: *variazione della temperatura e della velocità fossa3.*

Da come si può osservare, i punti di misurazione della fossa evidenziano una migliona: anche se le probabilità di superamento del quantile normativo di velocità (sempre pari a  $0,2 \frac{m}{s}$ ) in generale si incrementano a 8 %, 13 % e 20 % rispettivamente per fossa1, fossa2 e fossa3, si riconosce una migliore condizione termica a lungo termine in quanto, in questo caso, non si osserva la ricaduta a 288 K evidente nella configurazione precedente a questo sottocapitolo. Questo aspetto potenzialmente conferma che un importante accumulo di aria calda, in queste geometrie, agisce da "tappo" ad isolamento termico proprio di una delle zone più incriminate. Si vuole ulteriormente sottolineare questo particolare presentando in figura 7.44: aprendo il sistema di emergenza, si presenta una migliore distribuzione termica, quasi a riunire in due classi la zona occupata dal pubblico e la parte scenica. La fossa orchestrale quindi sembra rispondere positivamente alla modifica, da come si può osservare anche dai coefficienti di comfort termico globale  $Y$  (figura 7.45): i valori possono sembrare sempre bassi, ma si ricorda che si fa sempre l'assunzione di elidere la componente dipendente dall'umidità. Inoltre, si ricorda che si sta simulando una condizione ove la fossa orchestrale non è occupata dai musicisti: essi rappresentano una ulteriore sorgente termica (come già visto nella tesi stazionaria [4]) ma che, in questo contesto, non è stata trattata.



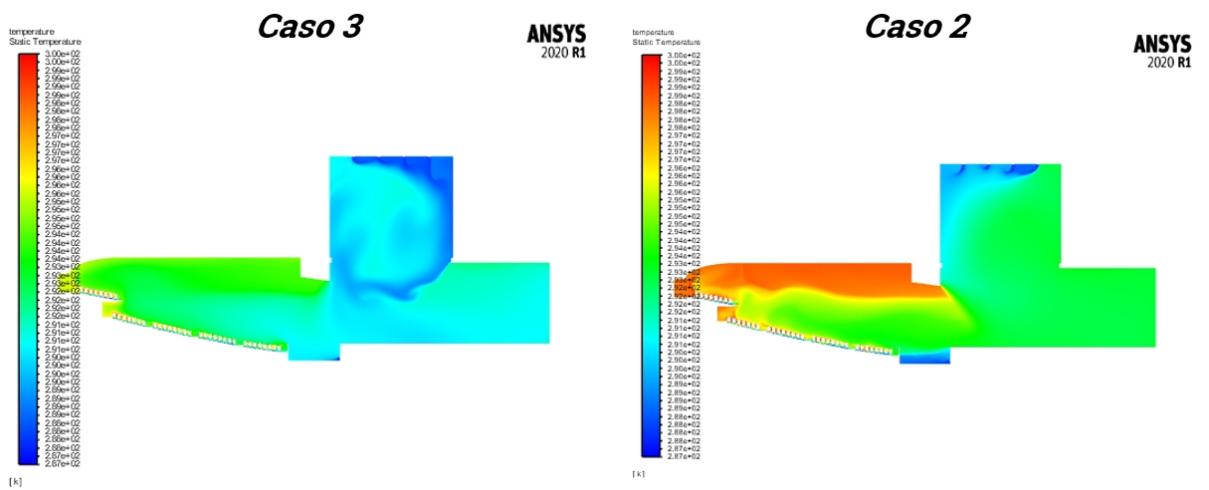


Figura 7.44: confronto tra caso 2 e caso 3 dei contour plot termici a fine simulazione.

