



Relazione di attività del PhD student Samuele Zampini

Supervisore: Prof. Maurizio Quadrio, Dipartimento di Scienze e Tecnologie
Aereospaziali

Optimization and control: CFD as a design tool

Attività di ricerca

Vengono qui presentati il lavoro svolto e i risultati ottenuti sia con il software SU² sia con OpenFOAM. Per quel che riguarda SU² si sono volute testare l'affidabilità dello strumento, le potenzialità dello stesso e la sua usabilità; per quel che riguarda OpenFOAM, invece, si è cercato di capire quali fossero le potenzialità e quali le problematiche che tale software presenta nel momento in cui si vanno ad affrontare problemi legati all'ottimizzazione.

Nei seguenti due paragrafi sono approfonditi i dettagli dei due filoni di ricerca.

SU2

Il lavoro svolto con SU² è stato sviluppato in collaborazione con il Dott. Roberto Pieri. Lo strumento ha necessitato di una fase di validazione condotta in maniera rigorosa e precisa, entrando direttamente in contatto con gli sviluppatori dell'Università di Stanford e avviando una collaborazione atta a migliorare le prestazioni del software. Sono state seguite da vicino le varie fasi di sviluppo del software per capire se potesse soddisfare i requisiti di risoluzione di un problema di ottimizzazione in campo fluidodinamico. Per prendere confidenza con il tool che si è scelto di usare, la prima fase del lavoro è consistita nel riprodurre fedelmente i tutorial: Questo step, oltre ad una prima validazione necessaria, ma non sufficiente, ha permesso di conoscere meglio SU², la sua sintassi, la struttura dei suoi dizionari e il significato dei diversi parametri che entrano in gioco. Successivamente, si è deciso di fare un passo oltre e di testare SU² su casi

standard, diversi dai tutorial. Per testare questo software sono stati scelti problemi prettamente aeronautici: l'idea era quella di portare a termine una simulazione non viscosa tridimensionale per poi studiare lo stesso problema, tenendo però conto degli effetti viscosi. Dopo la simulazione del problema diretto si è proceduto con l'ottimizzazione sfruttando le potenzialità di SU². Il primo problema con cui ci siamo scontrati è dovuto al fatto che, almeno allo stato attuale, risulta impossibile risolvere problemi che tengano conto degli effetti viscosi. Mentre il solutore delle equazioni di Eulero - come vedremo negli esempi presentati in seguito - dà risultati molto buoni, il solutore per le equazioni di Navier-Stokes non produce risultati accettabili, se non nel caso bidimensionale. Inoltre, il solutore del sistema aggiunto può essere utilizzato solo per problemi in cui siano trascurabili gli effetti viscosi. Questo, di fatto, rende nullo il vantaggio di SU² rispetto a quanto offerto da OpenFOAM, a meno che non si voglia agire pesantemente sul codice. Poiché i problemi che si ha intenzione di analizzare sono caratterizzati da flussi in cui i fenomeni viscosi non possono essere trascurati, risulta chiaro che l'utilizzo di questo software non dà le garanzie necessarie perché si possano ottenere i risultati sperati.

Viene presentato ora un elenco delle simulazioni portate a termine, con una breve analisi dei risultati ottenuti:

– simulazione non viscosa 3D. Si è scelto di analizzare un problema standard: simulazione del flusso attorno ad un'ala (ONERA M6). In questo caso, trattandosi di un caso inviscido, il solutore dà buoni risultati. Anche l'ottimizzazione dà dei risultati accurati: come è possibile apprezzare in Figura 1, si è riusciti ad ottenere un buon accordo con i dati sperimentali. Inoltre, osservando la Figura 2, si nota che l'ottimizzazione ha funzionato, portando ad una riduzione della resistenza, mantenendo invariata la portanza.

– simulazione viscosa 2D. In questo caso si è voluto studiare il flusso intorno ad un profilo molto studiato, NACA 0012. Come si può osservare in Figura 3, l'andamento del coefficiente di pressione non è in accordo con i dati sperimentali. Questo a dimostrazione del fatto che SU², al momento, non è indicato nel caso in cui si vogliano considerare gli effetti viscosi. Dal momento che le applicazioni che si vorrebbero studiare non permettono questa semplificazione, la scelta di accantonare questo software risulta abbastanza naturale.

