

---

# *La Matematica nella Società e nella Cultura*

RIVISTA DELL'UNIONE MATEMATICA ITALIANA

---

FLAVIO CIMOLIN

## **Analisi della ventilazione interna di un casco da motociclista**

*La Matematica nella Società e nella Cultura. Rivista dell'Unione Matematica Italiana, Serie 1, Vol. 4 (2011), n.1 (Fascicolo Tesi di Dottorato), p. 31-34.*

Unione Matematica Italiana

[<http://www.bdim.eu/item?id=RIUMI\\_2011\\_1\\_4\\_1\\_31\\_0>](http://www.bdim.eu/item?id=RIUMI_2011_1_4_1_31_0)

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

---

*Articolo digitalizzato nel quadro del programma  
bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica)  
SIMAI & UMI*

<http://www.bdim.eu/>

La Matematica nella Società e nella Cultura. Rivista dell'Unione Matematica Italiana, Unione Matematica Italiana, 2011.

## Analisi della ventilazione interna di un casco da motociclista

FLAVIO CIMOLIN

Questa tesi di dottorato industriale è stata sviluppata in collaborazione con AMET S.r.l. e AGV.

Negli ultimi anni le case produttrici di caschi hanno iniziato a interessarsi, oltre agli aspetti strutturali associati all'assorbimento degli urti, anche agli aspetti fluidodinamici degli stessi. La Figura 1 fornisce una panoramica di ciò che la simulazione numerica è in grado di offrire per migliorare le prestazioni aerodinamiche di questi importanti dispositivi di sicurezza, sia dal punto di vista delle prestazioni vere e proprie di "resistenza all'aria" sia per quanto concerne il comfort del motociclista. Scopo di questa tesi di dottorato industriale è la definizione di una metodologia di simulazione numerica per la ventilazione interna di un casco da motociclista in grado di cogliere gli effetti di asportazione del calore e del sudore prodotti dalla testa.



Fig. 1. – Differenti tipi di analisi che possono essere ottenute con la Fluidodinamica Computazionale (CFD).

Nonostante possa apparire secondario, il problema del comfort termico di un casco è di fondamentale importanza, soprattutto in quei Paesi in cui il clima estivo risulta particolarmente caldo e umido: la tentazione di non indossare il casco diventa quasi una scelta obbligata se quest'ultimo non è sufficientemente ventilato, con evidenti ricadute in termini di rischio di gravi traumi cranici per il motociclista.

Recenti studi hanno anche evidenziato come il disagio termico abbia effetti negativi sulle capacità cognitive del motociclista che indossa il casco, riducendo la sua attenzione in caso di pericolo [1].

Per queste ragioni è importante che ogni casco sia dotato di un efficiente sistema di ventilazione che sia in grado di asportare quanto più possibile il calore e il sudore prodotti da chi lo indossa. Per ottenere questo risultato vengono distribuite sulla calotta una serie di prese di ventilazione, collegate fra di loro da canali che, attraversando l'imbottitura di protezione, raggiungono il tessuto di comfort sul quale poggia direttamente la testa. Il flusso d'aria all'interno dei canali è guidato dal gradiente di pressione fra le prese anteriori e quelle di estrazione posteriori: ottimizzare la ventilazione significa garantire un sufficiente ricircolo di aria fresca e distribuirlo su una porzione più ampia possibile della testa del motociclista. Lo schema di Figura 2 chiarisce cosa accade in una sezione trasversale del casco che attraversa un canale di ventilazione.

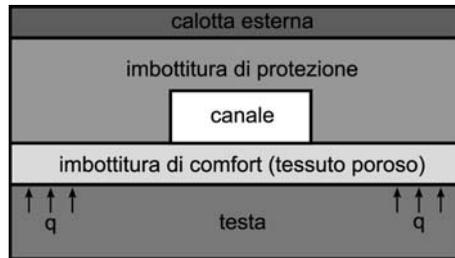


Fig. 2. – Schema di una sezione trasversale di un casco.

Lo strato esterno e l'imbottitura di protezione sono componenti solidi che in prima istanza possono essere considerati adiabatici dal punto di vista termico; al di sotto del canale invece vi è uno strato poroso all'interno del quale l'aria può filtrare, rimuovendo il calore e il sudore per diffusione e per convezione. Al momento per i progettisti vi è una assoluta carenza di linee guida di tipo fluidodinamico per il design dei canali e dell'intero sistema di ventilazione, che viene solitamente definito sulla base dell'esperienza e dell'intuizione.

Dal punto di vista fluidodinamico, il punto più delicato della simulazione consiste nel trattamento dell'accoppiamento fra un dominio fluido (canale) e un dominio poroso (tessuto di comfort). Tale situazione è stata testata su di un problema esempio 2D di un flusso di Poiseuille che scorre al di sopra di un letto poroso.

Nel dominio fluido il flusso può essere modellato dalle ben note equazioni di Navier-Stokes

$$(1) \quad \begin{cases} \rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t} + \mathbf{u}_f \cdot \nabla \mathbf{u}_f \right) - \mu \Delta \mathbf{u}_f + \nabla p_f = \mathbf{0} & \text{in } \Omega_f \\ \nabla \cdot \mathbf{u}_f = 0 & \text{in } \Omega_f, \end{cases}$$

mentre il modello più classico per la filtrazione in un mezzo poroso si ottiene per

mezzo dell'equazione di Darcy, che di fatto è la più semplice relazione lineare che lega la pressione alla velocità nel mezzo poroso:

$$(2) \quad \mathbf{u}_p = -\frac{k}{\mu} \nabla p_p.$$

Combinando l'equazione di Darcy con l'equazione di continuità si ottiene un'equazione differenziale ellittica per la pressione

$$(3) \quad -\nabla \cdot \left( \frac{k}{\mu} \nabla p_p \right) = 0,$$

dalla quale la velocità di filtrazione può essere ricavata per mezzo della (2).

