

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
- Sede di Forlì -**

**CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe: L-9**

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In

Fisica Tecnica

**Studio preliminare di flusso attorno ad un pantografo per treno ad
alta velocità**

CANDIDATO

Giuseppe Cecchini

RELATORE

Prof. Giampietro Fabbri

CORRELATORI

Dott. Riccardo Rossi

Ing. Luca Barbone

Anno Accademico 2013/2014

Sessione I^a

Sommario

In questo elaborato di tesi viene presentata la comparazione tra due codici CFD, rispettivamente Fluent e OpenFOAM, mediante simulazioni che sono alla base di uno studio numerico di flusso attorno ad un pantografo per treno ad alta velocità. Si è apprezzato quindi la facilità d'uso di un software venduto tramite licenza e la difficoltà di un software open source come OpenFOAM, il quale però ha vantaggi in termini di adattamento ai casi più specifici. Sono stati quindi studiati due casi, scambio termico in regime laminare attorno ad un cilindro bidimensionale e flusso turbolento completamente sviluppato in un canale. Tutte le simulazioni numeriche hanno raggiunto convergenza e sono state validate positivamente mediante confronto con dati sperimentali. Il primo caso prevede un cilindro investito da un flusso a temperatura minore rispetto alla temperatura della superficie del cilindro; per avere più riscontri, sono state condotte diverse prove a valori differenti del numero di Prandtl, e per ogni simulazione è stato ricavato il corrispondente numero di Nusselt, successivamente comparato con i dati sperimentali per la validazione delle prove. A partire dalla creazione della griglia di calcolo, è stato effettuato uno studio del fenomeno in questione, creando così una griglia di calcolo sviluppata a valle del cilindro avente maggior densità di celle a ridosso della parte del cilindro. In aggiunta, svolgendo le prove con schemi numerici sia del primo che del secondo ordine, si è constatata la miglior sensibilità degli schemi numerici del secondo ordine rispetto a quelli del primo ordine. La seconda tipologia di simulazioni consiste in un flusso turbolento completamente sviluppato all'interno di un canale; sono state svolte simulazioni senza e con l'uso delle *wall functions*, e quindi usate griglie di calcolo differenti per i due tipi di simulazioni, già disponibili per entrambi i software. I dati ottenuti mostrano uno sforzo computazionale maggiore per le simulazioni che non prevedono l'uso delle *wall functions*, e quindi una maggiore praticità per le simulazioni con le *wall functions*. Inoltre, le simulazioni di questo secondo caso sono state svolte con diversi modelli di turbolenza; in Fluent sono stati utilizzati i modelli $k-\varepsilon$ e RSM mentre in OpenFOAM è stato utilizzato solo il modello $k-\varepsilon$ in quanto il modello RSM non è presente. La validazione dei risultati è affidata alla comparazione con i dati sperimentali ricavati da Moser et al mediante simulazioni DNS, mettendo in risalto la minor accuratezza delle equazioni RANS.

Indice

Sommario	iii
Lista delle Figure	vii
Liste delle Tabelle	ix
1 Introduzione	1
2 Modellizzazione numerica	3
2.1 Modello matematico	3
2.2 Modello per i fluidi	4
2.3 Discretizzazione	5
2.3.1 Metodo ai volumi finiti	5
2.3.1.1 Schemi numerici upwind	6
2.4 Modellizzazione della turbolenza	7
2.4.1 Equazioni RANS	8
2.4.2 Il modello $k-\varepsilon$	10
2.4.3 Il modello <i>RSM</i>	11
2.4.4 Leggi di parete	11
2.5 Griglia di calcolo	13
2.6 Fluent	14
2.7 OpenFOAM	15
3 Descrizione delle prove numeriche	17
3.1 Scambio termico in regime laminare attorno ad un cilindro bidimensionale	17
3.1.1 Analisi	18
3.1.2 Griglia di calcolo	20
3.1.3 Setup della simulazione	23
3.2 Flusso turbolento completamente sviluppato tra due lamine piane	24
3.2.1 Analisi	25
3.2.2 Griglia di calcolo	27

3.2.3	Setup della simulazione	33
4	Risultati delle simulazioni numeriche	35
4.1	Scambio termico in regime laminare attorno ad un cilindro bidimensionale	35
4.1.1	Convergenza	35
4.1.2	Risultati	37
4.1.3	Validazione delle simulazioni numeriche	39
4.2	Flusso turbolento completamente sviluppato tra due lamine piane	42
4.2.1	Convergenza	42
4.2.2	Risultati	44
4.2.3	Validazione delle simulazioni numeriche	46
5	Conclusioni	51
	Bibliografia	53

Elenco delle Figure

2.1	Notazione cartesiana per un volume di controllo in due dimensioni	7
2.2	Legge di parete	13
2.3	Forme più comuni degli elementi della griglia di calcolo	14
3.1	Griglia di calcolo utilizzata in Fluent	21
3.2	Dettaglio della griglia di calcolo utilizzata in Fluent	21
3.3	Griglia di calcolo utilizzata in OpenFOAM	22
3.4	Dettaglio della griglia di calcolo utilizzata in OpenFOAM	23
3.5	Definizione della U_{bar}	27
3.6	Griglia di calcolo utilizzata in Fluent con <i>wall functions</i>	29
3.7	Dettaglio griglia di calcolo utilizzata in Fluent con <i>wall functions</i>	29
3.8	Griglia di calcolo utilizzata in Fluent senza <i>wall functions</i>	30
3.9	Dettaglio griglia di calcolo utilizzata in Fluent senza <i>wall functions</i>	30
3.10	Griglia di calcolo utilizzata in OpenFOAM con <i>wall functions</i>	31
3.11	Dettaglio griglia di calcolo utilizzata in OpenFOAM con <i>wall functions</i>	31
3.12	Griglia di calcolo utilizzata in OpenFOAM senza <i>wall functions</i>	32
3.13	Dettaglio griglia di calcolo utilizzata in OpenFOAM senza <i>wall functions</i>	32
4.1	Convergenza delle simulazioni in Fluent	36
4.2	Convergenza delle simulazioni in OpenFOAM	36
4.3	Scambio termico attorno al cilindro (Fluent)	37
4.4	Scambio termico attorno al cilindro (OpenFOAM)	37
4.5	Profili di velocità ad 1 m a valle dal centro del cilindro	38
4.6	Profili di velocità a 10 m a valle dal centro del cilindro	38
4.7	Convergenza delle simulazioni con <i>wall functions</i> in Fluent	43
4.8	Convergenza delle simulazioni senza <i>wall functions</i> in Fluent	43
4.9	Convergenza delle simulazioni con <i>wall functions</i> in OpenFOAM	44
4.10	Convergenza delle simulazioni senza <i>wall functions</i> in OpenFOAM	44
4.11	Particolare dello sviluppo della velocità all'interno del canale, Fluent, $k-\epsilon$	45
4.12	Particolare dello sviluppo della velocità all'interno del canale, Fluent, <i>RSM</i>	45
4.13	Particolare dello sviluppo della velocità all'interno del canale, OpenFOAM, $k-\epsilon$	45
4.14	Profili di velocità media	47

4.15	Profili energia cinetica turbolenta	47
4.16	Profili tensioni di Reynolds uv^+	47
4.17	Profili tensioni di Reynolds uu^+	48
4.18	Profili tensioni di Reynolds vv^+	48
4.19	Profili tensioni di Reynolds ww^+	48
4.20	Profili viscosity ratio	49

Elenco delle Tabelle

3.1	Proprietà dei fluidi utilizzate in Fluent	19
3.2	Proprietà dei fluidi utilizzate in OpenFOAM.....	19
3.3	Risoluzione della griglia di calcolo utilizzata in Fluent	21
3.4	Risoluzione della griglia di calcolo utilizzata in OpenFOAM	23
3.5	Condizioni al contorno	23
3.6	Schemi risolutivi utilizzati in Fluent	24
3.7	Schemi risolutivi utilizzati in OpenFOAM	24
3.8	<i>Wall functions</i> OpenFOAM.....	25
3.9	Proprietà fluido.....	26
3.10	Risoluzione della griglia di calcolo con <i>wall functions</i> utilizzata in Fluent.....	29
3.11	Risoluzione della griglia di calcolo senza <i>wall functions</i> utilizzata in Fluent.....	30
3.12	Risoluzione della griglia di calcolo con <i>wall functions</i> utilizzata in OpenFOAM.....	31
3.13	Risoluzione della griglia di calcolo senza <i>wall functions</i> utilizzata in OpenFOAM....	32
3.14	Schemi risolutivi utilizzati in Fluent	33
3.15	Schemi risolutivi utilizzati in OpenFOAM	33
4.1	Coefficiente di resistenza	38
4.2	Scambio termico ricavato da Fluent	39
4.3	Coefficiente di scambio termico delle simulazioni in Fluent.....	40
4.4	Scambio termico ricavato da OpenFOAM	41
4.5	Coefficiente di scambio termico delle simulazioni in OpenFOAM.....	41
4.6	Numero di Nusselt delle simulazioni del primo ordine.....	41
4.7	Numero di Nusselt delle simulazioni del secondo ordine	42

Capitolo primo

Introduzione

La fluidodinamica computazionale o CFD (*Computational Fluid Dynamics*) è un ramo della fluidodinamica che risolve per via computazionale le equazioni di Navier-Stokes e altre equazioni di trasporto. L'uso della CFD è in forte crescita nell'ambito industriale in quanto permette di effettuare una valutazione preliminare dei fenomeni fluidodinamici attorno a componenti in via di sviluppo, riducendone così le tempistiche dei test fisici e quindi i costi di progettazione. Proprio per questo motivo, in prima analisi, questo progetto di tesi prevedeva l'analisi del flusso attorno ad un pantografo di treno ad alta velocità con il software OpenFOAM; per alcuni problemi sorti durante le simulazioni, in via finale questo progetto di tesi prevede un lavoro di preparazione alla simulazione finale del pantografo e cioè lo sviluppo di simulazioni in Fluent e in OpenFOAM e la comparazione dei risultati ottenuti dalle simulazioni stesse, con dati sperimentali e da letteratura.

In questo progetto di tesi viene presentato un confronto tra due diversi codici, Fluent e OpenFOAM. Il primo è un codice commerciale dotato di una propria interfaccia grafica e di utilities al suo interno per il pre-processing e il post-processing; con le giuste conoscenze è un software molto intuitivo e semplice da usare. Il secondo, a differenza di Fluent, è un software open-source sviluppato in linguaggio C++ che non ha una propria interfaccia e si sviluppa interamente mediante compilazione dei dati in apposite *directories*. Per la creazione della griglia di calcolo per Fluent è stato usato il software Gambit, anch'esso commerciale. Questo permette la creazione di griglie strutturate e non, esportabili in diversi formati, tra cui il formato di Fluent (*.msh*); Per quanto riguarda OpenFOAM è stato usato blockMesh, una utility presente in OpenFOAM che consente di creare mesh. Per la fase di post-processing si sono seguite due vie differenti; in Fluent è già presente una parte del codice che consente la creazione di grafici e la visualizzazione dei risultati, quindi è stata

eseguita all'interno del software stesso. Per quanto riguarda la fase di post-processing in OpenFOAM è stato usato il software open-source Paraview;

Sono state svolte due tipi di simulazioni: scambio termico di flusso laminare attorno ad un cilindro bidimensionale e flusso turbolento totalmente sviluppato in un canale; la scelta di studiare questi fenomeni è stata dettata dal fatto che costituivano una introduzione all'uso dei software e al tempo stesso costituivano materiale per la simulazione finale del pantografo. In entrambi i casi vengono analizzate la creazione della griglia di calcolo, il setup della simulazione e infine la validazione dei risultati. Per quanto riguarda il cilindro, la validazione dei risultati è affidata al confronto tra il numero di Nusselt ricavato da letteratura [6] e quello ricavato dalla simulazione per la simulazione di scambio termico e mentre per quanto riguarda il canale la validazione è affidata alla comparazione dei profili della velocità media, dell'energia cinetica turbolenta e degli sforzi di Reynolds ricavati dai dati sperimentali di Moser et al [7]. Per quanto riguarda il flusso turbolento è stato usato il modello $k-\epsilon$ basato su equazioni RANS; in aggiunta, solo le simulazioni svolte in Fluent sono state riprodotte con il modello RANS *Reynolds stress model*, in quanto il software OpenFOAM non ha tra i modelli di turbolenza disponibili quest'ultimo modello. Tutte le simulazioni prevedono un flusso incomprimibile e regime stazionario.

L'elaborato si sviluppa nel seguente modo: il **capitolo secondo** presenta una breve introduzione alla CFD, dal modello matematico al modello numerico di nostro interesse; nel **capitolo terzo** sono presentati i due casi di studio, lo scambio termico attorno al cilindro bidimensionale e il flusso turbolento all'interno del canale. Infine nel **capitolo quarto** sono presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni e nel **capitolo quinto** sono presenti alcune conclusioni del lavoro svolto.

Capitolo secondo

Modellizzazione numerica

La dinamica dei fluidi è descritta da equazioni alle derivate parziali, meglio conosciute con il nome di equazioni di Navier-Stokes; queste, se non in casi semplici come flussi laminari attorno a geometrie semplici, difficilmente sono risolvibili. Per questo motivo, mediante la CFD (*computational fluid dynamics*) si riconduce il problema ad un problema di tipo numerico. Nell'ambito della CFD, si trasforma il set delle equazioni di Navier-Stokes in un sistema di equazioni algebriche, al quale si aggiunge la creazione della griglia di calcolo del dominio spaziale. Con opportune condizioni al contorno si ottiene la soluzione delle equazioni di Navier-Stokes per via numerica.

In questo capitolo verranno trattati gli argomenti alla base della fluidodinamica computazionale, dal modello matematico fino ai modelli di risoluzione, passando per la modellizzazione della turbolenza. In aggiunta, verranno analizzati anche i software utilizzati nel progetto di tesi.

2.1 Modello matematico

Il modello matematico più generale della dinamica dei fluidi è costituito dal principio di conservazione della massa, dal principio di conservazione della quantità di moto e dal principio di conservazione dell'energia. Le equazioni che si ricavano da questi, in forma differenziale sono:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.1b)$$

$$\rho \frac{dE_t}{dt} = -\text{div}(\rho \mathbf{u}) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + \text{div}(k \cdot \text{grad } T) + S_E \quad (2.1c)$$

Con l'ipotesi di fluido newtoniano, cioè un fluido cui gli sforzi viscosi sono linearmente proporzionali alla deformazione, il tensore degli sforzi viscosi vien espresso come

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.2)$$

Sostituendo la (2.2) nella (2.1b), ricaviamo

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \rho g_i \quad (2.3)$$

La (2.3) unita alla (2.1a) formano il set di equazioni detto equazioni di Navier-stokes. Come detto in precedenza, le equazioni di Navier-Stokes non trovano soluzione in forma chiusa, quindi è necessaria una discretizzazione.

2.2 Modello per i fluidi

Nelle simulazioni svolte, è stato utilizzato un modello che si basa su alcune semplificazioni. Il fluido in esame è studiato come incomprimibile e quindi con $\rho = \text{costante}$; quindi le equazioni di Navier-Stokes diventano

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2.4a)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + g_i \quad (2.4b)$$

Inoltre, il flusso può essere studiato come stazionario; di conseguenza, le equazioni (2.4a-b) diventano

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2.5a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + g_i \quad (2.5b)$$

Il set di equazioni (2.5a-b) è il set da discretizzare per arrivare alla soluzione finale; per quanto riguarda la simulazione di scambio termico, va aggiunto al set di

equazioni anche l'equazione dell'energia (2.1c) la quale aggiunge alle variabili la temperatura.

2.3 Discretizzazione

Dopo aver ricavato il modello matematico con le equazioni alle derivate parziali, bisogna discretizzare questo per renderlo risolvibile mediante calcolo computazionale. Il metodo più semplice per raggiungere questo obiettivo è discretizzare il dominio dello spazio in un certo numero di celle che vanno a formare una griglia di calcolo e quindi applicare degli algoritmi su ogni cella per risolvere le equazioni del moto in maniera iterativa.

Le tecniche più comuni di discretizzazione sono:

- metodo alle differenze finite
- metodo ai volumi finiti
- metodo agli elementi finiti

Il più utilizzato è il metodo ai volumi finiti, metodo su cui si basano anche i codici utilizzati in questo progetto di tesi. Per questo motivo il prossimo paragrafo viene interamente dedicato alla spiegazione di questo metodo.

