

Introduzione

Il flusso intorno ad un cilindro circolare di allungamento infinita è uno dei casi più studiati nella ricerca di base. Nonostante la geometria sia molto semplice, questo tipo di flusso risulta estremamente complesso dal punto di vista fluidodinamico, in quanto la separazione dello strato limite non è fissata dalla geometria. Tale flusso presenta infatti regimi completamente diversi tra loro al variare del numero di Reynolds. Come noto, lo studio e la predizione del flusso attorno a corpi tozzi di varia forma, di cui il cilindro circolare è un buon modello, è di interesse non solo in ambito accademico ma anche in molte applicazioni in campo civile, industriale ed ambientale. I più comuni casi di interesse pratico sono in generale caratterizzati da velocità del flusso e dimensioni tipiche che si traducono in numeri di Reynolds molto elevati.

Per un cilindro circolare di diametro D , investito da un flusso uniforme ed a velocità asintotica costante U_∞ , il numero di Reynolds è definito come $Re = \frac{D \cdot U_\infty}{\nu}$, dove ν è la

viscosità cinematica del fluido. Per $Re < 50$ il flusso a valle del cilindro si concentra in due vortici controrotanti perfettamente simmetrici che danno origine ad una bolla di ricircolo stazionaria: in questa situazione il cilindro è soggetto solamente ad una forza di resistenza costante. All'aumentare di Re , per valori superiori al valore critico, si verifica l'instabilizzazione di tale flusso e da una situazione perfettamente simmetrica e stazionaria si passa ad una condizione non stazionaria caratterizzata da un distacco alternato di vortici che si muovono verso valle trasportati dal flusso dando origine alla scia vorticoso nota come scia di Von Karman: è il fenomeno del "vortex shedding".

A causa di questo fenomeno il corpo è soggetto a forze di portanza e resistenza variabili nel tempo proporzionalmente alla frequenza di distacco dei vortici adimensionalizzata, o numero di Strouhal, data da

$$St = \frac{f_s \cdot D}{U_\infty}$$

dove f_s è la frequenza di shedding.

In particolare la forza di portanza oscilla, attorno ad un valor medio nullo, ad una frequenza pari alla frequenza di shedding. La resistenza invece ha una frequenza pari al doppio della frequenza di distacco dei vortici ed il suo valor medio è tanto più elevato quanto più i nuclei vorticosi sono intensi e ravvicinati.

Da quanto detto si capisce quanto sia importante la valutazione del punto di distacco dello strato limite: se ciò avviene più a valle la scia avrà certamente una dimensione trasversale inferiore, per cui la resistenza del corpo risulterà notevolmente più bassa. Le caratteristiche dello strato limite risultano quindi fondamentali: uno strato limite di tipo laminare avrà energia cinetica mediamente più bassa rispetto ad uno di tipo turbolento, per il quale si verificano fluttuazioni e rimescolamenti del flusso più marcati, per cui il flusso supererà con

più difficoltà il gradiente avverso di pressione e raggiungerà prima la separazione. Il tipo di stato limite è influenzato notevolmente, oltre che dalla rugosità superficiale del corpo, dal numero di Reynolds.

Oltre il numero di Reynolds critico, come già detto pari a 50, si individuano tre intervalli fondamentali che individuano tre regimi differenti:

- $50 < Re < 10^5$: regime subcritico

- $10^5 < Re < 10^6$: regime supercritico

- $Re > 10^6$: regime postcritico

Nel regime subcritico, nel cui intervallo si trova anche il Re delle simulazioni condotte nella presente tesi, la separazione dello strato limite è di tipo laminare ed avviene per angoli minori di 90° , il che determina una dimensione trasversale della scia più grande della dimensione caratteristica del corpo e quindi valori di portanza e resistenza elevati e scarsamente dipendenti dal numero di Reynolds.

Nel regime supercritico lo strato limite separa in modo laminare, si riattacca alla superficie del corpo, in seguito ad un repentino passaggio a regime turbolento, attorno a circa 120° per poi separarsi nuovamente, dando origine ad una scia vorticoso piuttosto irregolare e molto sensibile al variare del Re. Conseguentemente i valori globali di portanza e resistenza saranno notevolmente differenti a seconda dei casi.

Nel regime postcritico la separazione, di tipo turbolento, avviene oltre i 100° e dà origine ad una scia avente una dimensione trasversale ridotta e quindi valori di resistenza e portanza sensibilmente minori rispetto ai casi precedenti.

La descrizione fin qui condotta è abbastanza semplificata e di tipo bidimensionale. In realtà i fenomeni connessi al vortex shedding, oltre ad avere caratteristiche prettamente tridimensionali, sono molto più complessi e caratterizzati dalla presenza, accanto alla vorticità che si raccoglie nei nuclei fondamentali, di una vorticità secondaria conseguente a separazioni secondarie dello strato limite.

La simulazione numerica del flusso intorno ad un cilindro circolare può essere condotta discretizzando le equazioni del moto, cioè le equazioni di Navier-Stokes. Tuttavia, la simulazione numerica diretta (DNS) delle equazioni del moto, che consiste in una risoluzione diretta di tutte le scale della turbolenza, è applicabile solo per flussi caratterizzati da numeri di Reynolds molto bassi (dell'ordine di 10^3). Infatti, per simulare il flusso all'interno di un volume avente dimensione caratteristica L^3 in un tempo T sono necessari circa Re^3 gradi di libertà e ciò comporta l'impossibilità di studiare numericamente, utilizzando questo approccio, tali classi di flussi in quanto improponibili anche per le capacità di calcolo dei moderni calcolatori.

