

# Capitolo 7

## Conclusioni

Nella presente tesi è stato studiato numericamente, avvalendosi di un approccio “large-eddy”, il flusso attorno ad un cilindro circolare ad un numero di Reynolds pari a 20000. Un approccio di questo tipo si basa sull’ipotesi che vengano direttamente simulate le scale della turbolenza aventi dimensione più grande di una dimensione fissata, dipendente dalla griglia di calcolo usata per la discretizzazione numerica del problema, rendendo così necessaria solo la modellizzazione delle piccole scale del moto non risolubili direttamente, ossia di dimensioni inferiori a quella di riferimento. Per tutte le simulazioni condotte, la griglia è di tipo strutturato, non-staggered (cioè velocità e pressione sono valutati nel centro del volume di controllo) e colocated (cioè sulle facce delle celle che costituiscono la griglia vengono calcolate le velocità controvarianti). La discretizzazione spaziale delle equazioni avviene tramite un metodo ai volumi finiti del secondo ordine. L’avanzamento temporale, avente ordine di precisione pari a 2, avviene tramite un metodo semi-implicito a passo frazionario (predittore/correttore), in cui la pressione viene valutata con un algoritmo multigrid.

Spesso la discretizzazione numerica del termine convettivo delle equazioni del moto avviene tramite l’utilizzo di uno schema upwind, per motivi di stabilità numerica. Nel caso in esame tale termine è stato discretizzato sia con uno schema upwind QUICK (rif. [9]), che con uno schema centrato, entrambi di ordine di precisione 2. La motivazione di questa scelta è dettata dal fatto che vari studi in letteratura affermano che le simulazioni LES dovrebbero essere condotte avvalendosi esclusivamente di schemi centrati, in quanto, nel caso di utilizzo di uno schema upwind, la dissipazione numerica introdotta dallo schema potrebbe essere più importante dell’effetto del modello di SGS. In particolare in questo lavoro, oltre a studiare l’effetto dei modelli di sottogriglia, ci si è concentrati sull’interazione fra il modello LES e lo schema numerico.

I risultati ottenuti vengono confrontati con quelli relativi alle simulazioni descritte in rif. [13] e ai dati sperimentali in rif. [14].

Il primo modello ad essere esaminato è stato il modello di Smagorinsky, per il quale sono stati analizzati i risultati relativi a tre simulazioni: la prima con lo schema centrato, la seconda con lo schema upwind e la terza con uno schema prevalentemente centrato, ma con un accorgimento numerico in grado di ridurre il fenomeno delle riflessioni spurie dei vortici di scia uscenti dal dominio. Tutte le simulazioni condotte utilizzando questo modello presentano valori globali in cattivo accordo con i dati sperimentali, in particolare quella in cui viene associato a tale modello SGS lo schema upwind. Infatti si ottengono, ad esempio, valori del  $C_D$  molto più bassi di quelli riscontrati sperimentalmente e di conseguenza un andamento del coefficiente di pressione  $C_P$  solo qualitativamente corretto: il disaccordo con i dati sperimentali risulta evidente soprattutto nella zona separata, dove il  $C_P$  presenta valori più elevati, ed il suo profilo in generale mostra un certo ritardo del fenomeno della separazione. Infatti, in tutti i casi il punto di distacco dello strato limite è situato molto oltre i  $90^\circ$  a differenza del dato sperimentale che invece indica un angolo di circa  $88^\circ$ . Ciò implica che il modello di Smagorinsky non riproduce in modo soddisfacente la separazione dello stato

limite ed il fenomeno del vortex shedding, come si evince anche dai risultati relativi al numero di Strouhal, in generale più elevato del valore di confronto. Inoltre, i valori dell'r.m.s delle forze rientrano nell'intervallo di riferimento solo nel caso di schema centrato, da cui si conferma che le forze agenti sul cilindro non sono in generale valutate in maniera corretta, bensì sottostimate anche in maniera importante. Dall'esame dei grafici del coefficiente di portanza  $C_L$  relativi a tutte le simulazioni si nota una scarsa modulazione delle ampiezze, indice di una scarsa riproduzione della tridimensionalità del campo. Da quanto detto finora emerge che il modello di Smagorinsky, almeno per questo tipo di problema, sembra non essere adatto a riprodurre la fisica del flusso. Fra gli schemi numerici considerati, quello che sembra interagire meglio con tale modello è lo schema centrato. Le ragioni di questo comportamento sono probabilmente da attribuire all'elevata dissipazione che questo modello di sottogriglia introduce nel campo, a maggior ragione se associato ad uno schema numerico notoriamente dissipativo come uno schema upwind. La caratteristica principale della simulazione relativa al caso III, ossia quella che adotta lo schema upwind ovunque, è la presenza di vortici in fase di distacco molto distanti dal cilindro, il che spiega i bassi valori del  $C_D$  medio e dell'r.m.s. del  $C_L$ ; inoltre comporta un eccessivo allungamento della bolla di ricircolo relativa al campo di velocità medio e un ritardato passaggio al regime turbolento nella scia separata. Nei casi a schema centrato invece, su cui agisce una dissipazione numerica più bassa, i vortici sono più intensi e vicini al cilindro e la bolla di ricircolo ha una lunghezza inferiore e in buon accordo con la fisica del problema. Nel caso III si nota, inoltre, un'anomalia del campo medio: due ulteriori vortici all'interno della bolla di ricircolo immediatamente alle spalle del cilindro, che indicano la presenza di una consistente attività vorticoso secondaria di una certa importanza lungo tutta l'estensione assiale del cilindro e per tutto l'arco della simulazione.