2.3.1 Metodo ai volumi finiti

Il metodo ai volumi finiti lavora con la forma integrale delle equazioni di conservazione. Il dominio è suddiviso in volumi finiti dei quali il centro-cella rappresenta il nodo di calcolo delle equazioni di conservazione. L'interpolazione è usata per esprimere i valori variabili alla superficie in termini del valore del nodo. Questo, è un metodo che si adatta a qualunque tipo di griglia. Il concetto di base di questo metodo è la suddivisione del dominio di calcolo in un numero finito di piccoli volumi di controllo i quali compongono una griglia che non definisce dei nodi di calcolo, ma solo i "contorni" dei volumi di controllo, quindi le superfici laterali di ogni volume. Il nodo di calcolo può essere posto al centro di ogni volume di controllo definito dalla griglia, o in maniera alternativa, può essere sviluppata la griglia partendo dai nodi di calcolo facendo in modo che le superfici dei volumi di controllo giacciono a metà tra due nodi.

In ogni volume di controllo devono essere risolte le equazioni di conservazione nella loro forma integrale, che può essere così espressa per una generica variabile ϕ :

$$\int_S \rho \phi \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \Gamma \nabla \phi \cdot \mathbf{n} dS + \int_V q_\phi dV \quad (2.6)$$

In cui Γ è la diffusività di ϕ e q_ϕ è un termine che tiene conto della generazione o della dissipazione di ϕ , quindi una sorgente o un pozzo.

L'equazione (2.6) deve essere applicata su tutti i volumi di controllo così come può essere applicata all'intero dominio di calcolo; se si sommassero le equazioni per i singoli volumi di controllo, si otterrebbe l'equazione di conservazione globale. È proprio in questa caratteristica che risiede il principale vantaggio del metodo dei volumi finiti: la proprietà di conservazione è garantita su ogni singolo volume, così come viene garantita a livello globale su tutto il dominio.

Per ottenere un'equazione algebrica per ciascun volume di controllo, gli integrali di superficie e di volume devono essere opportunamente approssimati. Da qui, il vero limite del metodo; i livelli di approssimazione, come viene spiegato nel seguito sono tre: interpolazione, integrazione e differenziazione.

2.3.1.1 Schemi numerici upwind

Gli schemi numerici upwind utilizzano una matrice adattiva o *solution-sensitive* per simulare numericamente la direzione di propagazione delle informazioni in un campo di flusso. Sono schemi molto semplici nei quali si costruisce un'interpolazione lineare di tipo *backward* o *forward* a seconda della direzione del vettore della velocità. In sostanza, il valore della funzione nel centro della faccia considerata è pari al valore in uno dei due centri-cella le cui celle hanno in comune la faccia in questione.

Lo schema numerico upwind del primo ordine è il più semplice possibile. Lo schema secondo la direzione della velocità normale alla superficie, è il seguente, con riferimento alla figura 2.1:

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & \text{se } (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_e > 0 \\ \phi_E & \text{se } (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_e < 0 \end{cases}$$

Questa soluzione è l'unica che soddisfa il criterio di *boundedness* (cioè non genera soluzioni oscillanti) in maniera incondizionata. Tuttavia è un'approssimazione poco curata, che introduce una diffusività numerica non trascurabile.

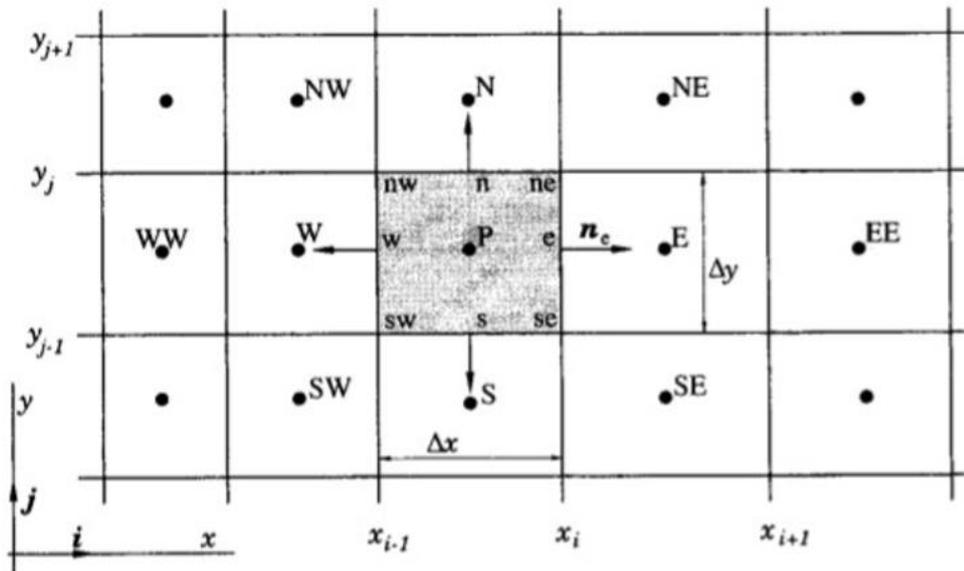


Figura 2. 1 - Notazione cartesiana per un volume di controllo in due dimensioni.

Un miglioramento dello schema upwind del primo ordine è dato dallo schema upwind del secondo ordine, conosciuto anche come schema upwind lineare. Lo schema upwind del secondo ordine, a differenza dello schema upwind del primo ordine, valuta una grandezza da un'extrapolazione lineare su due nodi a monte secondo il verso del flusso. Con riferimento alla figura 2.1:

$$\phi_e = \begin{cases} \frac{4\phi_P - \phi_W}{3} & \text{se } (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_e > 0 \\ \frac{4\phi_E - \phi_{EE}}{3} & \text{se } (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_e < 0 \end{cases}$$

Questo schema è meno diffusivo se comparato con lo schema upwind del primo ordine; Si tratta di uno schema con accuratezza maggiore rispetto allo schema upwind del primo ordine, tuttavia è possibile che generi soluzioni oscillanti.

2.4 Modellizzazione della turbolenza

La turbolenza è un regime che si presenta quando il flusso supera un certo valore del numero di Reynolds; in un flusso turbolento, il moto delle particelle del fluido risulta essere caotico e disordinato, senza seguire traiettorie ordinate come nel caso di regime laminare. In un flusso turbolento la velocità assume direzione e modulo diverso da punto a punto e sono presenti strutture vorticosi; da questo appunto si sviluppa la vorticità, fenomeno tipico di un flusso in regime turbolento. È fortemente dipendente dal tempo, anche se in molti casi, come vedremo successivamente, si

assume la semplificazione di moto stazionario. In un flusso turbolento sono in gioco grandezze ben maggiori rispetto ad un flusso laminare, quindi è di grande importanza riuscire a studiare questo regime.

La maggior parte dei fenomeni esistenti in natura è di tipo turbolento, quindi per la simulazione numerica di questo regime sono stati sviluppati diversi approcci. In generale, esistono tre approcci diversi per la simulazione della turbolenza:

- DNS (*direct numerical solution*), è l'approccio concettualmente più semplice; si discretizzano lo spazio e il tempo con griglie della dimensione voluta e si eseguono i calcoli su esse. È l'approccio che restituisce i risultati più accurati ma ha un costo computazionale elevatissimo, e infatti devono essere impiegati dei super-computer. Per le applicazioni industriali risulta quindi troppo dispendioso.
- LES (*large eddy simulations*), consiste nel calcolare numericamente il comportamento delle scale turbolente più grandi e modellare opportunamente le scale più piccole (Sub-grid Scale o scale di Kolmogorov). Per operare questa suddivisione si introducono filtri numerici creati ad-hoc. Fornisce risultati più accurati delle RANS e ha al contempo un costo computazionale notevolmente inferiore a quello della DNS, per questo motivo è un metodo in forte sviluppo.
- RANS (*Reynolds averaged Navier-Stokes*), si basano sull'assunzione che si possa vedere il moto turbolento come formato da un moto medio e da una sua fluttuazione nel tempo. Le grandezze delle equazioni di partenza vengono quindi mediate in un certo intervallo di tempo; così facendo i tempi di calcolo vengono notevolmente ridotti in quanto le scale del moto medio risultano essere notevolmente maggiori di quelle del moto turbolento. Richiedono l'utilizzo di ulteriori equazioni (come ad esempio nel modello k- ϵ) per la chiusura del problema.

Le simulazioni svolte in questo progetto si basano sulle equazioni RANS, descritte di seguito.

2.4.1 Equazioni RANS

Le equazioni RANS, o equazioni mediate alla Reynolds, sono le equazioni di Navier-Stokes in cui le grandezze non risultano istantanee ma mediate in un certo periodo di

tempo; quest'ultimo deve essere tale da rilevare le grandezze della turbolenza da studiare e sufficientemente grande rispetto ai disturbi della turbolenza. Questo approccio di soluzione della turbolenza, in termini computazionali è assai economico; infatti, studiando solo il campo medio della turbolenza anche la griglia di calcolo può essere semplificata, in quanto la turbolenza presenta dettagli più grossolani rispetto ad altri tipi di simulazione. Inoltre, lo sforzo computazionale derivato dall'integrazione delle equazioni in una griglia meno fitta è minore rispetto ad una griglia più particolareggiata. Sono proprio questi vantaggi che hanno portato ad un grosso sviluppo dei modelli di turbolenza basati su equazioni RANS.

La scomposizione di Reynolds prevede che una variabile generica φ può essere scomposta in una componente media più una componente fluttuante (a valor medio nullo):

$$\varphi(t) = \bar{\varphi} + \varphi'(t)$$

dove $\bar{\varphi}$ è la componente media e $\varphi'(t)$ è la componente fluttuante di φ . Il campo medio è definito come

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} \varphi(t) dt$$

Come già anticipato, la media nel tempo della componente delle fluttuazioni è nulla e infatti

$$\int_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} \varphi'(t) dt = 0$$

Ad esempio, per la velocità \mathbf{u} abbiamo:

$$\mathbf{u}(x_i, t) = \bar{\mathbf{u}}(x_i) + \mathbf{u}'(x_i, t)$$

$$\bar{\mathbf{u}}(x_i) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} \mathbf{u}(x_i, t) dt$$

$$\int_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} \mathbf{u}'(x_i, t) dt = 0$$

Analogamente vale per le altre grandezze come pressione e tensori degli sforzi. Sostituendo questa trattazione delle grandezze nelle equazioni di Navier-Stokes (2.5a-b) ricaviamo

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.7a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) \quad (2.7b)$$

Queste equazioni prendono il nome di equazioni mediate alla Reynolds, meglio conosciute come equazioni RANS. Si noti che è stato aggiunto il termine $-\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j)$ all'equazione (2.5b) a seguito della trattazione RANS. Questo termine può essere considerato come una nuova componente degli sforzi, detta tensore di Reynolds. Questo è un tensore di secondo ordine le cui componenti possono essere considerate come componenti aggiuntive che sottraggono energia al campo medio per trasferirla alle fluttuazioni. Per un fluido newtoniano, introducendo l'ipotesi di Boussinesq, il tensore di Reynolds risulta

$$u_i u_j = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.8)$$

dove k è l'energia cinetica turbolenta e μ_t è la viscosità dinamica turbolenta.

A scapito di questo metodo bisogna dire che, essendo uno studio mediato delle grandezze della turbolenza e variando la turbolenza da caso a caso, un modello unico RANS per tutti i casi non esiste; è in questo modo che si sono sviluppato molteplici modelli di risoluzione di tipo RANS, come i modelli k - ε e RSM usati in questo progetto e descritti nei paragrafi a seguire.

2.4.2 Il modello k - ε

Il modello k - ε è uno dei metodi più usati per la simulazione della turbolenza data la sua robustezza ed economicità, anche se per flussi con alti gradienti di pressione non è il modello ottimale. È un modello a 2 equazioni, cioè che include due equazioni di trasporto extra per rappresentare le proprietà turbolente del flusso. Come suggerisce il nome, le equazioni aggiuntive di questo modello sono l'equazione di trasporto dell'energia cinetica turbolenta k e l'equazione di trasporto della dissipazione ε , variabile quest'ultima che definisce il livello di turbolenza mentre la prima determina l'energia della turbolenza.

Nel modello k - ε la viscosità turbolenta è ricavabile dalla seguente espressione:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

con C_μ costante del modello pari a 0.09; inoltre le due equazioni di trasporto sono:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P - \rho \varepsilon \quad (2.10a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \varepsilon \quad (2.10b)$$

Dove C_1 , C_2 , σ_k e σ_ε sono costanti e valgono rispettivamente 1.44, 1.92, 1 e 1.3.

Esistono diverse varianti del modello k- ε , ognuna delle quali si adatta a problemi specifici. Il più comune è il modello *Standard k- ε* (SKE), il quale raggruppa i vantaggi e gli svantaggi descritti in precedenza. Una variante di questo è il modello *Re-Normalisation Group k- ε* (RNG), il quale è utilizzato per flussi con separazione e zone di ricircolo. Esiste poi un'implementazione di quest'ultimo, il modello *Realizable k- ε* (RKE), il quale ha un comportamento ottimale per flussi con strato limite soggetto ad elevati gradienti di pressione avversi, separazione e ricircolo. Nella simulazione del flusso turbolento all'interno del canale è stato usato il modello *standard k- ε* con e senza *wall functions*, descritte nel capitolo seguente.

2.4.3 Reynolds stress models (RSM)

Il modello *Reynolds stress model* è un modello di turbolenza RANS; è un modello basato direttamente sugli sforzi di Reynolds ed ottenuto attraverso equazioni di trasporto, una per ciascuna componente del tensore degli sforzi di Reynolds. È un metodo che richiede un costo computazionale abbastanza elevato, come sarà mostrato nei capitoli seguenti.

Questo modello evita l'ipotesi di Boussinesq, e quindi sarà svolta un'analisi più complessa tensoriale dei termini $u_i u_j$ presente nell'equazione (2.7b), risultando così più completa e più fedele alla complessa fisica del fenomeno rispetto all'analisi di tipo scalare introdotta con l'ipotesi di Boussinesq.

Come per il modello k- ε , anche per il modello RSM ne esistono varie tipologie. In Fluent sono disponibili tre varianti del modello, *linear Pressure-Strain*, *quadratic Pressure-Strain* e *stress-omega*, mentre in OpenFOAM il modello RSM non è disponibile. Per le simulazioni del canale svolte con questo modello, è stato utilizzato il modello *linear Pressure-Strain Reynolds stress model*.

2.4.4 Leggi di parete

Nella maggior parte delle applicazioni ingegneristiche è necessario studiare le grandezze presenti vicino alle pareti solide. Per catturare i fenomeni a parete del flusso, si può scegliere tra due opzioni: creare una griglia di calcolo più fine nella regione vicino alla parete solida in modo da catturare le variazioni del flusso, oppure creare una griglia di calcolo con celle della giusta grandezza nella regione vicino a parete utilizzando le *wall functions*. Quest'ultime sono un set di funzioni semi-empiriche create per soddisfare lo studio della regione vicino a parete, regione in cui predominano i fenomeni viscosi.

In un flusso turbolento, la velocità media a parete ha l'andamento secondo il grafico in figura 2.2. Come si può notare dal grafico, la velocità media, dopo un certo valore della Y^+ , è proporzionale al logaritmo della stessa Y^+ . La formulazione logaritmica di questa legge risulta:

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln Y^+ + B \quad (2.11)$$

dove, Y^+ è la distanza dalla parete adimensionale, definita come

$$Y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (2.12)$$

A sua volta, u_τ è la *friction velocity* definita come

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.13)$$

con τ_w sforzo a parete.

Viene quindi utilizzato come parametro di riferimento la distanza adimensionale da parete Y^+ ; nel primo caso si ha che la Y^+ ha un valore compreso nella regione del substrato viscoso, e quindi $Y^+ < 30$; inoltre non sempre è possibile costruire una griglia fine vicino a parete e, quando è possibile, lo sforzo computazionale ha un grosso aumento. Nel secondo caso, cioè con l'uso delle *wall functions*, si costruisce una mesh della quale il centroide delle celle a parete cade ad una distanza adimensionale Y^+ tale che questo si trova nella parte logaritmica del grafico in figura 2.2, e cioè nella regione in cui il flusso turbolento è completamente sviluppato.

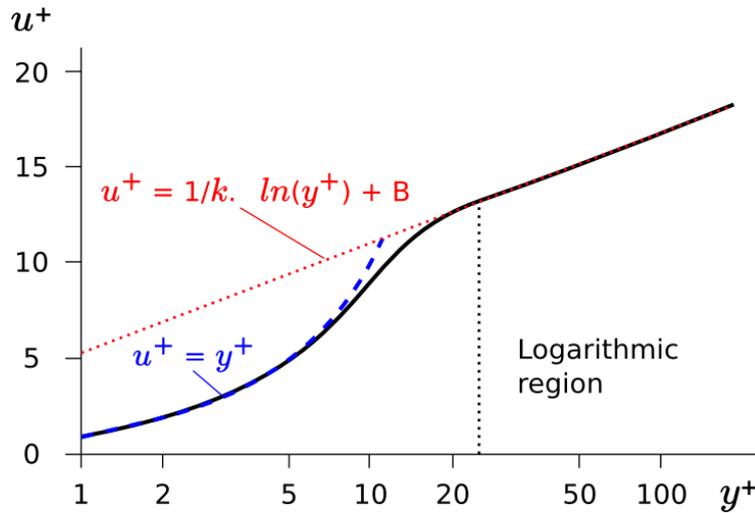


Figura 2. 2 - Legge di parete

Quindi, in una simulazione che prevede l'uso delle *wall functions* bisogna fare uno studio accurato della Y^+ ideale per la geometria presa in esame.