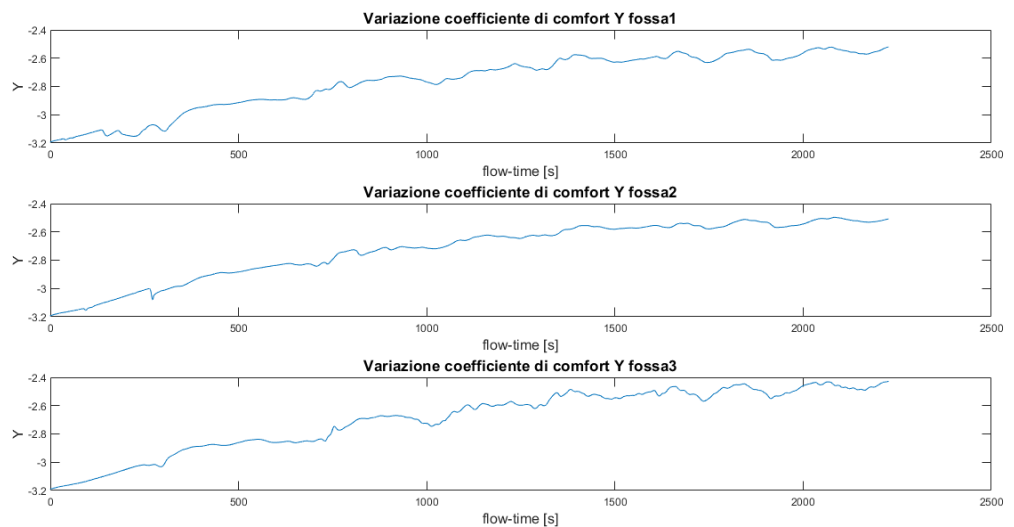


Figura 7.45: variazione del coefficiente di comfort globale.

Nella misurazione effettuata sul palcoscenico invece, la situazione sembra peggiorare: la generazione di un grande vortice localizzato nella torre scenica osservabile in figura 7.46 potrebbe influenzare lo spazio dedicato alla scena. Questa struttura vorticoso si materializza dopo circa dieci minuti di simulazione.

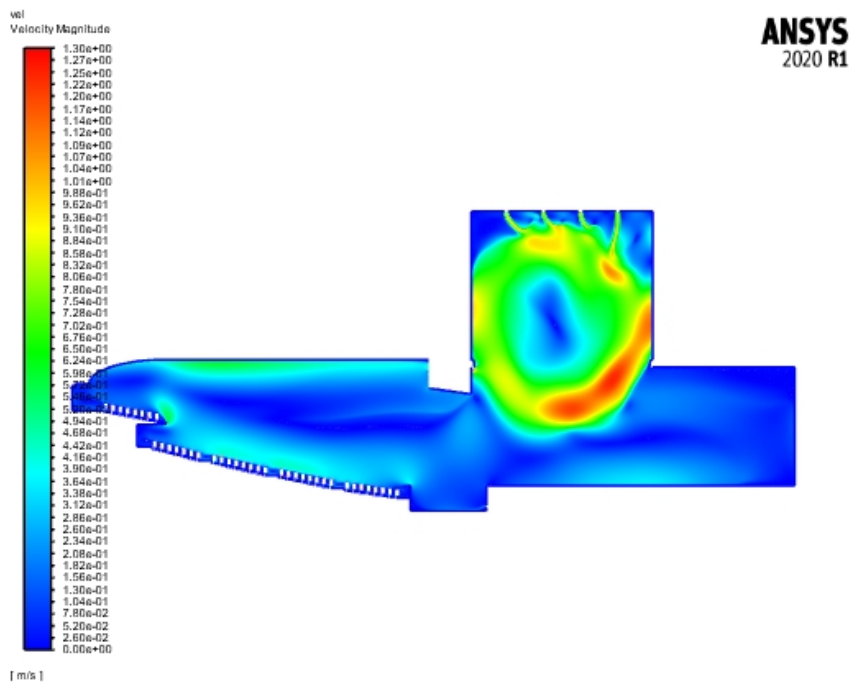


Figura 7.46: struttura vorticoso materializzata dopo dieci minuti di simulazione.