Concludendo, alla luce dei risultati ottenuti, è possibile affermare che SU² è sicuramente uno strumento interessante per la CFD in campo comprimibile e che esso ha un grande potenziale. Il fatto di avere un solutore nativo per la risoluzione delle equazioni aggiunte e la relativa ottimizzazione è sicuramente un valore aggiunto. Purtroppo però questo software non si addice ai nostri scopi, dal momento che non permette una risoluzione agevole delle equazioni di Navier-Stokes. Sebbene il caso 2D - con un'accuratezza comunque non buona - si stato portarlo a convergenza, passando al 3D è impossibile ottenere dei risultati significativi.

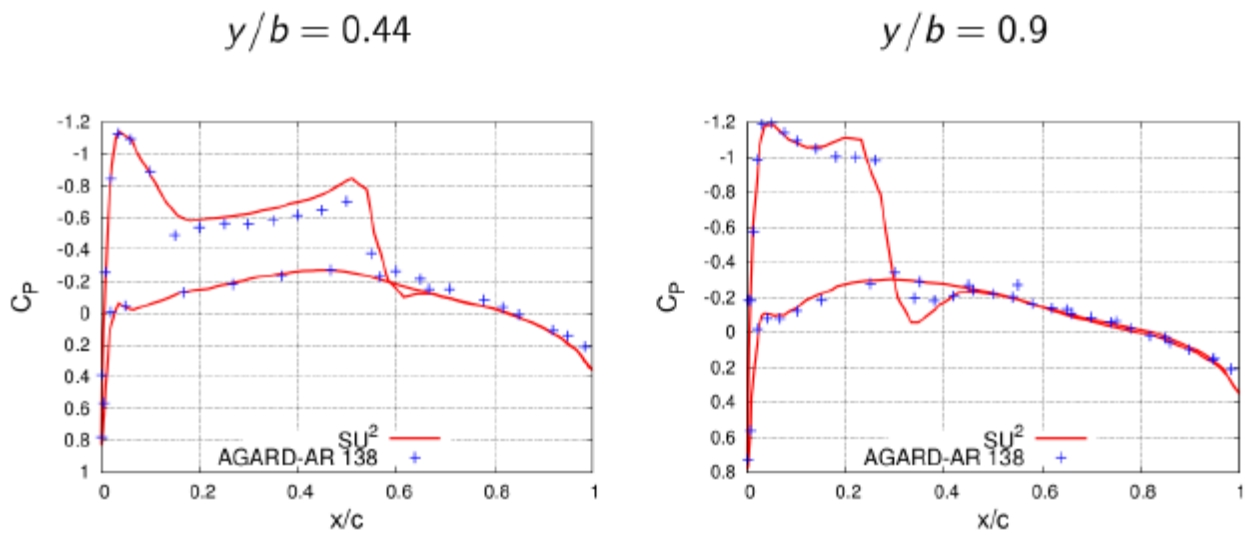


Figura 1: Geometria base: andamento del coefficiente di pressione lungo la corda a 2 diverse posizioni in apertura.