In generale, il valore della Y^+ è compreso tra 30 e 300 e non può essere impostato a priori, ma va quindi verificato successivamente.

Esistono diversi tipi di *wall functions*; nel caso studiato in questo progetto di tesi sono state utilizzate le *standard wall functions* e le *enhanced wall functions*; quest'ultime implementano l'uso di una griglia con risoluzione maggiore nella regione vicino a parete.

2.5 Griglia di calcolo

La costruzione della griglia di calcolo (o mesh) è un aspetto molto importante delle simulazioni. Essa ha un impatto significativo sull'accuratezza della soluzione, sui tempi computazionali e sulla convergenza della simulazione con la realtà. In pratica, con la creazione della griglia di calcolo si discretizza il dominio di calcolo in una griglia le cui celle devono essere più piccole delle scale dimensionali delle strutture spaziali significative del campo di moto da risolvere. Su questa griglia di calcolo, il software andrà poi a risolvere le equazioni discretizzate con le opportune condizioni al contorno.

Le griglie di calcolo possono essere di due tipi, strutturate e non strutturate. Le prime sono formate da celle ordinate, cioè tutte orientate in una direzione preferenziale, mentre le seconde sono formate da elementi di forma casuale, senza un'orientazione

preferenziale. In figura (2.3) sono mostrate le forme più comuni degli elementi della griglia di calcolo.

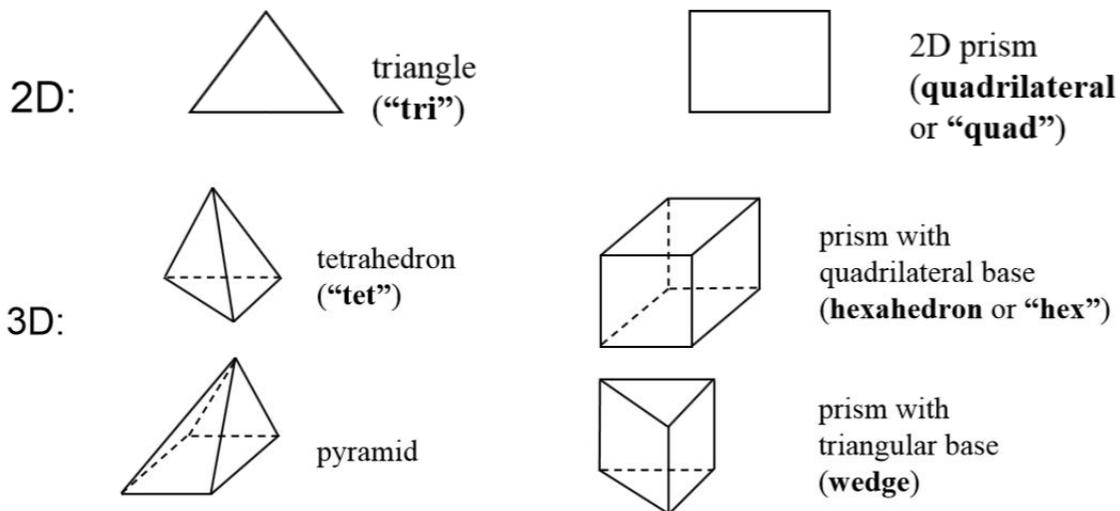


Figura 2. 3: Forme più comuni degli elementi della griglia di calcolo

Per la creazione della griglia di calcolo è richiesta una conoscenza del problema e dei fenomeni ad esso associati. Ad esempio, nella simulazione dello scambio termico ci si aspetta la creazione di una scia a valle del cilindro, e quindi la mesh si deve sviluppare nella parte posteriore al cilindro per catturare lo sviluppo di questa. Inoltre, nel caso preso in esame, è stata costruita una griglia di calcolo con risoluzione maggiore nella parte vicino a parete solida per catturare la creazione della scia. Un altro esempio può essere la creazione di una griglia di calcolo con o senza l'uso delle *wall functions*, come citato in precedenza.

Per la creazione della griglia di calcolo è stato usato il software Gambit per quanto riguarda Fluent e l'utility blockMesh per le griglie di calcolo per OpenFOAM.

2.6 Fluent

Fluent è uno dei software utilizzato in questa tesi; è un software commerciale su licenza per la fluidodinamica computazionale. Per la risoluzione delle equazioni è basato sul metodo ai volumi finiti. Attualmente è uno dei software più diffusi in quanto può essere usato per modellizzare fenomeni di ogni tipo; infatti, è in grado di utilizzare griglie di calcolo strutturate e non, e possiede la maggior parte dei modelli di turbolenza esistenti. Di solito viene associato ad altri software, come Gambit per la

creazione della griglia di calcolo, anche se nelle versioni più recenti sono disponibili del software stesso in grado di creare la griglia di calcolo. Per la fase di post-processing è dotato di applicazioni proprie, come la visualizzazione di grafici e profili dei risultati vari.

2.7 OpenFOAM

OpenFOAM (*Field Operation And Manipulation*) è un software open-source per la CFD. OpenFOAM non è un vero e proprio software, è innanzitutto una libreria scritta in linguaggio C++ che crea eseguibili chiamati *applications*. Il suo scopo è quello di risolvere equazioni differenziali alle derivate parziali attraverso l'approccio dei volumi finiti. In OpenFOAM sono già presenti alcuni modelli, chiamati *solver*, per la risoluzione di vari fenomeni fluidodinamici; con qualche conoscenza di programmazione chiunque può modificare i *solver*. Nei casi presi in esame in questa tesi è stato usato *icoFoam* implementandolo con l'equazione dell'energia per il caso dello scambio termico, e *boundaryFoam* per il caso del flusso turbolento all'interno del canale. Ogni simulazione è strutturata in una directory, la quale ha tre sub-directories che definiscono tutte le variabile della simulazione, dal solver, alle condizioni iniziali, alla griglia di calcolo. Per la creazione della griglia di calcolo, in OpenFOAM è possibile crearla mediante compilazione di un opportuno file oppure importarla da software esterni. In questo caso è stata creata utilizzando l'utilità *blockMesh*, la quale dopo che l'utente ha compilato il file con i dati della mesh, ne crea il modello. Per la fase di post-processing, OpenFOAM possiede una utility interna che rimanda al software ParaView, un software open-source per la visualizzazione dei dati. Tuttavia è sempre possibile utilizzare altri software, data la possibilità di esportare i dati ricavati dalle simulazioni.

Capitolo terzo

Descrizione dei casi di studio

In questo progetto di tesi sono stati presi in considerazione due casi di studio: scambio termico in regime laminare attorno ad un cilindro bidimensionale e flusso turbolento completamente sviluppato tra due lamine piane.

In questo capitolo vengono descritte le simulazioni svolte con Fluent e OpenFOAM. In primo luogo sarà svolta l'analisi del fenomeno, per poi procedere con la descrizione della creazione della griglia di calcolo e del setup della prova.

3.1 Scambio termico in regime laminare attorno ad un cilindro bidimensionale

Questa simulazione ha come obiettivo la simulazione dello scambio termico attorno ad un cilindro bidimensionale ed il confronto con correlazione sperimentale del numero di Nusselt medio \overline{Nu} che caratterizza il trasferimento di calore tra la superficie del cilindro e la corrente. Le simulazioni vengono eseguite a diversi numeri di Prandtl utilizzando le seguenti ipotesi:

- Flusso laminare
- Regime stazionario
- Fluido incomprimibile
- Convezione forzata

Inoltre, si ipotizza la superficie del cilindro mantenuta a temperatura T_c costante e uniforme. La validazione dei risultati è affidata al confronto con il numero di Nusselt medio ricavato da correlazione sperimentale [6]. Al fine di valutare la sensibilità della soluzione ottenuta dallo schema numerico utilizzato, il calcolo viene svolto a diversi valori del numero di Prandtl utilizzando sia lo schema UPWIND del primo ordine che quello del secondo ordine.

3.1.1 Analisi

Lo studio di un flusso laminare attorno ad un cilindro bidimensionale è un problema noto della fluidodinamica. Questo costituisce il primo step per studi più pratici, come flussi attorno a scambiatori tridimensionali.

Un flusso in regime laminare è un flusso che ha andamento ordinato e regolare. È un regime che si presenta al di sotto di una certa soglia del numero di Reynolds, ed in natura non è molto presente.

Numero di Reynolds

Come anticipato, il numero di Reynolds è il parametro adimensionale che indica se il flusso è in regime laminare o turbolento. È il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosse, definito dalla relazione

$$Re = \frac{\mathbf{u}\rho D}{\mu} \quad (3.1)$$

Al fine di impostare un flusso laminare e stazionario, per impostare $Re = 20$ in Fluent, avendo fissato i valori di D , ρ e μ , è stata ricavata la velocità del flusso $\mathbf{u} = 3.964 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

In OpenFOAM si è proceduto analogamente a quanto fatto in Fluent, andando a impostare la velocità del flusso \mathbf{u} all'inlet di $3.964 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Numero di Prandtl

Il numero di Prandtl è un parametro adimensionale che esprime il rapporto della diffusività cinematica rispetto alla diffusività termica; è espresso dalla relazione

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (3.2)$$

in cui k è la conducibilità termica. Il numero di Prandtl è spesso utilizzato nei problemi relativi allo scambio termico per convezione; è una caratteristica del fluido e non dipende dal campo di moto considerato. Per avere più riscontri, sono state svolte quattro simulazioni a diversi valori del numero di Prandtl (0.5, 1, 2.5, 5).

Per la definizione dei diversi valori del numero di Prandtl in Fluent si è agito sulle proprietà del fluido. Infatti, sono stati impostati diversi valori del calore specifico a pressione costante mantenendo inalterati gli altri termini della relazione (3.2), come da tabella 3.1.

	$P_r = 0.5$	$P_r = 1$	$P_r = 2.5$	$P_r = 5$
C_p [$J/Kg \cdot K$]	941.97	1883.95	4709.89	9419.77
μ [$kg/m \cdot s$]	9.91e-06	9.91e-06	9.91e-06	9.91e-06
k [$W/m \cdot K$]	0.01867	0.01867	0.01867	0.01867
ρ [kg/m^3]	0.025	0.025	0.025	0.025

Tabella 3. 1: **Proprietà dei fluidi utilizzate in Fluent**

Per la definizione dei vari valori di P_r in OpenFOAM, avendo già definito la viscosità cinematica ν , si è agito sulla diffusività termica α opportunamente introdotta nelle transportProperties (vedi tabella 3.2).

	$P_r = 0.5$	$P_r = 1$	$P_r = 2.5$	$P_r = 5$
α [m^2/s]	7.928e-04	3.9464e-04	1.585e-04	7.92e-05
ν [m^2/s]	3.9464e-04	3.9464e-04	3.9464e-04	3.9464e-04

Tabella 3. 2: **Proprietà dei fluidi utilizzate in OpenFOAM**

Numero di Nusselt

Un altro parametro adimensionale utilizzato in questa simulazione è il numero di Nusselt, definito dalla relazione

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3.3)$$

dove L è la grandezza caratteristica presa in esame. Questo parametro adimensionale esprime il rapporto tra il flusso di calore scambiato per convezione e il flusso di calore scambiato per conduzione. Per applicazioni relativamente semplici, come in questo caso, esistono relazioni ricavate sperimentalmente. Ad esempio, per il nostro

caso con $Re < 10^4$ e $Pr > 0.5$, sperimentalmente ([6]) si è ottenuto la seguente relazione:

$$\overline{N_u} = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(0.4/Pr\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \quad (3.4)$$

Per il calcolo del numero di Nusselt dalle simulazioni si rimanda al capitolo successivo.

3.1.2 Griglia di calcolo

In questo fenomeno, essendo il cilindro un corpo tozzo, si viene a creare una scia assai sviluppata a valle di questo. Per questo motivo, si è costruita una griglia più sviluppata a valle del cilindro. Inoltre, la risoluzione della griglia è maggiore nelle vicinanze della superficie del cilindro, in modo da catturare al meglio i fenomeni a parete, come la creazione della scia.

Gambit

Con Gambit è stata costruita la griglia di calcolo per Fluent (vedi figura 1). È una griglia monoblocco strutturata. Per visualizzare al meglio i fenomeni a parete, la griglia presenta maggiore risoluzione delle celle nelle zone in cui ci si aspetta lo sviluppo dei fenomeni, e quindi nelle immediate vicinanze della parete del cilindro e a valle del cilindro per lo sviluppo della scia.

La griglia di calcolo ha dimensioni 50x20 m, con il cilindro posizionato a 10 m dall'inlet avente diametro 2 m.

In aggiunta, sono state definite anche le *boundary conditions*. A sinistra del cilindro è stata definita la velocity inlet, dalla quale il flusso entra con una certa velocità e temperatura; d'altra parte, a destra, è stata imposta la pressure outlet in cui il flusso fuoriesce.

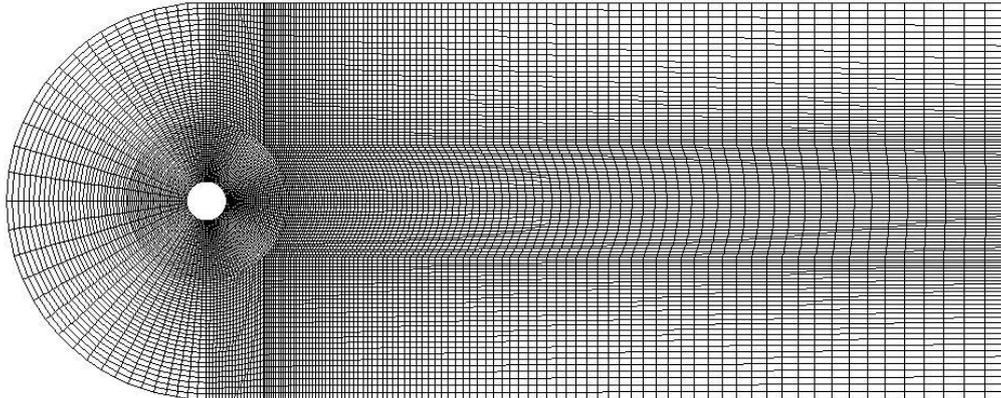


Figura 3. 1: Griglia di calcolo utilizzata in Fluent

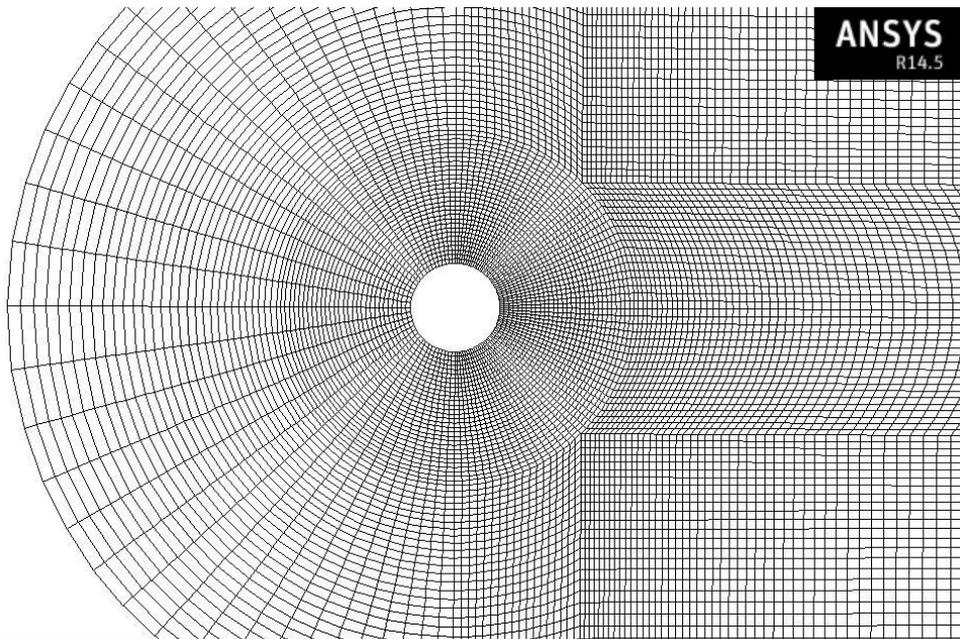


Figura 3. 2: Dettaglio della griglia di calcolo utilizzata in Fluent

<i>Numero di nodi</i>	14268
<i>Numero di celle</i>	14040
<i>Numero di facce</i>	28308

Tabella 3. 3: Risoluzione della griglia di calcolo utilizzata in Fluent

blockMesh

Per la costruzione della griglia di calcolo in OpenFOAM si è utilizzata l'utility `blockMesh` già presente in OpenFOAM. Con l'utility `blockMesh`, la griglia di calcolo è generata da un file appositamente compilato chiamato *blockMeshdict*; in quest'ultimo file vengono definite tutte le dimensioni della mesh, il grading, la forma delle celle, ecc. Quindi, l'utility `BlockMesh` legge questo file e genera la mesh, compilando i dati della griglia come il numero di facce e delle celle, i punti della mesh, ecc.. `BlockMesh` è un utility che crea griglie in tre dimensioni; per studi bidimensionali è necessario avere una singola cella lungo la terza direzione. In questo caso è stata definita una mesh strutturata di dimensioni 50x20 m con il cilindro posizionato a 10 m dall'inlet avente diametro 2 m. In aggiunta sono state definite le condizioni al contorno per la simulazione, definite come nel caso di Fluent.