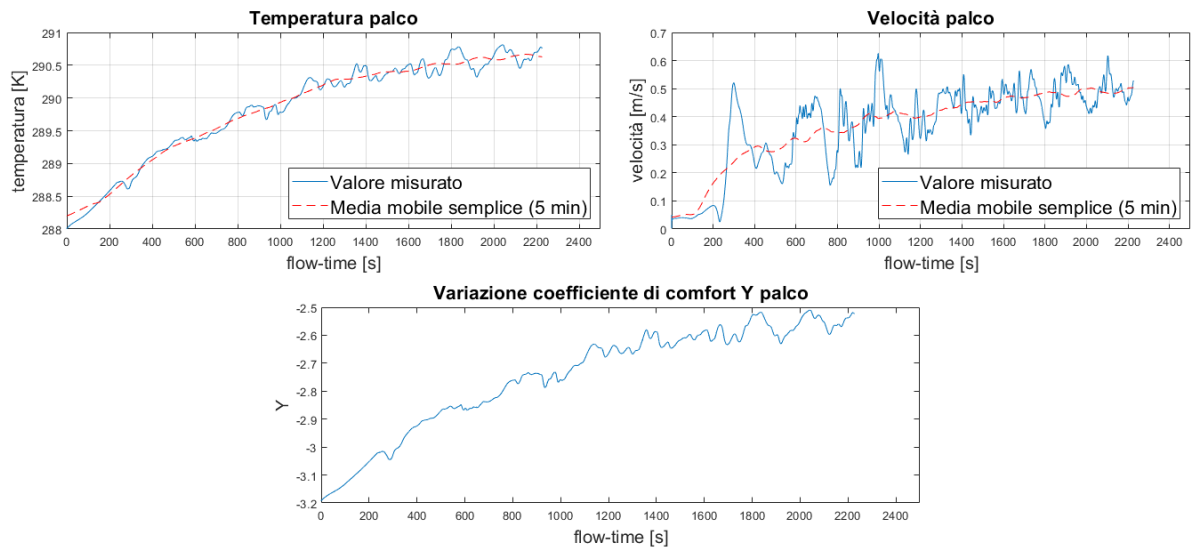


Figura 7.47: diagrammi della temperatura, velocità e  $Y$  per il punto "palco".

I diagrammi di variazione temporale evidenziano come, sul palcoscenico, si ma-

terializzino delle velocità che superano il valore di  $0,2 \frac{m}{s}$  con probabilità dell'85 %, contro il 53 % del caso 2: in merito a questo paragone, si potrebbe pensare di dividere le condizioni al contorno in modo tale da contenere la struttura vorticoso messa in risalto sopra.

Intuitivamente, avendo definito una nuova apertura sopra la zona occupata, anche in platea, in galleria e in balconata si localizzano dei peggioramenti di comfort: in figura 7.48 è possibile osservare un confronto con il caso 2 in merito alla variazione della media mobile su cinque minuti del coefficiente di comfort globale.

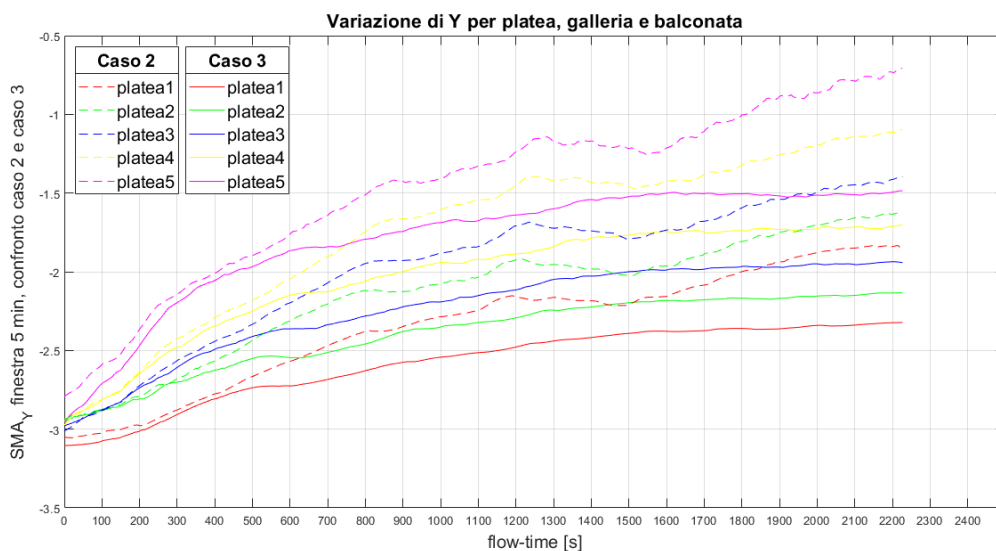


Figura 7.48: confronto dei coefficienti di comfort  $Y$  per i vari punti nella zona occupata.

