



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA MECCANICA
Indirizzo VEICOLI

SIMULAZIONI NUMERICHE
PER LA MAPPATURA AERODINAMICA
DI UN VEICOLO DA COMPETIZIONE
A RUOTE SCOPERTE

Tesi di
Jacopo Canestri

Relatore
Prof. Carlo Massimo Casciola

Correlatore
Dott. Ing. Francesco Battista

Candidato
Ing. Jacopo Canestri

Sessione di Laurea 22 Gennaio 2014
Anno Accademico 2012/2013

Sommario

Tra le tante tecniche di rappresentazione della soluzione delle equazioni di Navier-Stokes, la fluidodinamica computazionale o CFD, *Computational Fluid Dynamics* ha preso piede sempre di più negli ultimi anni, trainata dai vertiginosi sviluppi di potenza di calcolo dell'informatica. Si tratta di una tecnica numerica che risolve in maniera approssimata il sistema con determinate condizioni al contorno partendo da condizioni iniziali assegnate.

In passato l'unico modo di vedere la soluzione era in galleria del vento, costruendo fisicamente il fenomeno da studiare sfruttando il punto di vista dell'oggetto immerso nel campo: si realizzava il modello in scala ridotta, si visualizzava il flusso tracciandolo con pigmenti colorati e si apprezzavano le forze aerodinamiche con vere e proprie bilance su cui era posto il corpo. Tale metodo seppur abbastanza affidabile riservava lo studio solamente a chi era dotato di queste costose infrastrutture. Anche nel mondo della Formula 1, solo chi poteva permettersi un accesso ad una galleria del vento, poteva affrontare una progettazione del veicolo ben più diversa del *try an error* constatato solo su pista. Come per molte altre cose, la diffusione dei computer e lo sviluppo di codici di calcolo, anche open source, ha spalancato le porte alla fluidodinamica numerica e ha permesso di sfruttare una galleria del vento virtuale a chiunque abbia voglia di imparare a gestire i codici sfruttandoli per gli scopi più vari: semplice curiosità, didattica, ricerca o addirittura progettazione. L'unico vincolo rimane la potenza computazionale che è subordinata alla risoluzione della griglia di calcolo. Purtroppo tale risoluzione è intrinsecamente legata alla struttura delle equazioni di Navier-Stokes che prevedono una zona molto sottile, quasi come una seconda pelle del corpo, fondamentale per la comprensione di forze di resistenza: lo strato limite. Come avremo modo di vedere, lo spessore dello strato limite δ è proporzionale all'inverso della radice quadrata di un parametro proprio del fenomeno che è il numero di Reynolds, $Re = \frac{\rho ul}{\mu}$. Prendendo in esame il caso di una vettura di Formula 1, possiamo assumere $l = 5 \text{ m}$ e $u = 85 \text{ m/s}$, perciò calcolando Re per l'aria ($\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1.78 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$), otterremo:

$$Re = \frac{1.225 \cdot 5 \cdot 85}{1.78 \cdot 10^{-5}} \approx 3 \cdot 10^7$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{Re}} \approx 1.8 \cdot 10^{-4}$$

Ciò vuol dire che per avere l'accuratezza necessaria a risolvere l'intero campo la griglia deve essere in grado di definire bene anche lo strato limite alto δ volte la scala integrale che nell'esempio considerato è dell'ordine del metro, per cui la minima lunghezza della

griglia deve essere almeno dell'ordine del decimo di millimetro o poco più. Assumiamo $\Delta x = 0.0002 \text{ m}$. Per discretizzare un volume di almeno $9 \text{ m} \times 22 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ adatto a contenere il veicolo e la scia servono circa 74 mila miliardi di celle, ora, ammesso che tale risoluzione estrema serva solo in prossimità dello strato limite si potrebbe ridurre il numero di celle a solo 7 miliardi (diecimila volte di meno!) che restano comunque tante visto che per ogni cella bisogna svolgere almeno un migliaio di calcoli in virgola mobile, chiamati *FLOPs* (FLoating point OPERations), per risolvere il campo in un istante [15]. Inoltre per garantire poi la convergenza numerica bisogna mantenere il passo temporale al di sotto di una certa soglia dettata dalla risoluzione della griglia. In generale si ha che gli steps temporali possono essere stimati con $80 \frac{L}{\Delta x}$ [15]. Quindi per la nostra simulazione avremo bisogno di effettuare

$$7 \cdot 10^9 \cdot 10^3 \cdot 80 \cdot \frac{22}{0.0002} \approx 60 \cdot 10^{18} \text{ FLOPs}$$