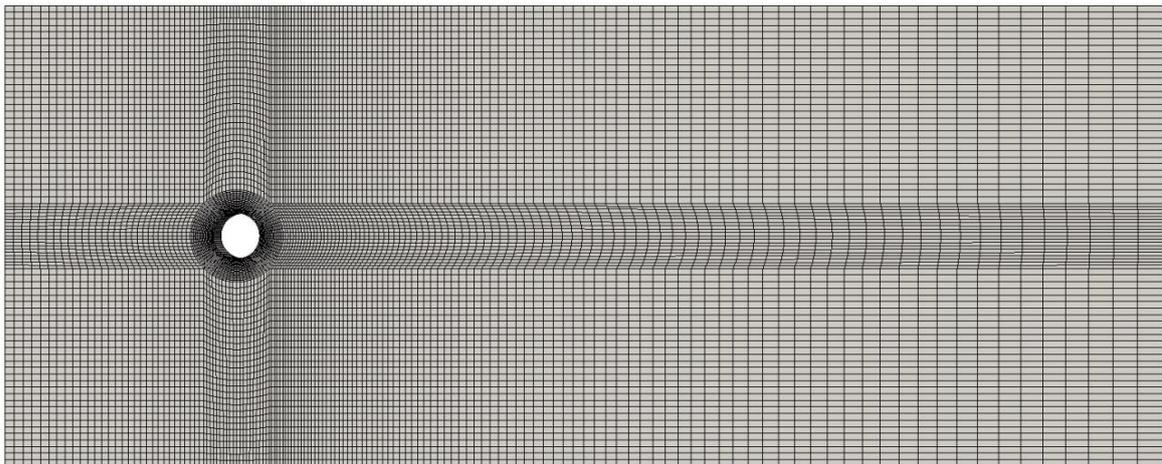
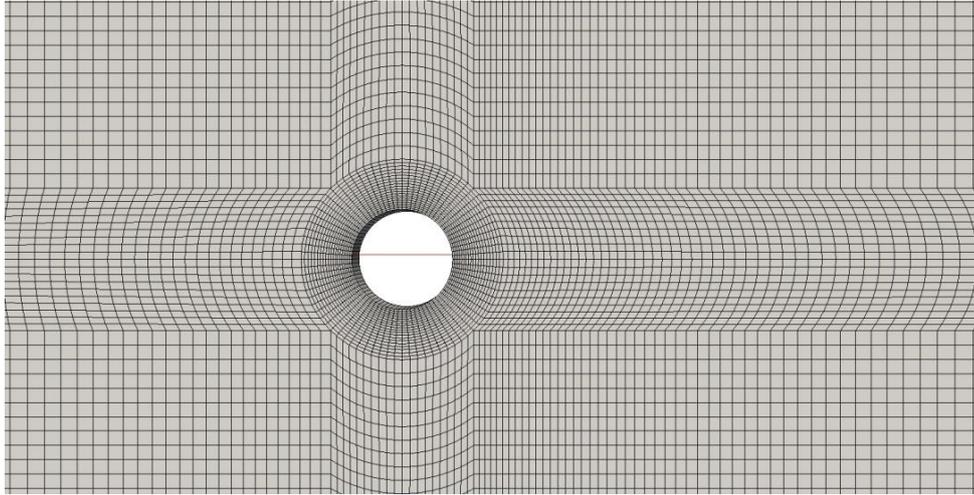


Figura 3. 3: **Griglia di calcolo utilizzata in OpenFOAM**

Figura 3. 4: **Dettaglio griglia di calcolo utilizzata in OpenFOAM**

<i>Numero di face</i>	49860
<i>Numero di facce interne</i>	24540
<i>Numero di celle</i>	12400

Tabella 3. 4: **Risoluzione della griglia di calcolo utilizzata in OpenFOAM**

3.1.3 Setup della simulazione

Fluent

Studiato il caso, si è proceduto ad un'opportuna introduzione dei dati per la simulazione in Fluent. Sono state così definite le condizioni al contorno, come velocità e temperatura, secondo i valori visibili in tabella 3.5; sono stati inoltre definiti i diversi fluidi associati ai diversi valori del numero di Prandtl (vedi tabella 3.1).

	<i>Boundary condition</i>	u_x [m/s]	T [K]
<i>Inlet</i>	Velocity inlet	$3.964 \cdot 10^{-3}$	300
<i>Outlet</i>	Pressure outlet	/	/
<i>Cylinder</i>	wall	No-slip condition	400

Tabella 3. 5: **condizioni al contorno**

Per quanto riguarda gli schemi numerici utilizzati, questi sono riassunti nella tabella 3.6. Come anticipato, per valutare la sensibilità degli schemi, sono state svolte simulazioni con schemi numerici del primo e secondo ordine upwind.

	<i>First order upwind simulations</i>	<i>First order upwind simulations</i>
<i>p – u coupling</i>	PISO	PISO
<i>Pressure</i>	standard	Second order
<i>Momentum</i>	first order upwind	Second order upwind
<i>Energy</i>	first order upwind	Second order upwind

Tabella 3. 6: **schemi risolutivi Fluent**

OpenFOAM

Analogamente a quanto fatto in Fluent, anche in OpenFOAM sono state impostate velocità e temperatura del flusso e della superficie del cilindro (vedi tabella 3.5).

Per le simulazioni svolte con OpenFOAM il solutore che più si adatta al caso preso in esame è icoFoam; questo è un solutore per flussi incomprimibili laminari di fluidi newtoniani. Non avendo inclusa l'equazione dell'energia per i fenomeni termodinamici, icoFoam è stato opportunamente implementato con quest'ultima modificando i codici già esistenti, creando così un nuovo solutore, nominato my_icoFoam, adatto per flussi incomprimibili laminari con fenomeni termici.

Gli schemi numerici adottati in OpenFOAM sono riassunti nella tabella 3.7.

	<i>First order upwind simulations</i>	<i>Second order upwind simulations</i>
<i>p – u coupling</i>	PISO	PISO
<i>divSchemes</i>	Gauss upwind	Gauss linearUpwind
<i>laplacianSchemes</i>	Gauss linear corrected	Gauss linear corrected
<i>Derivata temporale</i>	Euler	Euler

Tabella 3. 7: **schemi risolutivi OpenFOAM**

3.2 Flusso turbolento completamente sviluppato tra due lamine piane

L'analisi di un flusso turbolento completamente sviluppato tra due lamine piane ha lo scopo di introdurre l'uso delle *wall functions*, già descritte nel capitolo precedente, e l'introduzione della simulazione della turbolenza. Il flusso ha gradiente di pressione

costante lungo il canale ed è caratterizzato dal numero di Reynolds viscoso $Re_\tau = 590$.

Le simulazioni vengono eseguite utilizzando il modello di turbolenza standard k- ϵ , mentre la validazione dei risultati numerici è ottenuta mediante comparazione dei profili della velocità media, dell'energia cinetica turbolenta e degli sforzi di Reynolds con i dati ottenuti da simulazioni DNS [7].

Con entrambi i software sono state svolte due simulazioni: una prima simulazione che prevede l'uso delle *wall functions* e una seconda simulazione senza l'uso delle *wall functions* (*enhanced wall treatment*) (in futuro chiameremo rispettivamente primo e secondo caso). Sono state perciò utilizzate due griglie di calcolo con valori differenti di Y^+ a parete.

3.2.1 Analisi

Wall functions

Per la CFD sono stati sviluppati diversi modelli di *wall functions* e la scelta del corretto modello dipende dal fenomeno in studio.

In Fluent è stato scelto di implementare il modello di turbolenza k- ϵ con l'uso delle standard *wall functions*; questo modello si adatta bene per un ampio range di flussi a parete. Tuttavia tende ad essere meno affidabile quando è applicato a fenomeni con flussi a parete soggetti a gradiente di pressione elevato. Per il secondo caso è stato impostato l'uso del *enhanced wall treatment*. Quest'ultimo è un modello che viene utilizzato quando si hanno valori di Y^+ che si aggirano nella regione del substrato viscoso ($Y^+ \approx 1$).

Anche in OpenFOAM sono disponibili diversi modelli di *wall functions*. In OpenFOAM, le *wall functions* vengono inserite nei parametri della simulazione impostandole adeguatamente nelle condizioni al contorno della parete, come ad esempio in questo caso l'energia cinetica turbolenta k , la dissipazione ϵ e la viscosità dinamica turbolenta μ_t sulle pareti del canale. Nel caso con le *wall functions*, la simulazione era già impostata in OpenFOAM con le seguenti *wall functions*

	<i>wall functions</i>
k	kqRWallFunction
ϵ	epsilonWallFunction
μ_t	nutkWallFunction

Tabella 3. 8: **Wall functions OpenFOAM**

Mentre per la simulazione in OpenFOAM che non prevedeva l'uso delle *wall functions*, sono stati impostati i vari valori delle variabili senza richiamare le *wall functions*.

Gradiente di pressione

Il gradiente di pressione, costante lungo il canale, è il parametro che guida il flusso lungo il canale; è quindi il parametro da introdurre in Fluent per rispettare le caratteristiche della prova. Si aveva a disposizione il valore del numero di Reynolds viscoso, definito come (3.5)

$$R_{e\tau} = \frac{u_\tau h}{\nu}$$

Quindi, avendo già impostati i valori della densità e della viscosità dinamica (vedi tabella 3.9), ed essendo h noto, dalla relazione (3.5) si è ricavato il valore della *friction velocity* u_τ per il caso preso in esame; dopodiché, con la relazione (2.11), la quale lega la u_τ con la τ_w , è stato ricavato il valore dello sforzo a parete τ_w . Infine, da quest'ultimo è stato ricavato il valore del gradiente di pressione lungo il canale, secondo la relazione: (3.6)

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{2\tau_w}{h}$$

ρ [kg/m ³]	1
μ [kg/m · s]	0.0017

Tabella 3. 9: **Proprietà fluido**

Per la simulazione svolta con OpenFOAM, è stato usato il solutore boundaryFoam, già presente tra le librerie di OpenFOAM. BoundaryFoam è un solutore per flussi stazionari incomprimibili; come nel nostro caso, questo solutore è utilizzato quando si devono studiare i fenomeni a parete per flussi che si sviluppano in una sola direzione, in questo caso lungo l'asse y . A differenza del software Fluent, boundaryFoam non riceve come parametro d'ingresso il gradiente di pressione lungo il canale, ma il valore medio del profilo parabolico di velocità (u_{bar}) lungo l'asse di sviluppo del fenomeno (vedi figura 3.5). Quindi si è ricavato il valore della u_{bar} , corrispondente al caso studiato, da Fluent, svolgendo un integrale di superficie lungo

la direzione tra le due lamine della velocità all'interno del canale. Questo valore, diviso per la superficie d'integrazione, ha restituito la u_{bar} corrispondente al caso preso in esame ($u_{bar} = 19.07 \text{ m/s}$). Quindi si è proceduto a definire il valore della u_{bar} nel file *transportProperties*.

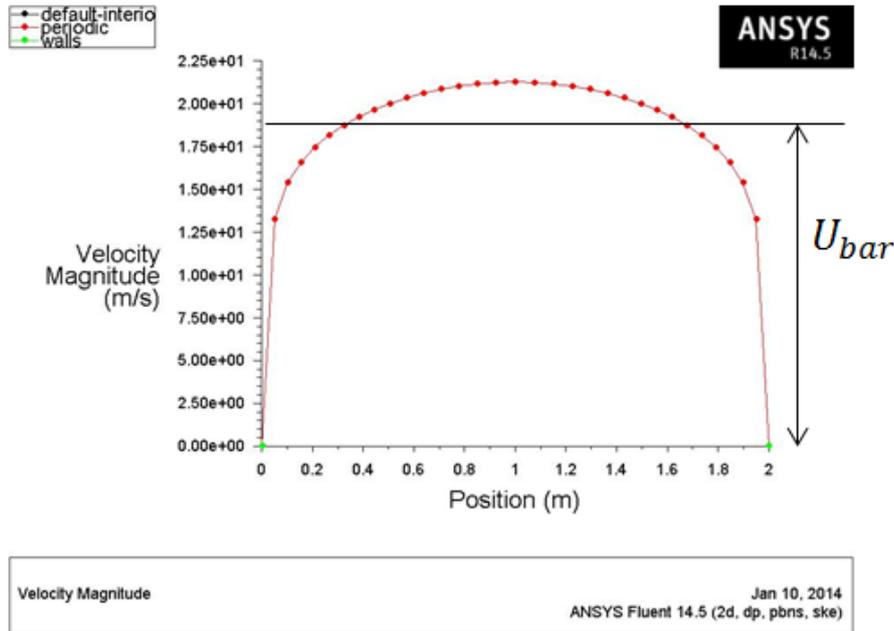


Figura 3. 5: definizione grafica U_{bar}

3.2.2 Griglia di calcolo

Le griglie da utilizzare per questi casi sono di facile costruzione. Il flusso si sviluppa solo lungo la direzione y , quindi entrambe hanno la distanza tra le lamine piane di 2 m. La lunghezza del canale risulta pari a 0.1 m per la mesh di OpenFOAM e 1 m per le mesh utilizzate in Fluent. Le griglie di calcolo prevedono un rettangolo nel quale i lati superiore ed inferiore costituiscono le lamine piane, mentre a sinistra è presente l'inlet e a destra l'outlet. Per lo studio di questo caso sono state utilizzate griglie di calcolo costruite in precedenza.

Fluent

In Fluent è stata utilizzata una griglia di calcolo composta da 32 celle sviluppate nella direzione tra le due lamine per la mesh che prevede l'uso delle *wall functions*, mentre una griglia di calcolo composta da 96 celle sviluppate nella direzione tra le due lamine è stata utilizzata per la simulazione che non prevede l'uso delle *wall functions*. Per queste è stato già svolto lo studio della Y^+ in precedenza, ricavando quindi il valore ottimale per questo caso. È stata perciò utilizzata una griglia nella quale il centroide della prima cella misura $Y^+ = 50$ da parete, per la simulazione del

primo caso. D'altra parte, è stata utilizzata una griglia di calcolo nella quale il centroide della prima cella è a $Y^+ = 0.1$ da parete. Si noti che nel primo caso, siamo ad un valore della Y^+ in cui la turbolenza è già sviluppata, mentre nel secondo caso, essendo nella zona del substrato viscoso, la turbolenza si deve ancora sviluppare.

OpenFOAM

Come in Fluent, anche in OpenFOAM sono state utilizzate griglie di calcolo già costruite in precedenza; infatti, fra i tutorial presenti nelle librerie è presente anche questo caso. Per la simulazione con l'uso delle *wall functions* è stata utilizzata una mesh composta da 32 celle sviluppate nella direzione fra le due lamine, avente $Y^+ = 18$. Nel secondo caso, è stata utilizzata una griglia di calcolo composta da 80 celle, avente $Y^+ = 5$. Si noti i valori diversi della Y^+ nei casi di Fluent e OpenFOAM: essendo un caso a puro scopo didattico con in gioco forze di valori non eccessivi, non ci sono variazioni tra le stesse simulazioni con valori di Y^+ differenti, risultato che verrà poi analizzato nel capitolo successivo.