Estensioni alla legge di Darcy sono date dall'equazione di Forchheimer o di Brinkmann-Forchheimer, con le quali si possono includere ad esempio gli effetti inerziali per mezzo di un termine quadratico. La soluzione numerica del problema accoppiato è complessa, ed è stata investigata seguendo le linee guida riportate in [3].

Per trattare il flusso su di un mezzo poroso è stato testato anche un approccio semplificato, comunemente utilizzato nei software commerciali per la fluidodinamica computazionale, che si basa su una formulazione "penalizzata" ottenuta aggiungendo alle equazioni di Navier-Stokes un termine lineare di "Darcy" e un termine non-lineare di "Forchheimer": (si veda ad esempio [2]):

$$(4) \quad \rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) - \mu \Delta \mathbf{u} + \nabla p + \frac{\mu}{k} \mathbf{u} + \frac{\rho C_F}{\sqrt{k}} |\mathbf{u}| \mathbf{u} = \mathbf{0},$$

con coefficienti discontinui da una parte e dall'altra dell'interfaccia fra il fluido e il mezzo poroso. Di fatto questo permette di risolvere la stessa equazione in entrambi i domini, attivando i termini di "resistenza" soltanto in quello poroso, e di fatto rendendo decisamente più semplice l'implementazione del calcolo.

Per mezzo del software ad elementi finiti freeFEM++ è stato effettuato un confronto fra il metodo di accoppiamento Navier-Stokes/Forchheimer e l'approccio di penalizzazione, mostrando che nonostante il primo sia indubbiamente più accurato, anche il secondo riesce a cogliere bene gli aspetti qualitativi del problema di flusso su mezzo poroso [4].

La seconda parte del lavoro concerne lo sviluppo e l'analisi di un modello termodinamico in grado di descrivere il fenomeno dell'evaporazione del sudore [5]. Esso si basa sulla definizione delle tre seguenti quantità scalari:

- *Temperatura (T)*, definita nel dominio fluido e in quello poroso,
- *Umidità assoluta (h)*, intesa come densità di vapore acqueo diffuso nell'aria, definita nel dominio fluido e in quello poroso,
- *Sudore (w)*, definito come densità di acqua liquida contenuta nelle fibre del tessuto poroso, dunque limitato a tale dominio.

L'evoluzione delle tre quantità, da risolversi a valle del problema stazionario fluidodinamico, può essere descritta dalle seguenti tre equazioni di trasporto-dif-

fusione-reazione:

$$(5) \quad \begin{cases} C \frac{\partial T}{\partial t} + C_f \mathbf{u} \cdot \nabla T = \lambda \Delta T - l_e s \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla h = D_h \Delta h + s \\ \frac{\partial w}{\partial t} = D_w \Delta w - s, \end{cases}$$

in cui il tasso di evaporazione è calcolato per mezzo della formula di Hertz-Knudsen (che a sua volta dipende da due quantità ben note in fisica tecnica, rispettivamente la pressione di vapore  $p_v$  e la pressione di vapore a saturazione  $p_{sat}$ ):

$$(6) \quad s = E \sqrt{\frac{M_v}{2\pi RT}} (p_{sat} - p_v) \quad (w > 0),$$

$$(7) \quad p_v = \frac{hRT}{M_v} \quad p_{sat} = 611.2 \exp\left(17.62 \frac{T - 273.15}{T - 30.03}\right).$$

Il modello di sudorazione delineato dalle equazioni (5) accoppiate per mezzo del termine di evaporazione (6) è stato studiato e testato su una configurazione 2D. L'interazione fra le tre variabili scalari consente di calcolare il flusso netto asportato dalla testa e di comprendere le zone di accumulo di sudore nel tessuto sovrastante. Allo stesso modo diventa quindi possibile mostrare come variazioni della geometria o della forma dei canali possano influenzare le performance del sistema di ventilazione, fornendo di fatto ai progettisti tutta una serie di linee guida concretamente applicabili.

Una delle peculiarità del modello è la sua potenziale implementabilità su qualsiasi codice commerciale 3D per la fluidodinamica computazionale, il che consente una diretta applicabilità industriale della metodologia sviluppata, obiettivo primario di una tesi di dottorato orientata ad un'applicazione industriale.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] BOGERD C.P., *Physiological and cognitive effects of wearing a full-face motorcycle helmet*, Ph.D. Thesis, ETH Zurich, Switzerland (2009).
- [2] BRUNEAU C.H., MORTAZAVI I., *Numerical modelling and passive flow control using porous media*, Computers and Fluids, **37** (2008), 488-498.
- [3] DISCACCIATI M., *Domain decomposition methods for the coupling of surface and groundwater flows*, Ph.D. Thesis, EPFL Lausanne, Switzerland (2004),
- [4] CIMOLIN F. e DISCACCIATI M., *Navier-Stokes/Forchheimer models for filtration through porous media*, Tech. Rep. 5, Dipartimento di Matematica, Politecnico di Torino (2010).
- [5] CANUTO C. e CIMOLIN F., *A sweating model for the internal ventilation of a motorcycle helmet*, Computers and Fluids, **43** (2011), 29-37.

Dipartimento di Matematica, Politecnico di Torino  
e-mail: flavio.cimolin@polito.it  
Dottorato in Matematica per le Scienze dell'Ingegneria  
con sede presso il Politecnico di Torino - Ciclo XXII  
Direttore di ricerca: Prof. Claudio Canuto, Politecnico di Torino