Per poter analizzare questo tipo di problemi è necessario introdurre una modellizzazione della turbolenza che permetta di risolvere lo stesso problema avvalendosi di griglie molto meno raffinate. Un approccio molto usato in ambito ingegneristico è quello RANS, che consiste nella risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes mediate su tempi più lunghi di quelli caratteristici delle fluttuazioni turbolente. Dal momento che non è necessario risolvere direttamente le scale più piccole, possono essere analizzati problemi a numeri di Reynolds di interesse pratico. La media temporale dà origine ad equazioni del moto formalmente identiche a quelle di Navier-Stokes ma nelle variabili mediate. L'unica differenza consiste nella comparsa di un termine aggiuntivo, detto tensore di Reynolds, che necessita di una adeguata modellizzazione in quanto racchiude l'effetto di tutte le fluttuazioni turbolente.

Le simulazioni di tipo RANS, pur apportando delle notevoli semplificazioni, forniscono per i corpi tozzi predizioni in cattivo accordo con i dati sperimentali. Ciò è dovuto alla difficoltà di tenere conto nell'approccio RANS dei fenomeni fortemente instazionari e tridimensionali che

caratterizzano la scia dei corpi tozzi e soprattutto dall'incapacità di formulare modelli di chiusura di validità generale e non congegnati al variare del particolare flusso analizzato.

Un approccio intermedio tra la DNS e le RANS è la Large-Eddy Simulation (LES), che consiste nella risoluzione diretta delle grandi scale del moto (e quindi dei grandi fenomeni non stazionari) e nella modellizzazione degli effetti delle piccole scale tramite un adeguato modello di chiusura, che, dovendo descrivere solo l'effetto delle scale più piccole, verosimilmente indipendenti dal particolare flusso turbolento in esame, potrebbe assumere validità generale.

In questa metodologia si suppone di applicare un filtro alle equazioni del moto (in generale si suppone che la discretizzazione numerica agisca come un filtro applicato implicitamente) che permette di eliminare le scale più piccole della dimensione del filtro. Come per l'approccio RANS, si ottengono delle equazioni formalmente identiche a quelle di Navier-Stokes, ma nelle variabili mediate, ed il tensore degli sforzi risulta modificato tramite l'aggiunta del termine di subgrid scale (SGS). Tale termine è quello che deve essere modellizzato. Le simulazioni LES richiedono sforzi computazionali minori rispetto alle DNS e maggiori rispetto alle RANS, ma rispetto a quest'ultime danno risultati molto più soddisfacenti, soprattutto per la simulazione del flusso attorno ad un cilindro, in quanto tengono automaticamente conto dell'instazionarietà e della tridimensionalità del flusso. Tuttavia, la bontà di una simulazione LES dipende molto dal modello utilizzato per la riproduzione delle piccole scale in quanto si è ancora lontani, nella ricerca, alla formulazione di un modello di validità generale. Infatti il modello di SGS che per quanto detto finora dovrebbe descrivere l'effetto fisico delle piccole scale, interagisce in maniera molto importante con la discretizzazione numerica delle equazioni. Si riscontrerà che la bontà dei risultati ottenuti con un particolare modello dipende molto dallo schema numerico impiegato e questo suggerisce la necessità di introdurre nella modellizzazione LES anche l'interazione con la numerica con cui verrà discretizzato il problema.

Lo scopo della presente tesi è studiare l'effetto e l'interazione di schema numerico e modello di chiusura LES (modello di sottogriglia) per il flusso intorno ad un cilindro circolare di allungamento infinito ad un $Re=20000$. A tale scopo sono stati considerati i seguenti modelli di SGS: il modello di Smagorinsky (rif. [17]), il modello eddy-viscosity dinamico (DSM, rif.[6]), il modello dinamico misto (DMM, rif. [19]), il modello dinamico misto a 2 parametri (DTM, rif.[15]).

Il codice di calcolo utilizzato per tale indagine, basato su un approccio ai volumi finiti, le equazioni del moto, scritte in un sistema di riferimento body-fitted, vengono discretizzate su di una griglia strutturata, non-staggered (cioè velocità e pressione sono valutati nello stesso punto, ossia il centro del volume di controllo) e colocated (cioè sulle facce delle celle che costituiscono la griglia vengono calcolate le velocità controvarianti). Vengono presi in considerazione due tipi di schema numerico per la discretizzazione del termine convettivo: uno schema QUICK di tipo UPWIND (rif. [9]) e uno schema centrato, entrambi di ordine 2. L'avanzamento temporale avviene tramite un metodo semi-implicito a passo frazionario (predittore/correttore), in cui la pressione viene valutata con un algoritmo multigrid (rif. [20], rif. [18]).

Oltre all'interazione tra schema numerico e modello SGS, con la presente tesi ci si pone anche l'obiettivo di indagare l'effetto dell'impiego degli schemi numerici sopraccitati nella simulazione della condizione al contorno di uscita dei vortici di scia dal dominio di calcolo.