Di fatto, la variazione nelle condizioni al contorno fa perdere circa mezzo punto sulla valutazione di  $Y$ : di questo aspetto non c'è da stupirsi perché lo scopo primario era proprio di abbassare l'accumulo termico. Per le misure nelle zone occupate, bisogna riconoscere una variazione termica dalla parte più bassa verso la parte più alta che va dai 18 ai 21 °C, valori ancora abbastanza accettabili. Più critico invece l'aspetto di velocità: la nuova apertura provoca un innalzamento delle probabilità di superamento del quantile normativo anche a valori prossimi al 97 % nei pressi del punto "platea1" più basso, ma si registra sempre una miglioria a salire verso la parte posteriore della sala occupata; si potrebbe ricondurre tale problema sempre all'importante vortice nella torre scenica già definito in precedenza.

In conclusione si è voluto, per questo caso, investigare in modo più accurato la manifestazione delle strutture vorticose, in particolare nei riferimenti della ricerca della frequenza di variazione delle componenti di velocità: questo aspetto è di particolare importanza per capire quanto ripetitiva può essere la perturbazione degli spazi, per poter osservare le oscillazioni che si realizzano in alcuni punti studiati. Per fare questo si presentano, in prima battuta, la variazione delle componenti in direzione  $x$  e  $y$  delle velocità per tre punti rappresentativi del dominio: il palcoscenico ("palco"), il golfo mistico ("fossa2") e un punto nella zona occupata ("platea3").