Il secondo modello analizzato è il DTM, con il quale sono state condotte simulazioni con caratteristiche analoghe alle precedenti relativamente allo schema numerico utilizzato. Tali simulazioni hanno chiaramente indicato che lo schema centrato associato a tale modello, non è in grado di dare una corretta predizione del flusso attorno al cilindro. Infatti, le simulazioni o sono incorse nella instabilità numerica o hanno mostrato una perturbazione del campo così elevata da rendere le grandezze in esame statisticamente non attendibili. Ciò si è verificato, in alcuni casi, a causa dell'effetto della discretizzazione delle condizioni al contorno, che verrà descritto in seguito, mentre in altri casi, in cui non si risente della loro influenza, le perturbazioni risultano essere causate dall'interazione fra schema numerico centrato e modello SGS. In tale caso probabilmente la dissipazione globale fornita risulta troppo bassa e si incorre nel fenomeno di instabilizzazione caratteristico dello schema centrato. Si può quindi affermare che questo modello dinamico, caratterizzato da un importante fenomeno di passaggio di energia dalle piccole alle grandi scale, non è in grado di fornire la giusta dissipazione e quindi deve essere associato ad uno schema in grado di fornire un'elevata dissipazione numerica per dare dei risultati stabili ed in buon accordo con quelli sperimentali, come mostrato in rif. [13], dove il DTM è stato affiancato allo schema upwind QUICK.

Un altro obiettivo della tesi, cui si è brevemente accennato in precedenza, era quello di indagare l'effetto della condizione al contorno convettiva di uscita dei nuclei vorticosi dal dominio di calcolo per ogni schema numerico impiegato nella discretizzazione. I due schemi numerici considerati sono stati analizzati, da questo punto di vista, affiancando loro una discretizzazione centrata all'interno del dominio ed impiegando come modelli di subgrid sia il modello di Smagorinsky sia il modello dinamico misto a due parametri (DTM). In tutti questi casi le riflessioni spurie dovute all'uscita della scia vorticoso dal dominio sono presenti e si propagano progressivamente all'interno del campo alterando la fisica del problema. Tali riflessioni, del tutto assenti quando all'interno del dominio si utilizza uno schema upwind, risultano più importanti nel caso in cui la condizione al contorno sia discretizzata con lo

schema centrato. Chiaramente tali perturbazioni provocano l'instabilizzazione della simulazione, tanto più precoce quanto più il modello SGS risulta poco dissipativo. Ciò ha suggerito un artificio numerico per poter analizzare gli effetti dello schema numerico centrato attorno al cilindro senza che il flusso sia disturbato dalle riflessioni spurie: apportare una modifica al codice di calcolo per ricavare una zona vicina al bordo esterno del dominio in cui la discretizzazione del termine convettivo venga effettuata tramite uno schema upwind, grazie alla quale si sperava di annullare la propagazione delle perturbazioni dovute alle riflessioni spurie. Tale stratagemma ha dato i risultati sperati.

L'ultimo obiettivo della tesi era quello di confrontare, a parità di schema numerico adottato, i vari modelli di SGS. Nel caso dell'utilizzo dello schema centrato, visti i problemi di instabilità dei modelli DTM e DSM, è stato possibile un confronto solo fra il modello di Smagorinsky ed il DMM.

Da una prima analisi delle statistiche a disposizione si ricava, per il DMM, un generale peggioramento nella predizione del profilo del  $C_p$ , soprattutto nella zona separata, in cui è riportato un elevato valore del  $C_{PB}$ . Il coefficiente di resistenza  $C_D$  è invece più vicino ai valori sperimentali rispetto al caso in cui è impiegato il modello di Smagorinsky, contrariamente a quanto ci si dovrebbe aspettare, considerato il più alto valore  $C_{PB}$ . La causa di questa discrepanza potrebbe essere dovuta all'ancora statisticamente insufficiente durata della simulazione numerica. Entrambi i modelli non simulano al meglio la frequenza di distacco dei vortici, ma il DMM predice un valore per l'r.m.s. del  $C_L$  in disaccordo con i valori di riferimento, fatto che non si verificava nel caso IV. La separazione risulta posticipata in entrambe le simulazioni svolte.

Nel caso di schema upwind i risultati ottenuti per il caso III, in cui è stato adottato il modello di Smagorinsky, sono stati rapportati a quelli relativi ad i modelli DTM e DSM in rif. [14].

Dal confronto è emerso che il modello di Smagorinsky non è in grado di riprodurre adeguatamente la fisica del flusso attorno al cilindro circolare sotto ogni punto di vista: dalla corretta valutazione delle forze agenti sul cilindro, alla predizione del punto di separazione dello strato limite, così come non è riprodotto in maniera adeguata il fenomeno del vortex shedding. La causa è da imputarsi alla notoriamente elevata dissipazione introdotta dal modello che è sempre e comunque dipendente da una costante fissata a priori. Se a tale modello viene affiancato un schema numerico dissipativo come lo schema upwind, i risultati peggiorano ulteriormente. I modelli dinamici, invece, valutando in modo dinamico la dissipazione locale, danno risultati notevolmente migliori sia dal punto di vista delle valutazioni delle forze sul cilindro che da quello della riproduzione dei fenomeni di scia.

In definitiva, si può affermare che l'interazione fra schema numerico e modello di sottogriglia è importante: l'effetto di uno stesso modello varia a seconda dello schema numerico di discretizzazione del termine non lineare utilizzato. Inoltre, si può affermare che, anche quando si ha a che fare con schemi caratterizzati da un ordine di precisione basso e da una conseguente dissipazione numerica importante, l'effetto dello schema di sottogriglia continua ad essere importante, contrariamente a quanto affermato in letteratura.