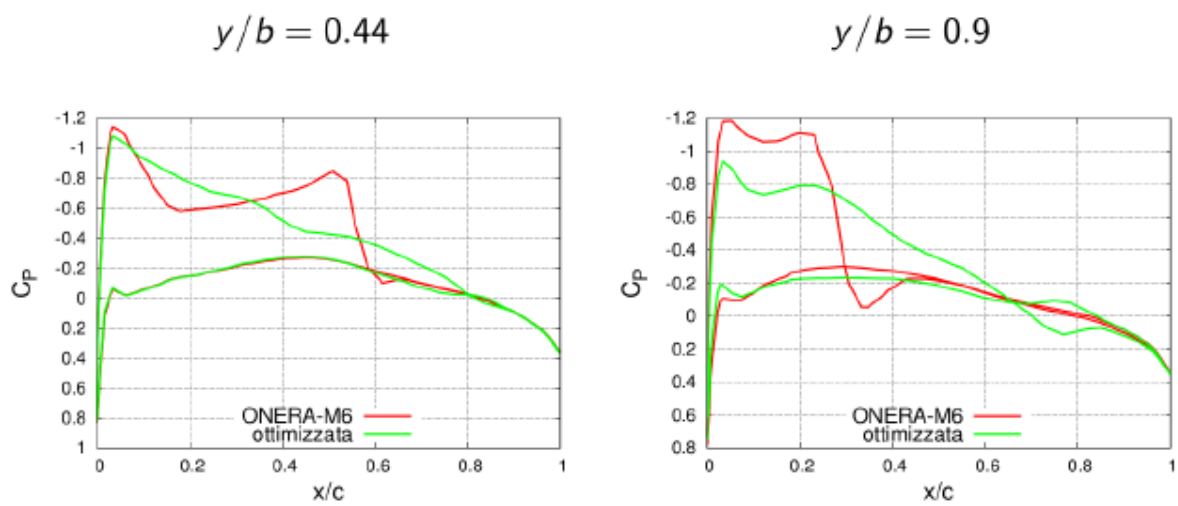


Figura 2: Geometria modificata: andamento del coefficiente di pressione lungo la corda a 2 diverse posizioni in apertura.

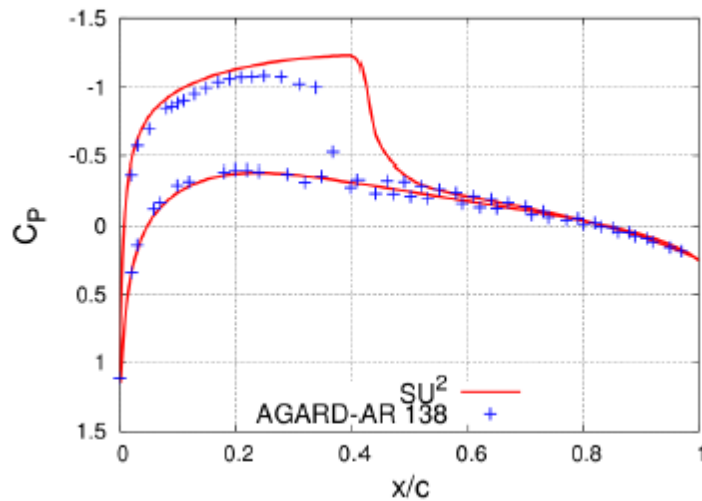


Figura 3: Geometria base: andamento del coefficiente di pressione lungo la corda.

Nel momento in cui si vuole utilizzare questo solutore, la risoluzione del problema aggiunto non è possibile. Questo, di fatto, annulla il vantaggio che SU² ha nei confronti di OpenFOAM. Un'opzione che è stata presa in considerazione in questi mesi è stata quella di diventare noi stessi sviluppatori di SU², andando a scrivere i solutori che servono ai nostri scopi. Questo approccio, però, avrebbe richiesto una dose massiccia di programmazione. Ecco perché, valutando attentamente i pro e i contro di questo tool, alla fine si è deciso di accantonarlo e di focalizzare le nostre risorse su OpenFOAM, con il quale - come vedremo nel paragrafo seguente - si sono ottenuti risultati migliori e più interessanti.

OpenFOAM

Con OpenFOAM l'approccio utilizzato è stato completamente diverso. In questo caso, infatti, non è stato necessario valutare le prestazioni del software essendo esse note e documentate, ma l'intento è stato quello di capire quali siano le sue potenzialità nell'ambito dell'ottimizzazione. Ci si è, quindi, concentrati su un problema applicativo di interesse industriale, introducendo il concetto di ottimizzazione. Affiancando Domenico Sgrò nel suo lavoro di tesi, si è analizzato un problema di microfluidica. L'obiettivo è stato quello di massimizzare il mixing all'interno di microcanali (nello specifico la forma geometrica è una "T") che vengono impiegati nell'industria chimica e in quella farmaceutica. Questi microcanali hanno lo scopo di far sì che due fluidi (provenienti dai due canali di ingresso) si miscelino nel canale di efflusso, massimizzando questo grado di mescolamento. La difficoltà principale risiede nel fatto che nelle applicazioni più comuni il flusso è laminare, di conseguenza c'è un unico meccanismo che innesca il mixing, la diffusione molecolare. Facendo una prima simulazione del problema diretto, si osserva che il mixing è effettivamente piuttosto basso. Fatta questa osservazione, è immediato riconoscere i due possibili target che si possono perseguire, uno il duale dell'altro: da un lato è possibile voler aumentare il mixing a parità di