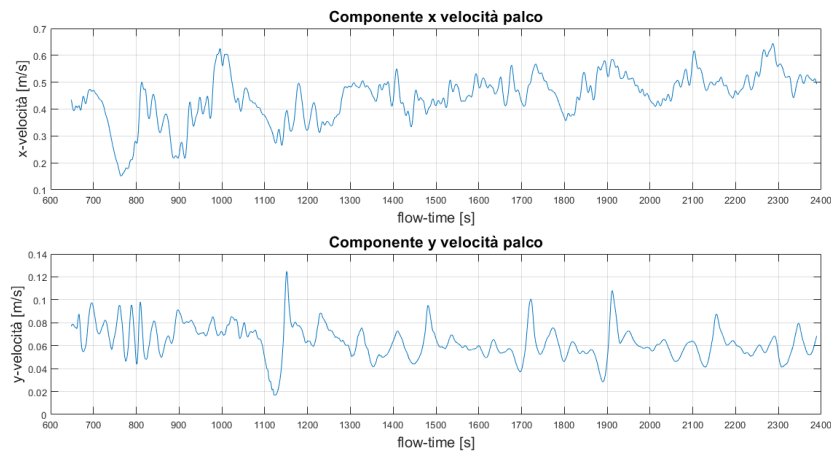


Figura 7.49: *variazione delle componenti  $x$  e  $y$  per il punto "palco".*

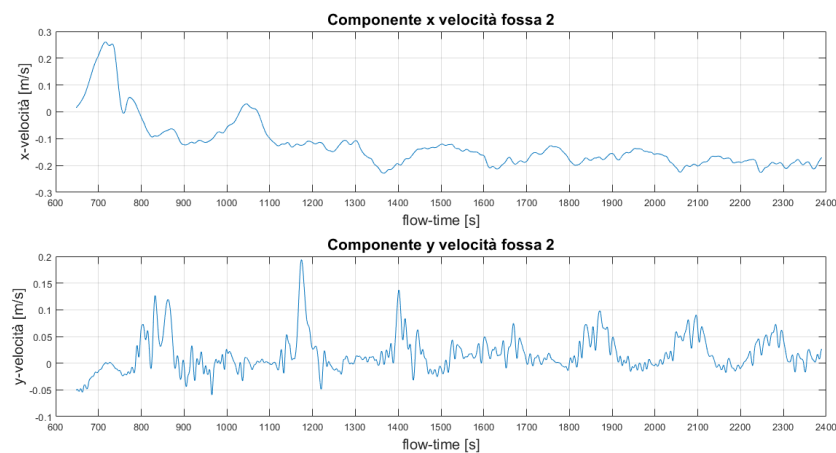


Figura 7.50: *variazione delle componenti  $x$  e  $y$  per il punto "fossa2".*

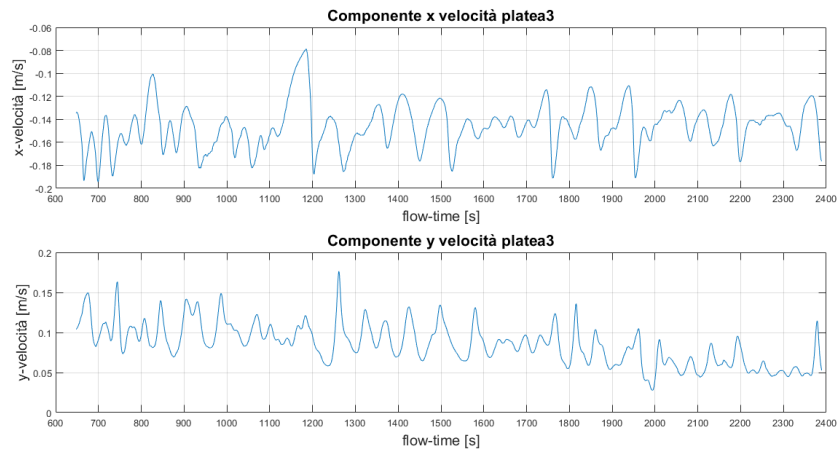


Figura 7.51: *variazione delle componenti x e y per il punto "platea3".*

con questi valori di segnale, il software FLUENT<sup>®</sup> by ANSYS<sup>®</sup> è in grado di produrre, attraverso l'algoritmo FFT ("Fast Fourier Transform") il diagramma densità spettrale di potenza-frequenza in riferimento sempre al segnale caricato. Questi particolari grafici mettono in evidenza la larghezza della banda del vortice che influenza i vari punti analizzati: in particolare, rimarca le frequenze nelle quali le strutture vorticosi in analisi riversano più energia.