Ammesso di aver a disposizione il supercomputer attualmente più potente al mondo, il *Tianhe-2*, proprietà della Chinas National University of Defense Technology, con una potenza di picco di 33.86 PetaFLOPS (FLoating point Operation Per Second), per la nostra simulazione impiegheremmo

$$\frac{60 \cdot 10^{18}}{33.86 \cdot 10^{15}} \approx 30 \text{ min}$$

Un tempo ragionevole se non si considera che la faccenda si complica se introduciamo anche la turbolenza, che ci obbliga a risolvere l'intero dominio con la più piccola scala del fenomeno, la scala η di Kolmogorov, più piccola dello spessore dello strato limite, riportando così il numero di celle a diecimila volte tanto, con un conseguente incremento degli steps temporali, facendo schizzare il numero di FLOPs necessari, e di conseguenza il tempo di simulazione, ad almeno 50000 volte tanto: siamo arrivati ad una simulazione che, nel migliore dei casi, impiega 34 mesi. . .

Per fortuna, se non si vuole affrontare una simulazione diretta DNS (*Direct Numerical Simulation*), evidentemente ancora improponibile per alti *Re*, si può scendere a compromessi impostando simulazioni sulle larghe scale LES (*Large Eddies Simulation*) o addirittura sul campo mediato RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) le quali alliggeriscono di molto il costo computazionale a scapito della precisione puntuale con la quale viene risolto il campo; infatti si estrapola la media. La RANS, con tutte le sue varianti, rende possibile la progettazione al 100% di una vettura da Formula 1, come lo è stato per il team Marussia Virgin Racing che per la stagione 2011 preparò la MVR-02 [fig. 1] completamente al computer. C'è da dire che i risultati non furono dei migliori, in quanto dopo pochi Gran Premi, il team si dovette appoggiare alla galleria del vento McLaren per apportare importanti modifiche aerodinamiche e il capo progettista Nick Wirth fu licenziato. Wirth, con il suo coraggioso esperimento, diede uno slancio alla CFD nel campo del motor sport: diede prova che, con qualche accorgimento in più, si poteva fare!

Da notare anche che l'occhio lungo della FIA, solo qualche anno prima, aveva imposto un limite alla potenza di calcolo a 40 TeraFLOPS in media su un periodo di otto settimane, ponendo su uno stesso livello o quasi, le ore passate in pista alle ore passate al computer o in galleria del vento. Come al solito, la virtù sta nel mezzo.

Lo scopo di questo lavoro è fornire una mappatura aerodinamica di un modello di Formula 1 al variare dell'assetto e degli angoli di attacco di alcune appendici. Il modello è stato realizzato partendo dagli schemi illustrativi all'interno del regolamento tecnico del campionato del mondo di Formula 1 del 2013 [3], utilizzando *Blender* [5], un software open source di modellazione tridimensionale molto adatto a creare superfici curve complesse. Le superfici alari sono state realizzate con profili molto simili a quelli utilizzati sulle monoposto reali. Il modello così realizzato è stato impiegato in una serie di simulazioni CFD realizzate con l'utilizzo del pacchetto *OpenFOAM* [6] che comprende una vasta libreria di applicazioni e codici open source per la soluzione di problemi di meccanica del continuo, basati sull'approccio agli elementi finiti. Si tratta di simulazioni RANS con una griglia a circa 20 milioni di celle, il modello di turbolenza usato è il $k-\omega SST$. Tutte le costanti ambientali sono da riferirsi all'atmosfera standard al livello del mare a 15°C .

Spero in un futuro di poter verificare il lavoro in pista. . .



Figura 1: La MVR-02, completamente progettata in CFD.