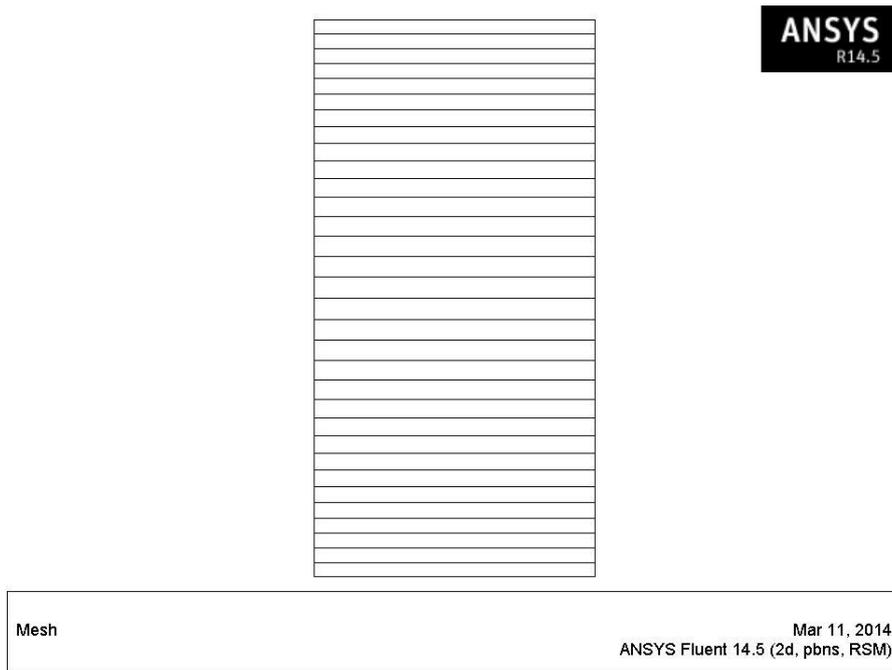


Figura 3. 6: Griglia di calcolo con wall functions utilizzata in Fluent



Figura 3. 7: Dettaglio griglia di calcolo con wall functions utilizzata in Fluent

<i>Numero di nodi</i>	66
<i>Numero di celle</i>	32
<i>Numero di face</i>	65
Y^+	50

Tabella 3. 10: Risoluzione griglia di calcolo con wall functions utilizzata in Fluent

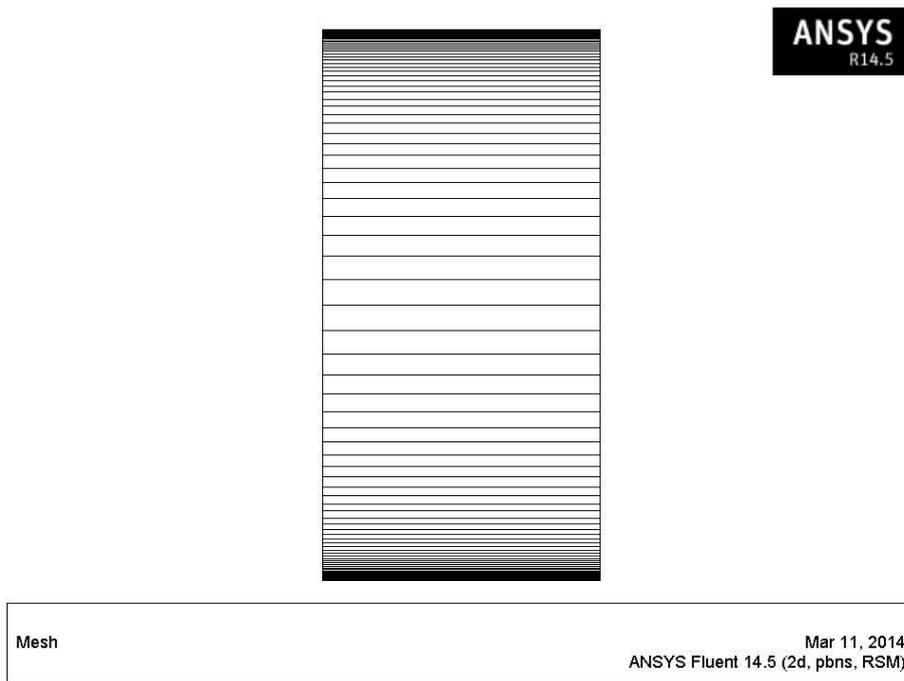


Figura 3. 8: **Griglia di calcolo senza wall functions utilizzata in Fluent**

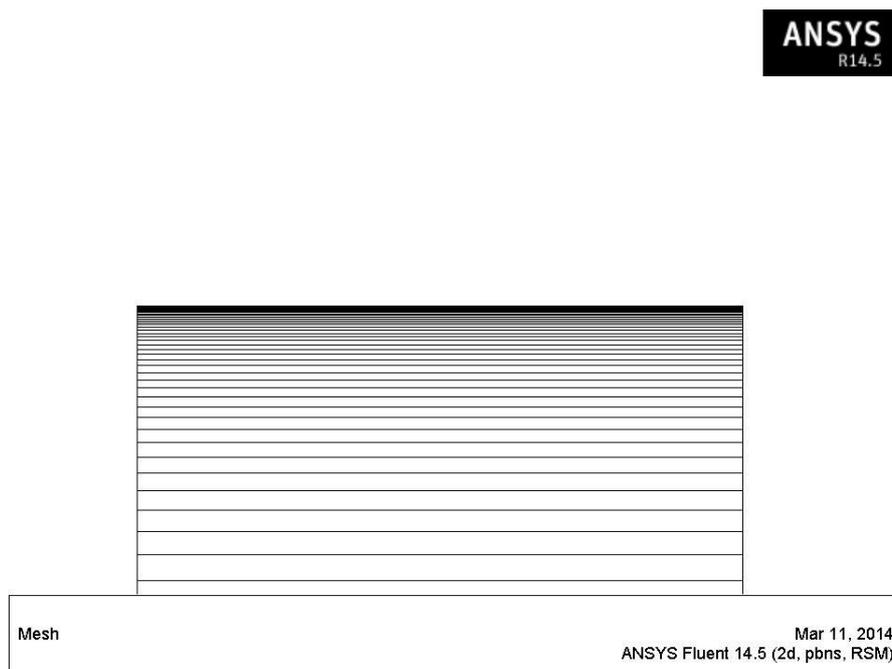


Figura 3. 9: **Dettaglio griglia di calcolo senza wall functions utilizzata in Fluent**

<i>Numero di nodi</i>	194
<i>Numero di celle</i>	96
<i>Numero di face</i>	193
Y^+	0.1

Tabella 3. 11: **risoluzione griglia di calcolo senza wall functions utilizzata in Fluent**



Figura 3. 10: Griglia di calcolo con wall functions utilizzata in OpenFOAM

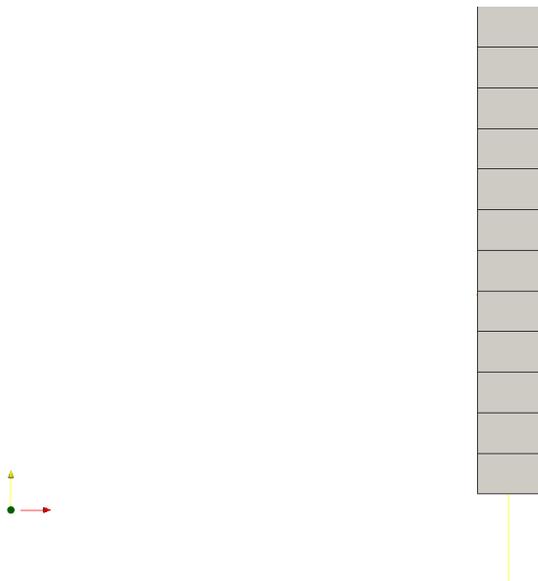


Figura 3. 11: Dettaglio griglia di calcolo con wall functions utilizzata in OpenFOAM

<i>Numero di face</i>	161
<i>Numero di facce interne</i>	31
<i>Numero di celle</i>	32
Y^+	18

Tabella 3. 12: Risoluzione griglia di calcolo con wall functions utilizzata in OpenFOAM

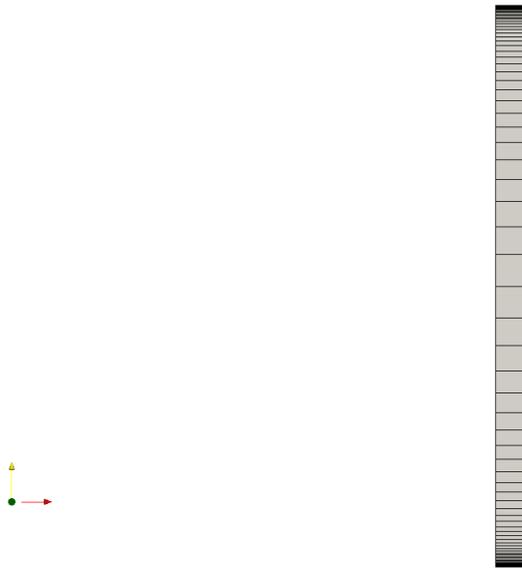


Figura 3. 12: **Griglia di calcolo senza wall functions utilizzata in OpenFOAM**

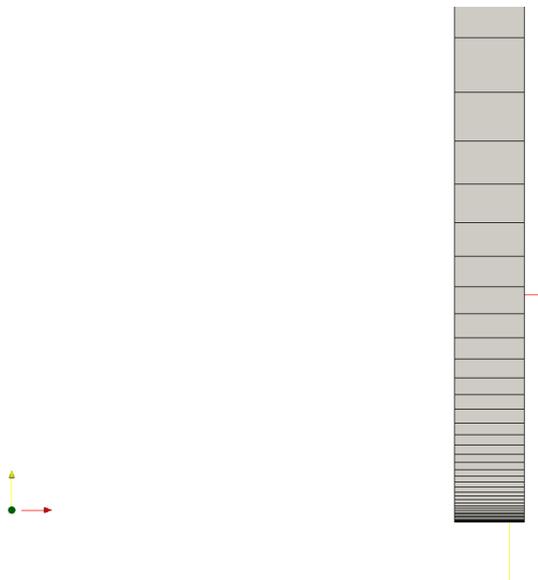


Figura 3. 13: **Dettaglio griglia di calcolo senza wall functions utilizzata in OpenFOAM**

<i>Numero di facce</i>	401
<i>Numero di facce interne</i>	79
<i>Numero di celle</i>	80
Y^+	5

Tabella 3. 13: **Risoluzione griglia di calcolo senza wall functions utilizzata in OpenFOAM**

3.2.3 Setup della simulazione

Fluent

In Fluent sono stati introdotti i valori della densità e della viscosità dinamica per poter rispettare il valore di Re_{τ} . A differenza di OpenFOAM, in questo caso si è

introdotto il valore del gradiente di pressione lungo il canale nelle condizioni periodiche della simulazione. Le condizioni al contorno inserite per queste simulazioni riguarda la pareti, e quindi la *no-slip condition*, e la periodicità all'interno del canale.

La scelta del modello di turbolenza per questo studio è ricaduta sul modello standard k- ϵ , in quanto è un modello che si adatta bene al caso in esame in quanto il gradiente di pressione è nullo.

Gli schemi risolutivi adottati in Fluent sono:

<i>p – u coupling</i>	PISO
<i>Pressure</i>	second order
<i>Momentum</i>	second order upwind
<i>Turbulent kinetic energy</i>	second order upwind
<i>Turbulent dissipations rate</i>	second order upwind
<i>Reynolds stresses</i>	second order upwind

Tabella 3. 14: **Schemi risolutivi Fluent**

OpenFOAM

Per rispettare il valore di $R_{\epsilon\tau}$, avendo h già fissato, si è agito sui parametri del fluido come densità e viscosità dinamica (visibili nella tabella 3.9), introducendo il valore opportuno della viscosità cinematica.

Inoltre, si è introdotto anche il valore della u_{bar} precedentemente calcolato.

Anche in OpenFOAM è stato utilizzato il modello k- ϵ per lo studio della turbolenza implementato dalle *wall functions*.

Per quanto riguarda gli schemi risolutivi, le impostazioni sono riassunte nella tabella 3.15.

<i>p – u coupling</i>	PISO
<i>divSchemes</i>	Gauss linear
<i>laplacianSchemes</i>	Gauss linear corrected
<i>Derivata temporale</i>	SteadyState

Tabella 3. 15: **Schemi risolutivi OpenFOAM**

Capitolo quarto

Risultati delle simulazioni numeriche

In questo capitolo vengono esposti i risultati ottenuti dalle simulazioni. In particolare, di ogni simulazione saranno esposti i criteri di convergenza e i risultati ottenuti per la validazione delle prove.

Nel caso, sono state svolte 4 simulazioni a differenti valori del numero di Prandtl, quali 0.5, 1, 2.5 e 5; inoltre le simulazioni sono state svolte con gli schemi numerici upwind sia del primo, sia del secondo ordine. Quindi, in questo caso saranno esposti i risultati delle prove per tutte le simulazioni ai vari numeri di Prandtl e schemi numerici differenti.

Le simulazioni del Flusso turbolento all'interno del canale sono state svolte con e senza l'uso delle *wall functions*, quindi saranno esposti i risultati di entrambe le tipologie di simulazioni. Inoltre saranno analizzati i risultati ottenuti in Fluent per le simulazioni svolte con il modello *RSM*.

4.1 Scambio termico in regime laminare attorno ad un cilindro bidimensionale

4.1.1 Convergenza

Come criterio di convergenza per le simulazioni in Fluent, si assume che i residui a ogni iterazione di risoluzione delle equazioni siano minori di un valore prefissato. In questo caso, la soglia di convergenza dei residui è stata impostata a 10^{-6} tranne che per l'equazione di continuità della quale la soglia dei residui è stata impostata a 10^{-4} . Si può notare da figura 4.1 che le simulazioni hanno raggiunto convergenza dopo circa 620 iterazioni.

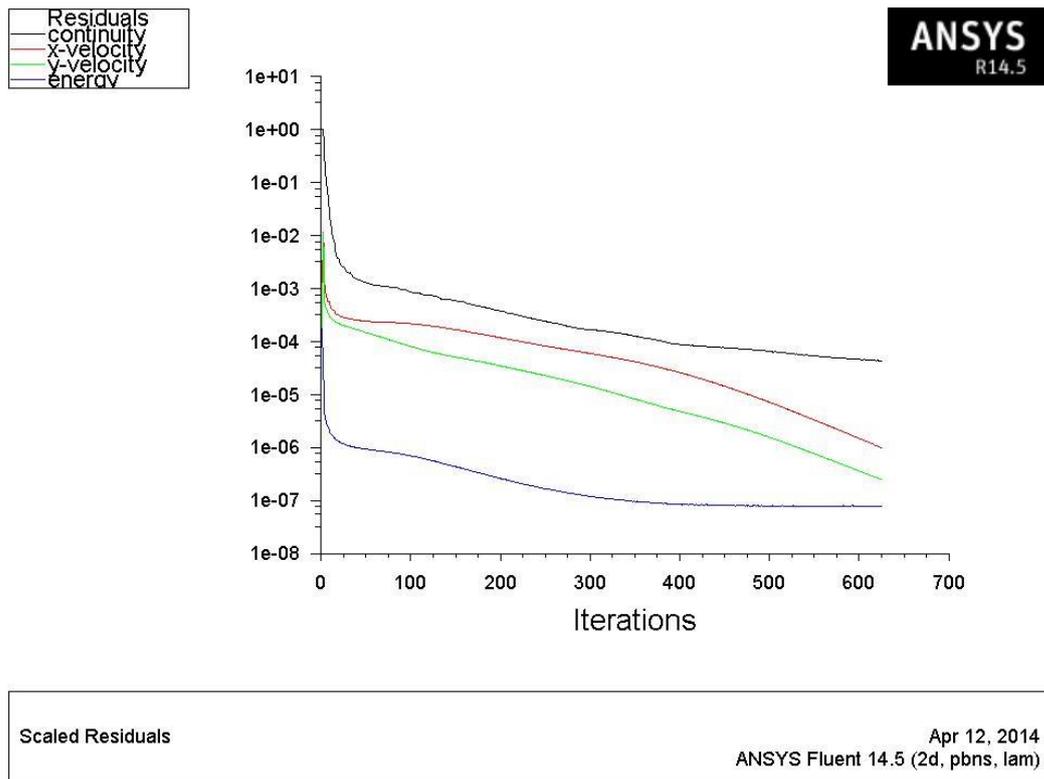


Figura 4. 1 - Convergenza delle simulazioni in Fluent

In OpenFOAM è stato utilizzato il solver *my_icoFoam*, già descritto nel capitolo precedente. Questo solver, a differenza di Fluent, come criterio di convergenza non ha una soglia minima per i residui; infatti le simulazioni si arrestano dopo un opportuno valore di iterazioni impostato in precedenza nel file *controlDict*. Anche in questo caso si può visualizzare l'andamento dei residui, mostrato in figura 4.2.