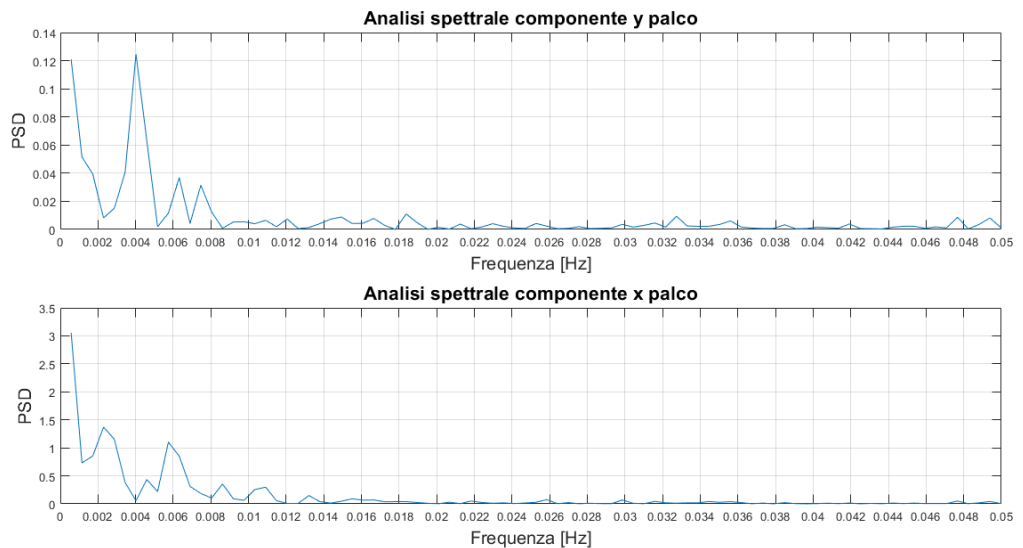


Figura 7.52: *diagramma PSD-frequenza per il punto "palco".*

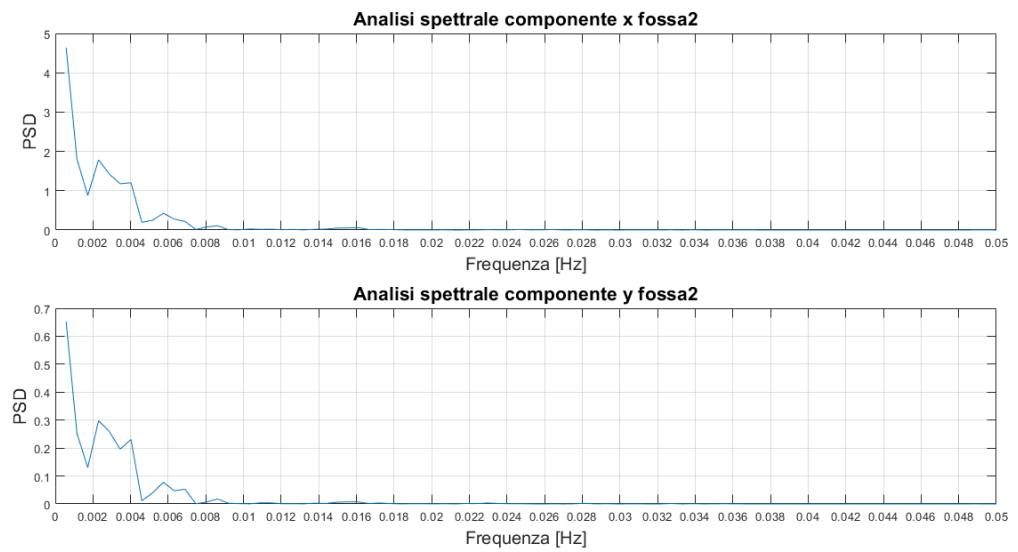


Figura 7.53: *diagramma PSD-frequenza per il punto "fossa2"*.

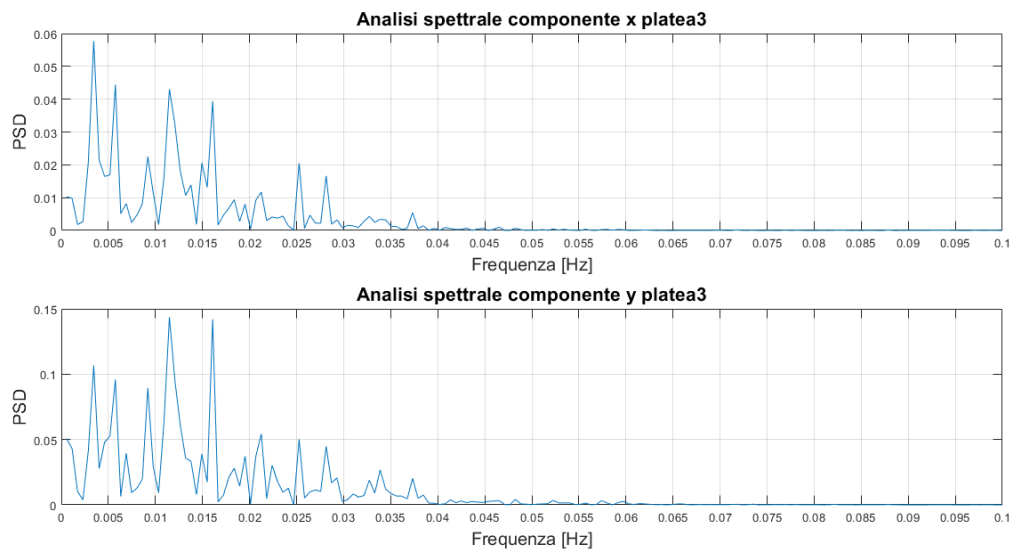


Figura 7.54: *diagramma PSD-frequenza per il punto "platea3"*.

Si riportano queste analisi spettrali perché risulta particolarmente significativo il fatto che le strutture vorticosi che si localizzano nelle parti principali del teatro sono tutte caratterizzate da frequenze molto basse, definendo periodi di oscillazione molto dilazionati nel tempo: da valori di 50/60 secondi fino a tempi all'intorno dei dieci minuti. Questa valutazione può essere una valida dimostrazione analitica

che le masse di aria all'interno del Carlo Felice si sviluppano in moti molto lenti, chiarendo quindi le difficoltà in termini tempistici osservati in questo capitolo. In definitiva, cicli dilazionati così tanto nel tempo permettono di comprendere l'importanza di continuare il progetto su simulazioni di natura transitoria ma di prestare attenzione all'impostazione del problema, che esso sia un giusto connubio tra precisione e bassi costi di simulazione.