lunghezza del ramo di mescolamento, mentre dall'altro è possibile ambire ad una riduzione della lunghezza del canale di mescolamento, a parità del grado di mixing ottenuto. In base all'applicazione per cui il microcanale è impiegato, infatti, la richiesta può essere o l'una o l'altra.

Per far questo, a livello pratico, l'idea è quella di andare a modificare la geometria interna del canale, introducendo una "rugosità" artificiale: per poter stabilire in modo rigoroso la forma e l'intensità di queste modifiche geometriche, ci si affida allo strumento matematico dell'operatore aggiunto. Definita una opportuna cifra di merito (la scelta della cifra di merito è una fase molto delicata in quanto non sempre si hanno a disposizione le grandezze fisiche necessarie a calcolare la quantità che vogliamo ottimizzare) è possibile risolvere il problema aggiunto, così da ottenere un'indicazione precisa delle zone in cui una modifica della geometria porterebbe maggiori effetti sulla quantità rappresentata dalla funzione obiettivo. Il primo passo, quindi, è stato quello di una simulazione del problema diretto sulla geometria base. A questo punto, risolto il problema aggiunto, si è potuta modificare la geometria per poi ottenere una nuova soluzione del problema diretto sulla geometria modificata. I risultati ottenuti sono davvero sorprendenti (Figura 4): il mixing - a parità di lunghezza - aumenta di 6 volte. Ma il risultato più sorprendente risiede nel fatto che per avere un mixing uguale a quello che si ha in geometria base, nel canale con geometria modificata potremmo ridurre del 99% il condotto di uscita.

Andando ad analizzare il flusso sulla sezione di outlet ed evidenziando la concentrazione di un determinato reagente nel fluido, si osserva come - con la geometria modificata - il mixing sia decisamente superiore (si nota, infatti, che la concentrazione nel caso di geometria modificata è più uniforme e intorno ad un valore di 0,5 mentre con la geometria base i due flussi restano piuttosto segregati). In Figura 5 si ha la rappresentazione della concentrazione in geometria base, mentre in Figura 6 si osserva quello che avviene in geometria modificata. Si può osservare come nel primo caso i due flussi restino segregati, mentre nel caso di geometria base, questi vanno a mischiarsi in modo molto più significativo.

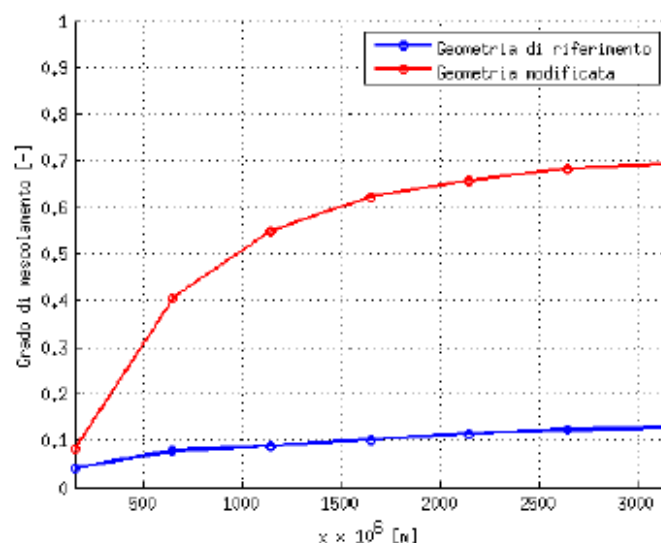


Figura 4: Andamento del mescolamento, δ , lungo il canale di mixing.