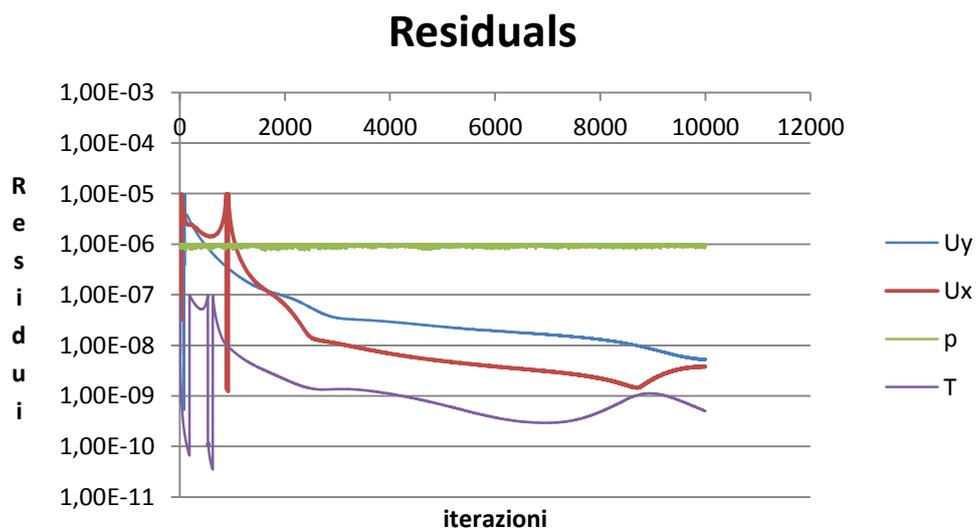


Figura 4. 2- Convergenza delle simulazioni in OpenFOAM

Si noti come la simulazione si stabilizzi ad un valore dei residui pari a 10^{-6} a partire dall'iterazione 2000 in avanti.

4.1.2 Risultati

Nel fenomeno preso in esame, a valle del cilindro bidimensionale, si sviluppa una scia. Dalle figure 4.3a-b e 4.4a-b si nota che con numero di Prandtl pari a 5 si ha una diffusione della temperatura minore rispetto a simulazioni con numero di Prandtl minore, come ci si aspetta dalla teoria.

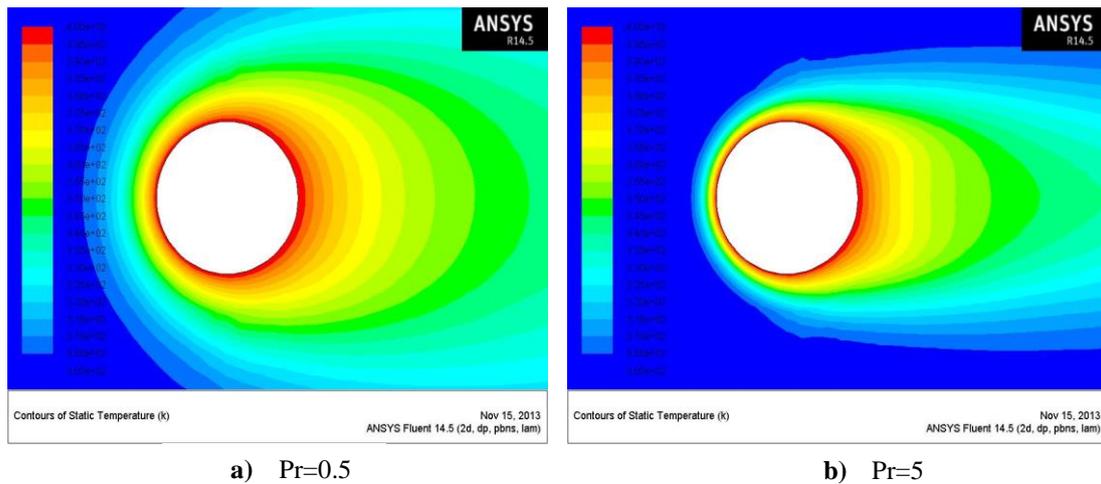


Figura 4.3 – Scambio termico attorno al cilindro (Fluent)

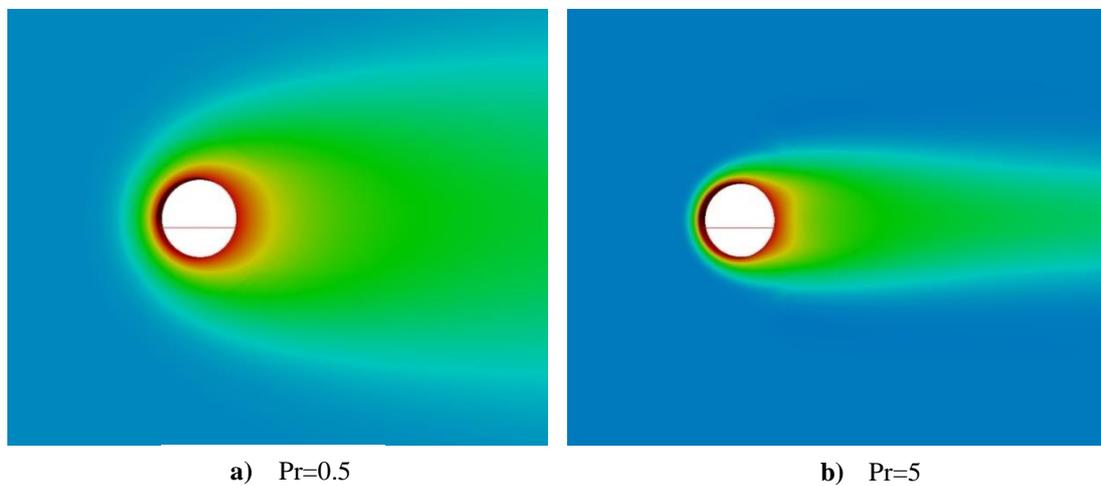


Figura 4.4 – Scambio termico attorno al cilindro (OpenFOAM)

Per verificare l'esatta riproduzione delle simulazioni in OpenFOAM, è stato anche ricavato il coefficiente di resistenza del cilindro per le simulazioni in OpenFOAM e in Fluent. I rispettivi coefficienti sono mostrati in tabella 4.1.

	Fluent	OpenFOAM	Letteratura
$C_d (R_e = 20)$	2.35	2.42	~ 2

Tabella 4. 1 - Coefficiente di resistenza

Un'ulteriore verifica della riproduzione delle simulazioni in OpenFOAM è stata svolta confrontando i profili di velocità a valle del cilindro con i dati ricavati dalle simulazioni effettuate con Fluent.

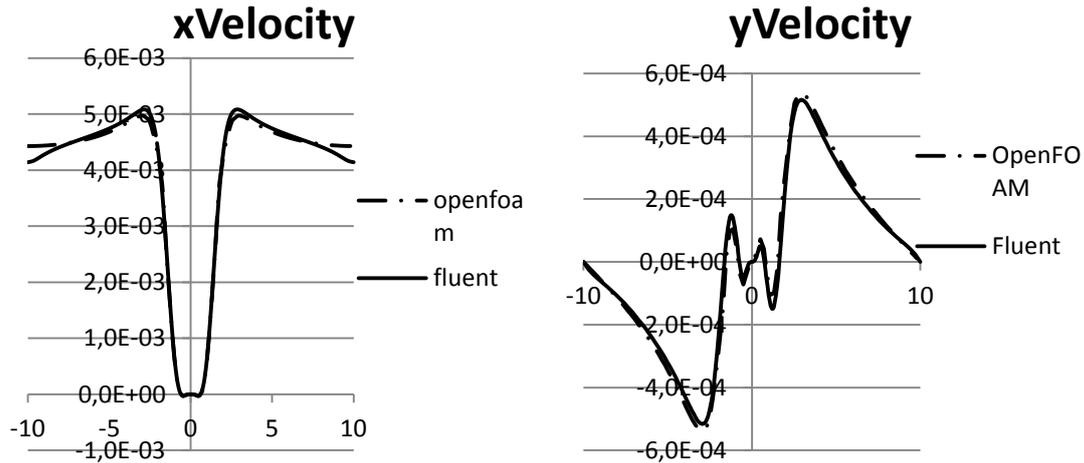


Figura 4.5 – Profili di velocità ad 1 m a valle dal centro del cilindro

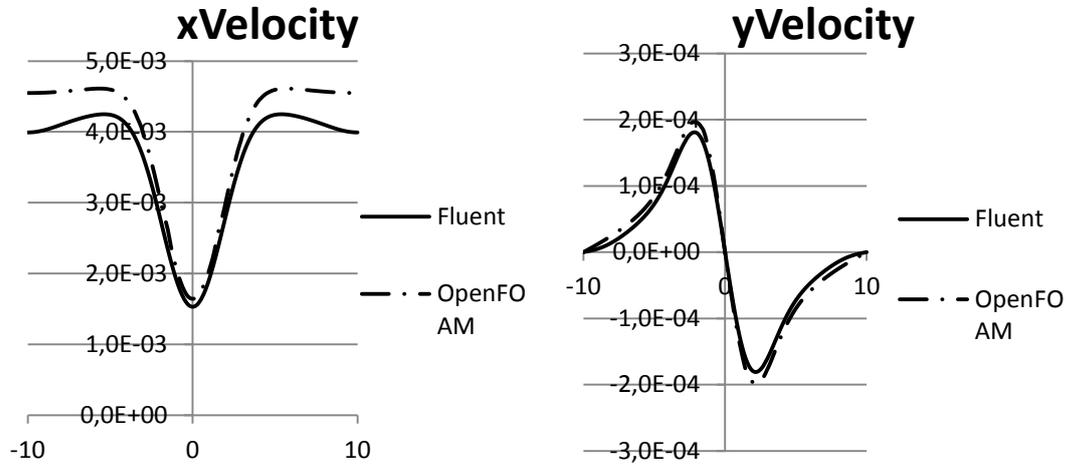


Figura 4.6 – Profili di velocità ad 10 m a valle dal centro del cilindro

Sia nel confronto dei coefficienti di resistenza, sia nei profili di velocità, si può constatare che c'è convergenza tra le simulazioni svolte con OpenFOAM e Fluent. Si noti una piccola differenza tra i risultati ottenuti nelle simulazioni svolte con i due software; questo piccolo errore è dovuto ai non proprio identici schemi numerici utilizzati e alla griglia di calcolo non esattamente identica nei due casi. Nel complessivo, ci si può comunque ritenere soddisfatti dei risultati ottenuti finora.

4.1.3 Validazione delle simulazioni numeriche

Il software Fluent presenta al suo interno applicazioni utili per lo studio dei fenomeni in fase di post-processing, come applicazioni utili per lo studio dei flussi, quali la portata e lo scambio di calore, per lo studio delle forze presenti, e così via. Per il calcolo del numero di Nusselt in Fluent sono state sfruttate queste applicazioni, in particolare l'applicazione che permette di calcolare il flusso di calore scambiato. Quindi, come primo passo, da Fluent è stato ricavato lo scambio termico q della superficie del cilindro.

	$P_r = 0.5$	$P_r = 1$	$P_r = 2.5$	$P_r = 5$
q [W] first order upwind	13.83	17.63	24.32	31.14
q [W] second order upwind	13.55	17.02	22.93	28.74

Tabella 4. 2 - **Scambio termico ricavato da Fluent**

Come secondo passo, dalla legge di Fourier per la conduzione termica, è stato calcolato il coefficiente di convezione, definito dalla relazione:

$$h = \frac{q}{S * \Delta T} \quad (4.1)$$

dove S è la superficie di scambio, in questo caso il diametro del cilindro, e ΔT è la differenza di temperatura tra la superficie del cilindro e il flusso che lo investe., Quindi, avendo questi due dati e il flusso di calore scambiato si è proceduto a ricavare h , secondo la relazione (4.1).

	$P_r = 0.5$	$P_r = 1$	$P_r = 2.5$	$P_r = 5$
h [W/(m ² K)] first order upwind	0.022	0.028	0.039	0.050
h [W/(m ² K)] second order upwind	0.021	0.027	0.036	0.045

Tabella 4. 3 - Coefficiente di scambio termico simulazioni Fluent

Il numero di Nusselt medio è definito dalla relazione:

$$N_u = \frac{h * L}{k} \quad (4.2)$$

dove L è la lunghezza caratteristica, in questo caso il diametro. Quindi avendo a disposizione tutti i dati, come la conduttività termica k già impostata in precedenza e il coefficiente di scambio termico h , si è proceduto al calcolo del numero di Nusselt ricavato dalle simulazioni.

Per le simulazioni svolte con OpenFOAM si è seguito lo stesso procedimento. A differenza di Fluent, OpenFOAM presenta un numero limitato di applicazioni utili alla fase di post-processing; la peculiarità del software open source è che a partire dalle applicazioni già presenti nel suo pacchetto, mediante una conoscenza più o meno approfondita della programmazione in C++, si possono compilare applicazioni utili per un vasto numero di casi. Infatti, in OpenFOAM è presente l'applicazione *wallHeatFlux* da cui si può ricavare lo scambio termico, ma questa è utilizzabile per i casi comprimibili di scambio termico. Quindi si è adattata l'applicazione appena citata al caso in studio, laminare incomprimibile, per poter così ricavare lo scambio termico q della superficie del cilindro.

	$P_r = 0.5$	$P_r = 1$	$P_r = 2.5$	$P_r = 5$
q [W] first order upwind	13.69	17.27	23.75	30.01
q [W] second order upwind	13.39	16.84	22.71	28.51

Tabella 4. 4 - Scambio termico ricavato da OpenFOAM

Si è poi ricavato il coefficiente di scambio termico h :

	$P_r = 0.5$	$P_r = 1$	$P_r = 2.5$	$P_r = 5$
h [W/(m ² K)] first order upwind	0.022	0.028	0.039	0.050
h [W/(m ² K)] second order upwind	0.021	0.027	0.036	0.045

Tabella 4. 5 - Coefficiente di scambio termico simulazioni di OpenFOAM

Infine, con i dati ottenuti è stato calcolato il numero di Nusselt per le simulazioni in OpenFOAM.

La validazione delle simulazioni è stata affidata alla comparazione del numero di Nusselt ottenuto dalle simulazioni stesse con il numero di Nusselt ricavato da letteratura, secondo la relazione (3.4).

	N_u (Fluent)	N_u (OpenFOAM)	N_u (letteratura)
$P_r = 0.5$	2.357	2.333	2.184
$P_r = 1$	2.999	2.946	2.787
$P_r = 2.5$	4.178	4.05	3.827
$P_r = 5$	5.356	5.12	4.843

Tabella 4. 6 - Numero di Nusselt delle simulazioni del primo ordine

	N_u (Fluent)	N_u (OpenFOAM)	N_u (letteratura)
$P_r = 0.5$	2.311	2.282	2.184
$P_r = 1$	2.902	2.871	2.787
$P_r = 2.5$	3.909	3.867	3.827
$P_r = 5$	4.899	4.863	4.843

Tabella 4. 7 - Numero di nusselt delle simulazioni del secondo ordine

Confrontando i risultati ottenuti si può notare come, a parità del numero di Prandtl, lo schema upwind del secondo ordine offre un miglior risultato rispetto allo schema numerico del primo ordine; ad esempio, nelle simulazioni svolte con Fluent, con la simulazione svolta utilizzando lo schema numerico del primo ordine si ottiene un errore del +10% rispetto al risultato desiderato, mentre con lo schema numerico upwind del secondo ordine questo errore si riduce al +1% rispetto al numero di Nusselt ricavato da letteratura. Si osservi inoltre che, aumentando il numero di Prandtl, aumenta anche l'errore rispetto al numero di Nusselt di riferimento.

4.2 Flusso turbolento completamente sviluppato tra due lamine piane

4.2.1 Convergenza

Come descritto nel paragrafo precedente, in Fluent il criterio di convergenza è il raggiungimento della soglia massima dei residui ad ogni iterazione di calcolo. Per queste simulazioni la soglia massima per i residui è stata impostata ad un valore di 10^{-6} . Mentre nel caso precedentemente studiato non c'era una grossa variazione in termini di durata tra le simulazioni ai vari numeri di Prandtl, in questo caso occorre mostrare i grafici relativi alle simulazioni con e senza *wall functions* in quanto la differenza del numero di iterazioni è assai evidente. Infatti, si può notare dalle figure 4.7 e 4.8 che le simulazioni che prevedono l'uso delle *wall functions* raggiungono il criterio di convergenza ad un numero di iterazioni che è circa un terzo rispetto al numero di iterazioni effettuate nelle simulazioni che non prevedono l'uso delle *wall functions*. In aggiunta, per le simulazioni svolte con il modello *RSM* senza l'uso delle *wall functions* è stata necessaria l'inizializzazione dei calcoli mediante il modello *k-ε*, in quanto facendo partire le simulazioni direttamente con il modello *RSM*, queste non raggiungevano convergenza. Si noti quindi la differenza delle iterazioni dopo le quali

è stata raggiunta la convergenza per le simulazioni senza l'uso delle *wall functions* con entrambi i modelli.