# Conclusioni

Il teatro Carlo Felice di Genova è un esempio di armonia e tecnica, sempre riconosciuto tale nel decorso della sua storia, nonostante essa sia stata parecchio travagliata. Ad oggi, il teatro presenta grandi spazi per i quali si distinguono parecchie difficoltà nella definizione di comfort. Tale aspetto, che da inizio al progetto "*Storia e Aria*", è stato affrontato in questo contesto in uno studio transitorio per vie numeriche (CFD): dopo una previa chiarificazione sulle equazioni che governano il moto dell'aria (Navier-Stokes) e una ricerca dei parametri normativi d'interesse sia per la valutazione dei risultati stazionari ottenuti nella tesi delle Dott.sse Macciò e Costa che per le soluzioni in regime transitorio, si sono definiti tre casi studio che, in parte, vogliono ricalcare il percorso svolto nella tesi stazionaria in ricerca di un confronto, di un approfondimento nelle misure d'interesse.

Il caso 1, ovvero la simulazione svoltasi solo con l'apparato architettonico, ha rappresentato una sorta di inzializzazione: l'elaborazione ha evidenziato che, almeno inizialmente, il processo è fortemente dipendente dal tempo. Purtroppo però, la scelta di ereditare la discretizzazione dal caso stazionario è stata infausta, in quanto essa è risultata troppo pesante ai fini del calcolo in questa tesi riportato. Al di là di questo, la prima simulazione ha permesso di introdurre operativamente il coefficiente di comfort  $Y$ , l'analisi probabilistica con la statistica d'ordine e la valutazione critica dei "contour plot" in riferimento alle variazioni di velocità e temperatura.

Il caso 2 ha invece introdotto la presenza delle persone, importanti sorgenti termiche interne: fatto insegnamento dal primo caso, per la configurazione 2 si è approcciata nuovamente la discretizzazione ai volumi finiti andando a ridurre sensibilmente il tempo di analisi e permettendo così di compiere elaborazioni funzionali, che possano cioè evidenziare un raggiungimento di media costante nel tempo. Si è così riusciti a definire una simulazione che supera la mezz'ora, nella



quale si sono rimarcati aspetti di notevole interesse, quali:

- basse temperature a lungo termine nella fossa orchestrale e forte tendenza al ristagno dell' aria (come riscontrato nella discussione stazionaria);
- Il palcoscenico si trova in un flusso ove le velocità hanno valori che superano il quantile normativo ( $0,2 \frac{m}{s}$ ) con probabilità di poco superiori al 50 %;
- a lungo termine, insiste una tendenza al ristagno nella parte alta della zona occupata, associata anche un incremento termico notevole proveniente dal pubblico simulato;
- si manifesta il fenomeno del "lid driven cavity" ben noto in letteratura, che provoca appunto la nascita di un vortice nella cavità orchestrale;

A valle di questi risultati, nasce il caso 3: sopra l'arco scenico, il teatro offre delle aperture di emergenza (usualmente chiuse) per far fronte a eventuali incendi: considerando l'eterogeneità termica e il forte accumulo di aria calda che si registra nella parte alta della sala occupata, si è ben pensato di studiare questa configurazione ad hoc e confrontarla con il caso precedente. Dalle soluzioni ottenute, è parecchio interessante osservare che agire in questo senso comporta una miglioria nella zona del golfo mistico (una delle zone incriminate) ma che, al contempo, peggiora leggermente la situazione termica in platea, galleria e balconata (fenomeno prevedibile in quanto si abbassano le temperature rispetto condizioni di  $Y$  minori dello zero ottimale) e sul palco, quest'ultimo influenzano dal manifestarsi di un vortice localizzato nella torre scenica. Si propone quindi, di continuare a fare ricerca in questa configurazione, modificando le soluzioni di presa definite: visto l'insorgere di questa struttura vorticoso interna al solo volume scenico, sarebbe interessante osservare come cambiano i fenomeni proponendo delle condizioni al contorno di presa più importanti proprio nelle griglie della torre e ridurre leggermente la presa sopra il boccascena, così da potenzialmente bilanciare la questione termica e la velocità. A monito del prosieguo del progetto, si vuole ultimamente ricordare che gli scambi e gli spostamenti massivi sono parecchio lenti, così come l'analisi di frequenza delle strutture vorticoso ha riportato per quest'ultimo caso: si deve quindi prestare attenzione su un corretto bilancio precisione e costi di simulazione.