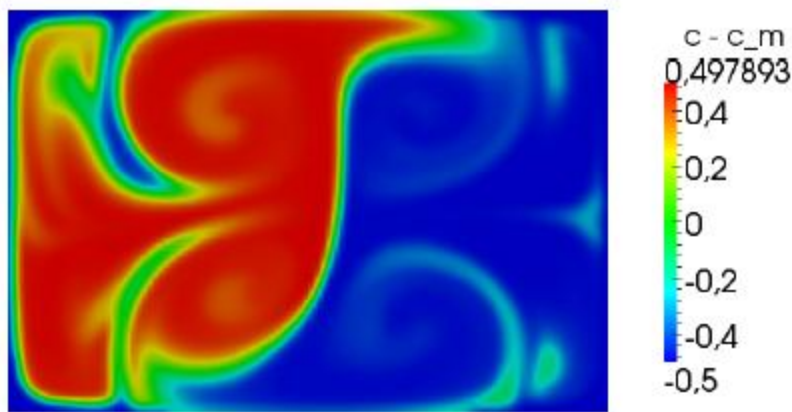


Figura 5: Geometria base: concentrazione sulla sezione di uscita.

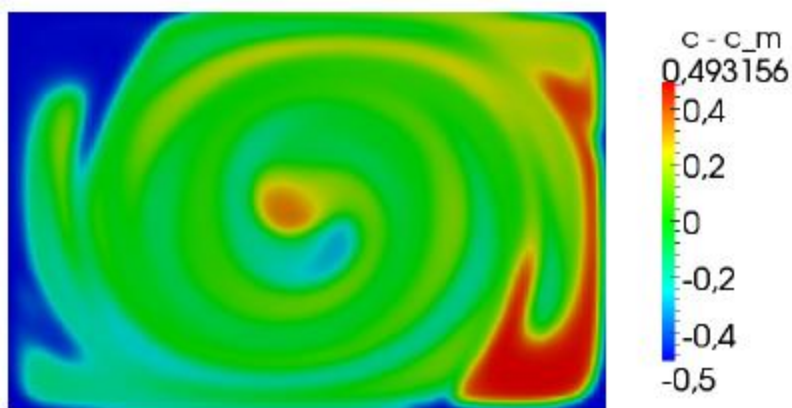


Figura 6: Geometria modificata: concentrazione sulla sezione di uscita.

Sviluppi della ricerca

Il progetto prevede che affidandosi a OpenFOAM si vadano in seguito a studiare altre applicazioni, in cui il concetto di ottimizzazione è importante e porterebbe a un significativo miglioramento (miglioramento che si può tradurre in termini di costi, di energia impiegata, di efficienza etc.). Tra i vari strumenti matematici che si possono utilizzare il primo, che sarà oggetto di analisi più dettagliate, è l'operatore aggiunto. Questo strumento, infatti, si è rivelato molto valido nei progetti fin qui svolti. Ovviamente vi è la consapevolezza del fatto che questo non sia l'unico. L'idea è quella di disporre di un solutore che permetta di automatizzare l'intero ciclo di ottimizzazione, andando a eseguire automaticamente gli step seguenti:

- calcolo della soluzione del problema diretto sulla geometria base;
- calcolo della soluzione del problema aggiunto e valutazione della funzione di sensitività;
- modifica della geometria, in accordo con quanto indicato dalla funzione di sensitività;

- calcolo della soluzione del problema diretto sulla geometria modificata;
- iterazione dei punti 2, 3 e 4 fino al raggiungimento del livello di accuratezza desiderato.

Di conseguenza, pur avendo la necessità di concentrare l'attenzione su alcune applicazioni, l'obiettivo per il prossimo anno è un obiettivo abbastanza ampio e ambizioso: mettere a punto un solutore che sarà utilizzabile per svariate applicazioni impostando opportunamente alcuni dizionari. Questo risultato permetterebbe di avere uno strumento affidabile e molto potente, di sicuro interesse nel campo della CFD, che non sarebbe più solo ed esclusivamente uno strumento di analisi, ma diventerebbe uno strumento di progetto.