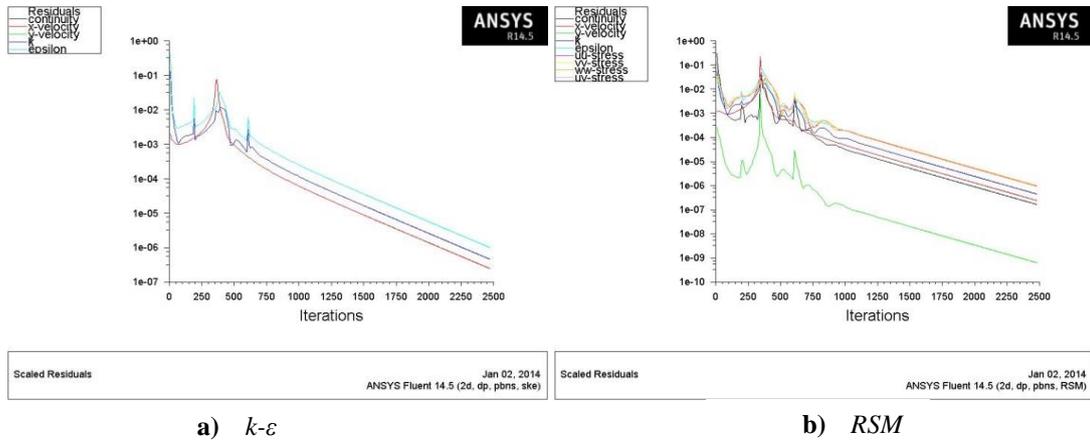


Figura 4.7 – Convergenza delle simulazioni in Fluent con *wall functions*

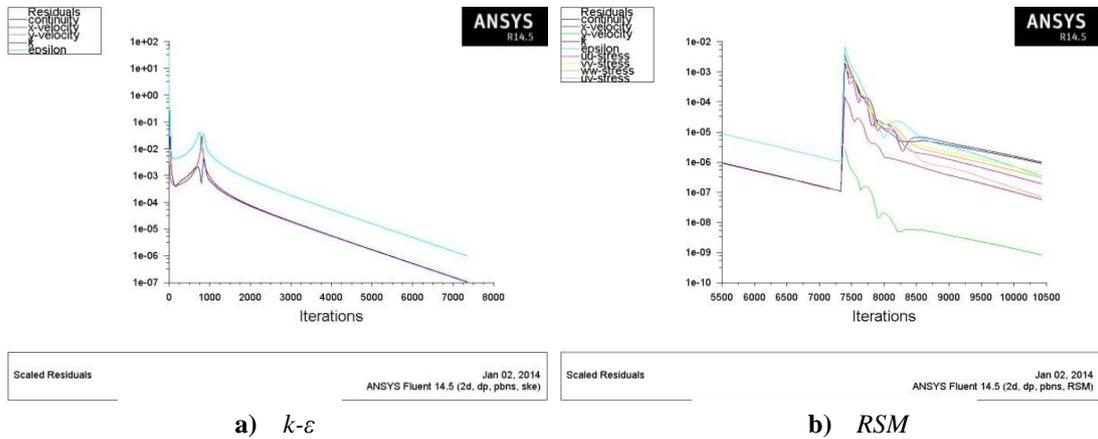


Figura 4.8 – Convergenza delle simulazioni in Fluent senza *wall functions*

In OpenFOAM è stato usato il solver *boundaryFoam*; questo come criterio d'arresto della simulazione prevede l'introduzione di un opportuno valore di iterazioni. Si nota comunque la convergenza della simulazione con i residui che si mantengono abbondantemente sotto la soglia di 1×10^{-5} .

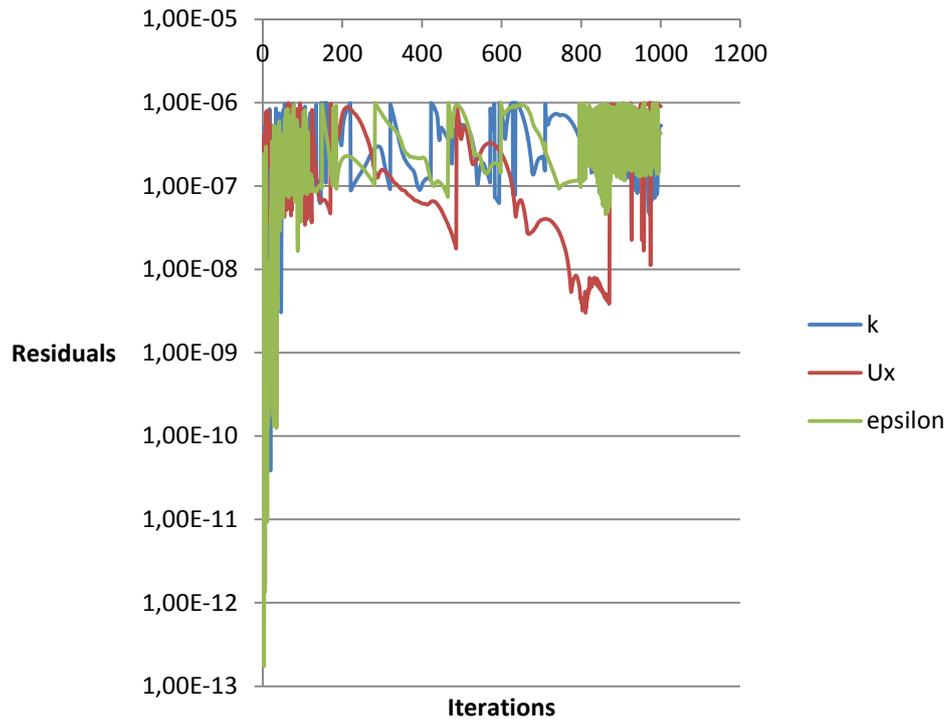


Figura 4.9 – Convergenza della simulazione in OpenFOAM con *wall functions*

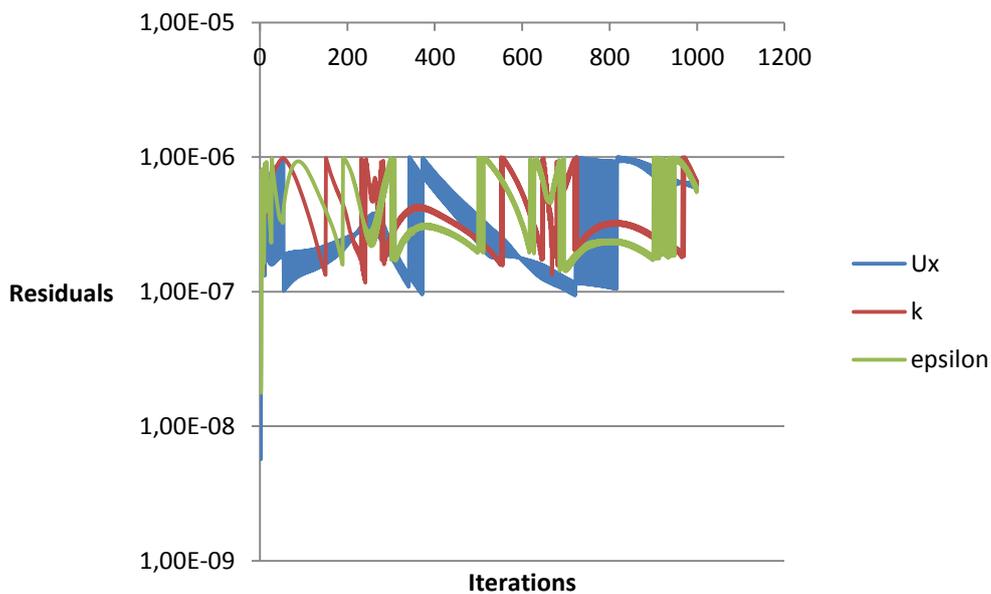


Figura 4.10 – Convergenza della simulazione in OpenFOAM senza *wall functions*

4.2.2 Risultati

Concluse le simulazioni, si è proceduto alla visualizzazione dei risultati ottenuti. Nelle figure 4.11, 4.12 e 4.13 si può notare come, rispettando la no-slip condition impostata in precedenza, la velocità a parete è nulla, per poi aumentare sviluppandosi verso il centro del canale. Altra differenza si può nella zona nella vicinanza della parete; nelle simulazioni implementate con l'uso delle *wall functions*, la griglia non

prevede una fitta presenza di celle nelle vicinanze della parete, quindi si può notare dalle figure come la zona in cui la velocità si sviluppa è più ampia rispetto alle simulazioni che non prevedono l'uso delle *wall functions*; infatti, avendo una griglia con un numero maggiore di celle nelle vicinanze della parete, in quest'ultime simulazioni la zona con velocità diversa dalla velocità del flusso risulta essere molto ridotta.

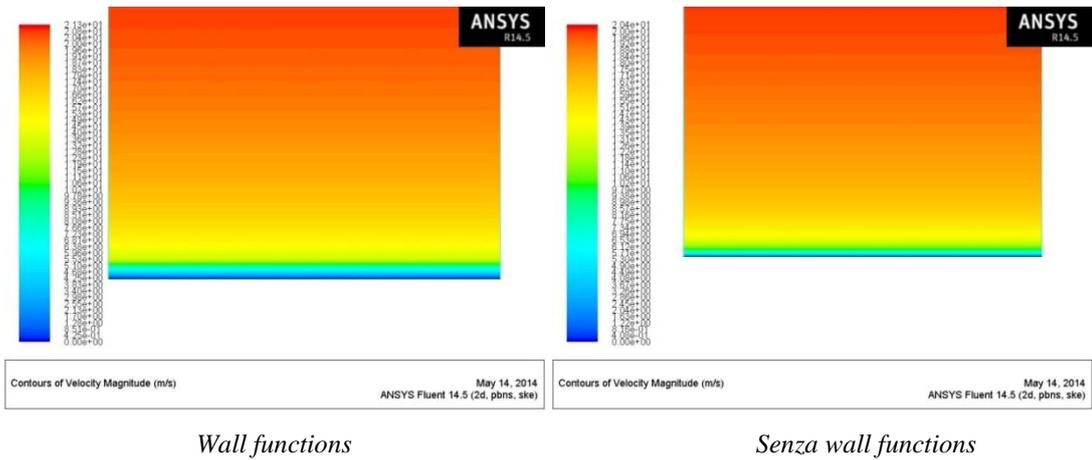


Figura 4.11 – Particolare dello sviluppo della velocità all'interno del canale; Fluent, $k-\epsilon$

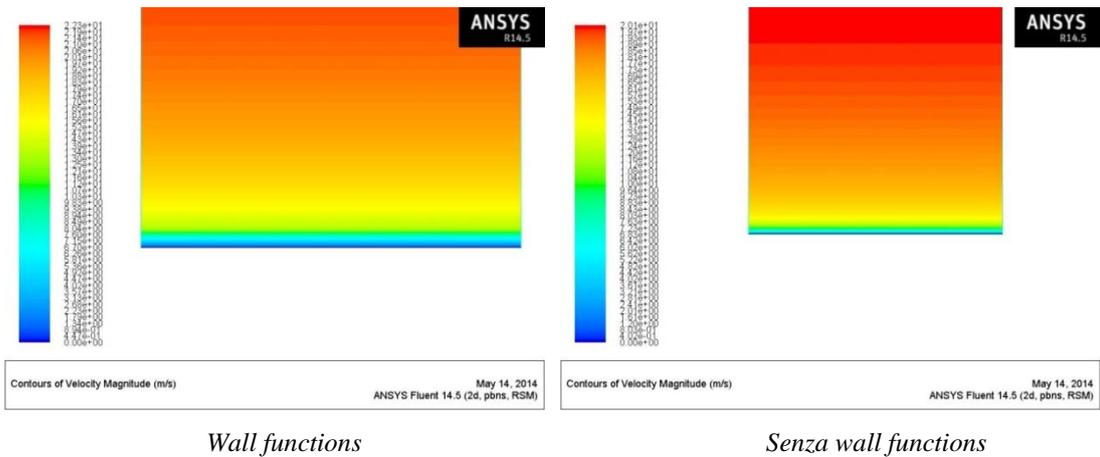


Figura 4.12 – Particolare dello sviluppo della velocità all'interno del canale; Fluent, RSM .

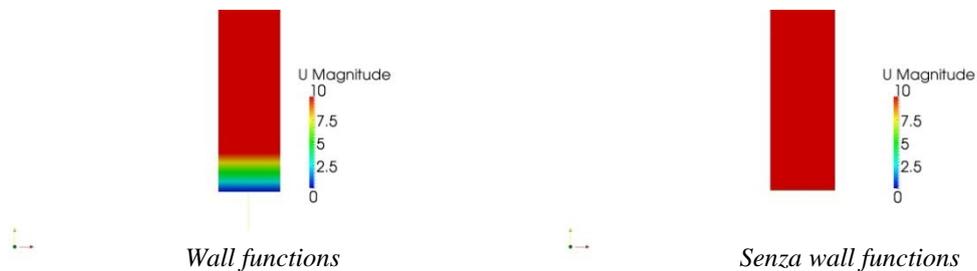


Figura 4.13 – Particolare dello sviluppo della velocità all'interno del canale; OpenFOAM, $k-\epsilon$

4.2.3 Validazione delle simulazioni numeriche

I risultati numerici sono validati confrontando i profili della velocità media, dell'energia cinetica turbolenta e delle tensioni di Reynolds con i profili ottenuti da simulazioni DNS. Come anticipato, saranno tracciati i grafici dei risultati delle simulazioni in Fluent, sia con il modello di turbolenza *standard k-ε* sia con il modello *RSM*, e delle simulazioni in OpenFOAM svolte con il modello *k-ε*.

In Fluent sono state opportunamente definite le variabili normalizzate nell'applicazione *custom Field Functions* secondo le relazioni 4.3a-h, mentre in OpenFOAM il solver *boundaryFoam* ha come output i dati utili a tracciare i grafici in questione.

$$Y_+ = \frac{\rho \times U_\tau \times y}{\mu} \quad (4.3a)$$

$$U_+ = \frac{U}{U_\tau} \quad (4.3b)$$

$$K_+ = \frac{K}{U_\tau^2} \quad (4.3c)$$

$$UU_+ = -\overline{\rho u' u'} = \left[\mu \times \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \quad (4.3d)$$

$$KK_+ = -\overline{\rho v' v'} = \left[\mu \times \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \quad (4.3e)$$

$$WW_+ = -\overline{\rho w' w'} = \left[\mu \times \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \quad (4.3f)$$

$$UV_+ = -\overline{\rho u' v'} = \left[\mu \times \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \quad (4.3g)$$

$$\text{Ratio} = \frac{\mu_t}{\mu_l} \quad (4.3h)$$

Quindi i grafici sono stati ricavati per la validazione:

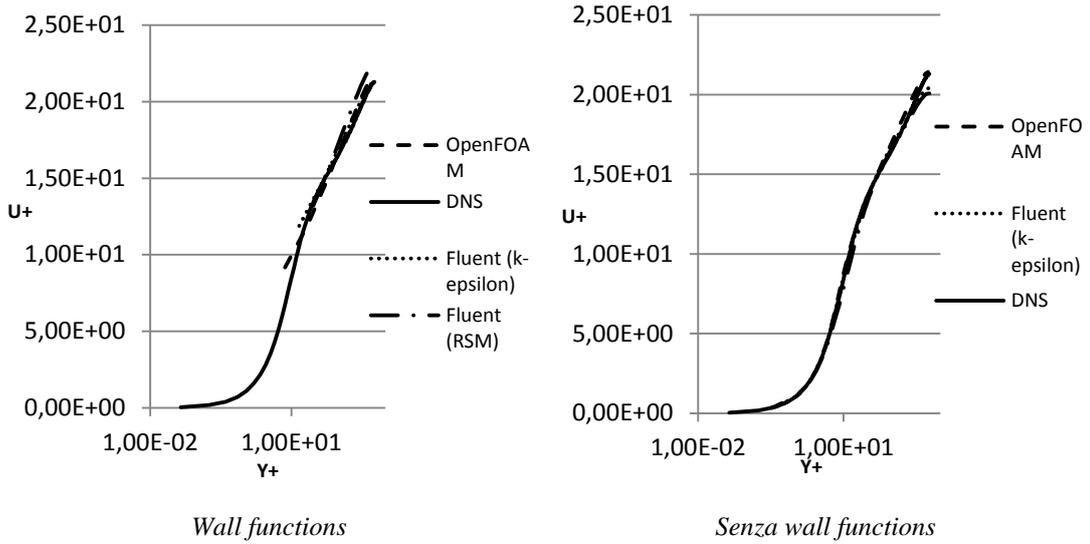


Figura 4.14 – Profili velocità media

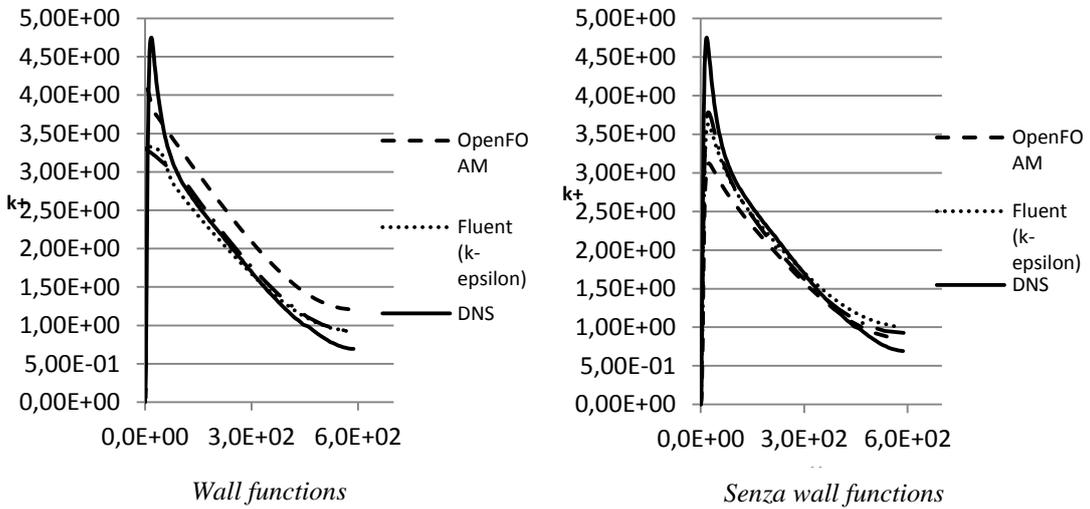


Figura 4.15 – Profili energia cinetica turbolenta

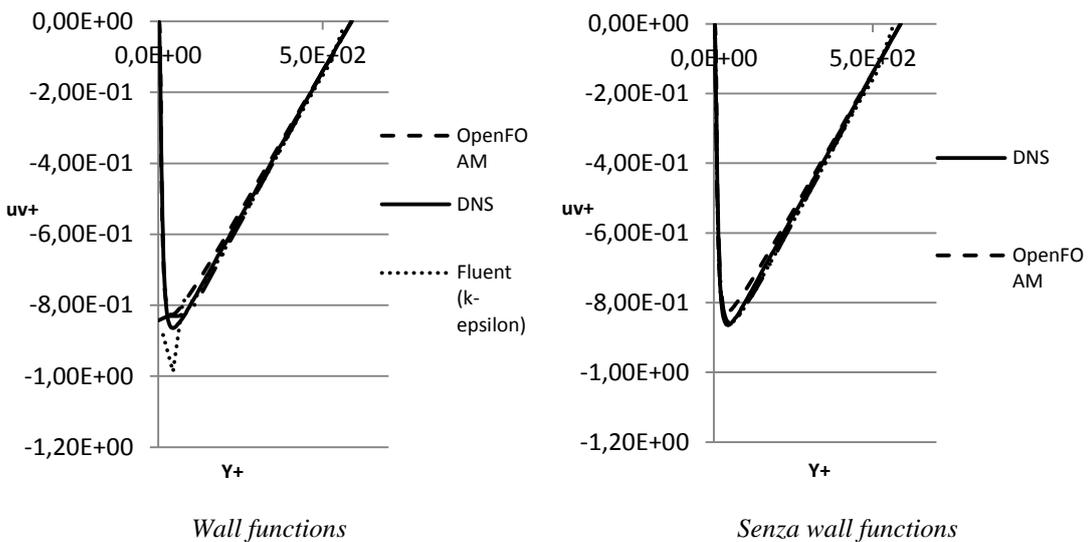
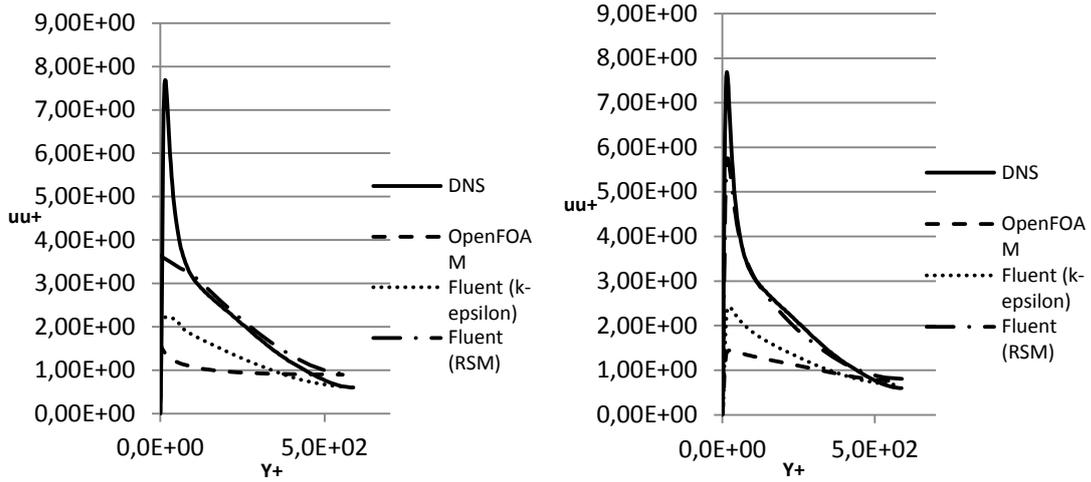


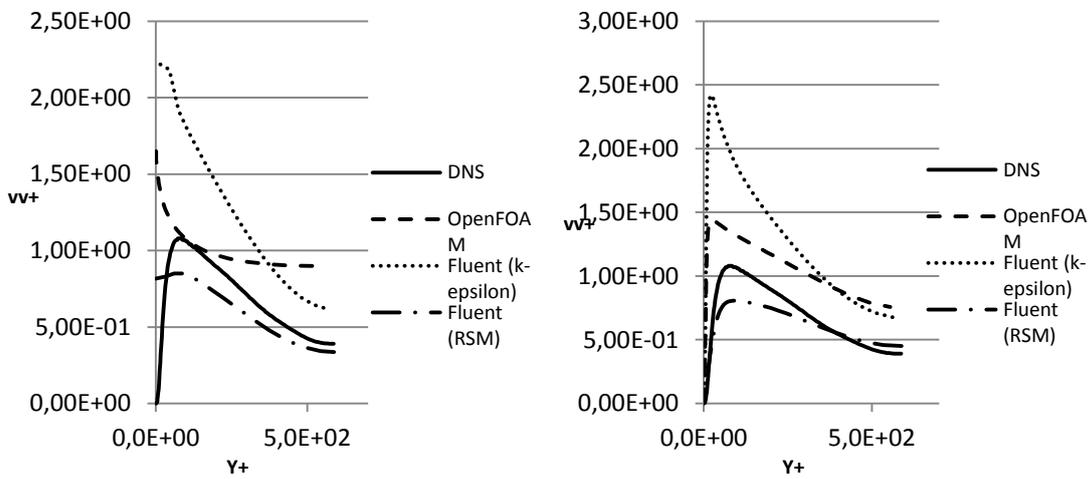
Figura 4.16 – Profili tensioni di Reynolds $uv+$



Wall functions

Senza wall functions

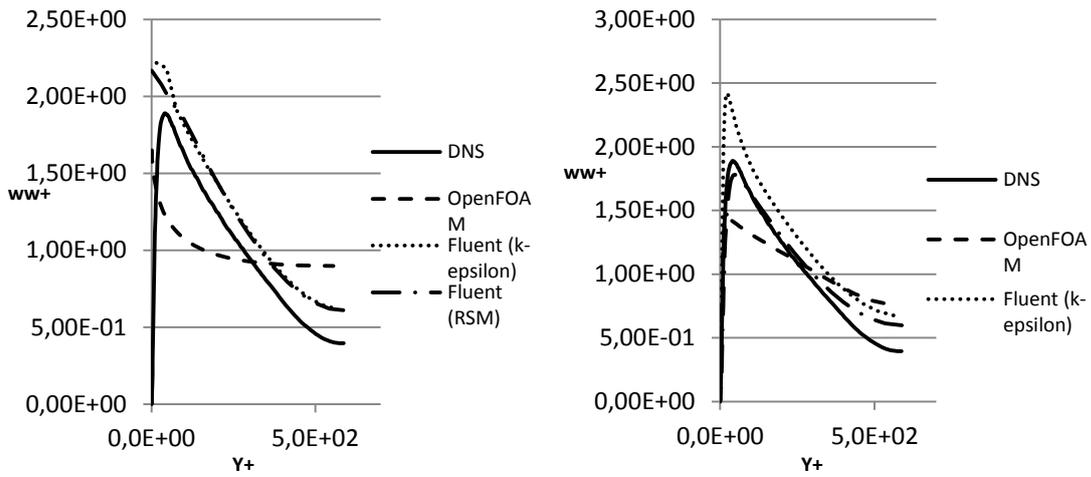
figura 4.17 – Profili tensioni di Reynolds uu^+



Wall functions

Senza wall functions

Figura 4.18 – Profili tensioni di Reynolds vv^+



Wall functions

Senza wall functions

Figura 4.19 – Profili tensione di Reynolds ww^+

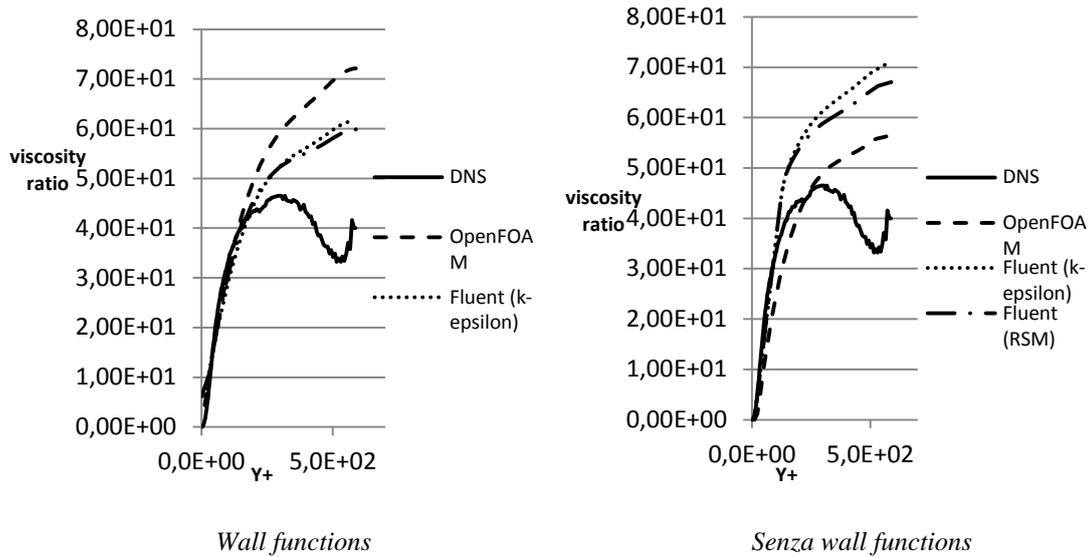


Figura 4.20 – Profili viscosity ratio

Una prima differenza sostanziale tra le simulazione che prevedono l'uso delle *wall functions* e non è la creazione della griglia di calcolo. Quest'ultima ha un ruolo incisivo per quanto riguarda i risultati delle simulazioni; per le simulazioni che non prevedono l'uso delle *wall functions* si deve creare una griglia in cui le celle a parete siano più fini in una regione così ampia in modo tale da rilevare ogni fenomeno a parete; nel caso opposto, bisogna studiare il corretto valore della Y^+ per catturare i fenomeni a parete e scegliere il corretto modello delle *wall functions*. Questi ultimi due passi non sempre sono intuitivi, e infatti solo con l'esperienza in questo campo e con il giusto materiale si riescono a ricavare i corretti valori. Inoltre, queste scelte influiscono per la maggiore sullo sforzo computazionale; come si può notare dai grafici di convergenza dei residui 4.7 e 4.8, a parità di soglia massima dei residui, le simulazioni che non prevedono l'uso delle *wall functions* raggiungono convergenza dopo un numero di iterazioni che è circa il triplo per le simulazioni svolte con il modello *standard k-ε* e circa 4 volte maggiore per le simulazioni svolte con il modello *Reynolds stress model*.

Capitolo quinto

Conclusioni

In questo capitolo verranno discussi i risultati ottenuti dalle simulazioni svolte. In questo progetto di tesi le simulazioni svolte hanno come finalità l'applicazione delle conoscenze ricavate nelle simulazioni del flusso attorno al pantografo. Sono state svolte simulazioni di due fenomeni, scambio termico attorno ad un cilindro bidimensionale e flusso completamente sviluppato all'interno di un canale. Tutte le simulazioni sono state svolte sia con Fluent e OpenFOAM.

Per quanto riguarda lo scambio termico attorno ad un cilindro bidimensionale, queste simulazioni sono state svolte a differenti valori del numero di Prandtl utilizzando lo schema numerico upwind sia del primo che del secondo ordine; la validazione dei risultati è ottenuta con il confronto tra il numero di Nusselt ricavato da simulazione e il numero di Nusselt ricavato da letteratura.

Il flusso turbolento all'interno del canale, come primo passo, è stato simulato con Fluent utilizzando due modelli turbolenza differenti, *standard k-ε* e *Reynolds stress model*; in OpenFOAM è stato utilizzato solo il modello di turbolenza *k-ε* in quanto il modello *RSM* non è disponibile. Scopo principale della simulazione di questo fenomeno è mettere in evidenza le differenze delle simulazioni con e senza le *wall functions*. La validazione dei risultati è ottenuta mediante comparazione dei profili della velocità media, dell'energia cinetica turbolenta, degli sforzi di Reynolds e del *viscosity ratio* con i dati ottenuti da simulazioni DNS.

Nel lavoro svolto sono stati esposti i criteri di costruzione delle griglie di calcolo, la scelta degli schemi numerici e i risultati ottenuti dalle simulazioni svolte. Data la semplicità delle simulazioni, le griglie di calcolo utilizzate restano un primo approccio a questo compito; infatti per progetti futuri e più complessi potrebbero essere applicate tipologie di griglie di calcolo differenti, sicuramente di carattere più ampio e complicato. Per quanto riguarda gli schemi numerici utilizzati, dato che le

simulazioni attorno al pantografo hanno circa lo stesso carattere di quelle analizzate, questi sono adeguati per le simulazioni future. Ovviamente, per un risultato più preciso si devono utilizzare schemi numerici del secondo ordine; si possono utilizzare schemi numerici di ordine maggiore, ma questi incrementerebbero notevolmente lo sforzo computazionale necessario. Un'ulteriore analisi va eseguita per i software utilizzati in questo progetto di tesi. Secondo le direttive, le simulazioni del flusso attorno al pantografo devono essere svolte con il software OpenFOAM. Per questo progetto di tesi, si è scelto di utilizzare il software Fluent per permettere a me stesso di effettuare i primi passi nel mondo della CFD con un software che, con le giuste conoscenze, è molto intuitivo e di facile utilizzo. Quindi, si è passati allo svolgimento delle simulazioni con il software OpenFOAM. Come anticipato, questo è un software open source, e questo già presenta un forte vantaggio rispetto a Fluent, software quest'ultimo acquistabile solo mediante acquisto di licenza. Essendo un software open source, OpenFOAM non presenta un'interfaccia user-friendly, e quindi a differenza di Fluent, non è un programma intuitivo. D'altra parte, con la conoscenza della programmazione in C++ si possono adattare le *utilities* e i *solver*, già presenti nel pacchetto di OpenFOAM, ad ogni caso preso in esame, quest'ultimo lavoro svolto in questo progetto per l'utility *wallHeatFlux*; e questo è un grosso vantaggio rispetto a software Fluent, il quale contiene già al suo interno un vasto numero di utility, le quali però, non si possono modificare per casi più particolari e specifici.

In conclusione, i lavori svolti in questo progetto di tesi mi hanno permesso di acquisire una conoscenza di base della fluidodinamica computazionale, e in particolare mi hanno permesso di conoscere il mondo dei software open source, uno tra i quali OpenFOAM, il quale non avrei conosciuto se non grazie a questo progetto.

Bibliografia

- [1] Versteeg H., Malalasekera W.. *An introduction to Computational Fluid Dynamics*. Longman, 1995.
- [2] J. H. Ferziger and Perić, Milovan. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer, 2002. Third edition, rev.
- [3] Fluent Inc.. *Fluent 3.1 User's Guide*. November 2011.
- [4] OpenFOAM Ltd. *OpenFOAM 2.2 ProgrammersGuide*. 2013.
- [5] OpenFOAM Ltd. *OpenFOAM 2.2 UserGuide*. 2013.
- [6] Churchill S. W., Bernstein M.. *A correlating equation for forced convection from gases and liquid to a circular cylinder in crossflow*. 1977. *J. heat transf.-trans.*, 300-306.
- [7] Moser R., Kim J., Mansour N.. *Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau = 590$* . April 1999.