Concludo ringraziando il Prof. Ing. Jan Oscar Pralits e il Prof. Ing. Joel Enrique Guerrero Rivas per avermi iniziato all'analisi numerica e per la pazienza dimostrata sopportando, di volta in volta, la mia profana ignoranza. Sono inoltre grato ai miei Professori del percorso triennale per avermi fatto appassionare, esame dopo esame, all'ingegneria civile e ambientale, avvicinandomi ad una disciplina alla quale, inizialmente, mi sentivo inadeguato. Ringrazio, non per ultimo, i miei genitori, per esserci sempre stati nel momento del bisogno e per avermi supportato in un percorso che non è mai stato facile, grazie.

*Paolo Badino*

# Bibliografia

- [1] Giuseppe La Franca. Opera di Firenze, dietro il sipario. 2015.
- [2] Yuanda Cheng, Jianlei Niu, and Naiping Gao. Stratified air distribution systems in a large lecture theatre: A numerical method to optimize thermal comfort and maximize energy saving. *Energy and Buildings*, 55:515 – 525, 2012. Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World.
- [3] Gon Kim, Laura Schaefer, Tae Sub Lim, and Jeong Tai Kim. Thermal comfort prediction of an underfloor air distribution system in a large indoor environment. *Energy Buildings*, 64(Complete):323–331, 2013.
- [4] Valentina Costa and Giulia Macciò. Approccio CFD allo studio della climatizzazione nel Teatro Carlo Felice di Genova. Master’s thesis, Università degli studi di Genova, 12 2019.
- [5] K.W.D. Cheong, E. Djunaedy, Y.L. Chua, K.W. Tham, S.C. Sekhar, N.H. Wong, and M.B. Ullah. Thermal comfort study of an air-conditioned lecture theatre in the tropics. *Building and Environment*, 38(1):63 – 73, 2003.
- [6] Mohammad Hassan Fathollahzadeh, Ghassem Heidarinejad, and Hadi Parsdarshahri. Producing a better performance for the under floor air distribution system in a dense occupancy space. *Energy and Buildings*, 126:230 – 238, 2016.
- [7] Horia Hangan, F McKenty, L Gravel, and R Camarero. Case study: Numerical simulations for comfort assessment and optimization of the ventilation design for complex atriums. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89:1031–1045, 09 2001.

- [8] M. Kavgic, D. Mumovic, Z. Stevanovic, and A. Young. Analysis of thermal comfort and indoor air quality in a mechanically ventilated theatre. *Energy and Buildings*, 40(7):1334 – 1343, 2008.
- [9] Nuno M. Mateus and Guilherme Carrilho da Graça. Simulated and measured performance of displacement ventilation systems in large rooms. *Building and Environment*, 114:470 – 482, 2017.
- [10] P. Ricciardi, A. Ziletti, and C. Buratti. Evaluation of thermal comfort in an historical italian opera theatre by the calculation of the neutral comfort temperature. *Building and Environment*, 102:116 – 127, 2016.
- [11] Elisabetta Brusa. Teatro Carlo Felice-storia di un teatro, web page: <https://www.youtube.com/watch?v=HYjKwSPIFmQ>.
- [12] ASHRAE. ASHRAE Handbook-Fundamentals SI edition. 2013.
- [13] Simone Zuccher. Note di fluidodinamica, web page: <http://profs.sci.univr.it/~zuccher/downloads/fd-zuccher.pdf>.
- [14] C.Pisoni G.Guglielmini. *Introduzione alla trasmissione del calore*. Casa Editrice Ambrosiana, 2005.
- [15] ASHRAE. ASHRAE Handbook-HVAC Applications Heating, Ventilating and air-conditioning Applications. 2015.
- [16] ISO. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730:2005). 2005.