

# Confronto e validazione di metodiche innovative per l'analisi fluidodinamica nasale – <u>FASE 1</u>

### Presentazione progetto

Il Dipartimento di Scienze della Salute (DISS) della Università degli Studi di Milano ha avviato nel 2017, grazie al sostegno della Fondazione Serpero, il progetto di ricerca: **"Confronto e validazione di metodiche innovative per l'analisi fluidodinamica nasale**" che prevede la realizzazione di un sistema per la previsione, ad alta fedeltà, del campo di fluidodinamica all'interno delle cavità nasali durante il ciclo respiratorio.

La ricerca permette di affrontare, in modo sistematico e innovativo, le difficoltà respiratorie nasali: problema clinico che coinvolge milioni di persone in Italia e ne determina un significativo peggioramento di qualità della vita, difficoltà cognitive, decadimento della qualità del sonno e diminuzione della produttività scolastico/lavorativa.

### FASE 1

Durante la prima fase del progetto è stato portato a termine il processo di standardizzazione dell'acquisizione delle immagini TC, indispensabile per la raccolta di grosse casistiche in modo sistematico. Le TC acquisite sia presso l'Ospedale San Paolo che presso l'Istituto Neurologico Besta (acquisizione autorizzata all'interno di un altro progetto di ricerca con approvazione del Comitato Etico locale) sono adesso trasferibili senza supporto fisico e archiviabili in modo non solo numericamente, ma anche eticamente corretto grazie all'utilizzo di un database di anonimizzazione dei pazienti.

È stato inoltre acquisito un rinomanometro a quattro fasi. Lo strumento è necessario per il confronto dei dati di simulazione numerica nella seconda fase del progetto, ma viene già utilizzato in modo sperimentale sui pazienti per acquisire sufficiente rapidità e precisione nella raccolta dei dati in vivo sui flussi respiratori nasali. Lo strumento acquisito (4Rhino, prodotto da Rhinolab) rappresenta il gold standard attualmente in commercio per quanto riguarda questo tipo di strumentazione.

Nell'ambito, invece, delle simulazioni CFD, l'attività di ricerca svolta ha riguardato una approfondita analisi numerica del campo di moto all'interno della cavità nasale attraverso l'utilizzo del software opensource OpenFOAM ed in riferimento all'approccio LES (Large Eddy Simulation), facendo uso del modello di Smagorinsky.

Numerosi studi CFD sono stati proposti in letteratura durante gli ultimi anni per l'analisi del flusso nelle cavità nasali, molti di questi effettuati ipotizzando il flusso laminare o utilizzando il tradizionale approccio RANS (Reynolds Averaged Navier -

## Fondazione Serpero

Stokes) per la modellazione della turbolenza, ma non molte applicazioni sono disponibili in letteratura riguardo l'impiego di modelli LES, sebbene l'approccio LES sia largamente utilizzato in numerosi ambiti di ricerca accademica ed industriale, per le sue promettenti potenzialità in termini di accuratezza nella predizione di complessi flussi turbolenti, rispetto al tradizionale approccio RANS. Tuttavia, l'approccio LES si caratterizza come un metodo computazionalmente più oneroso rispetto al tradizionale RANS. Inoltre, le applicazioni LES disponibili in letteratura nell'ambito della fluidodinamica nasale sono spesso limitate a casi che fanno uso di domini computazionali semplificati o idealizzati.

L'attività svolta ha riguardato un approfondito studio delle prestazioni della tecnica LES, utilizzando un dominio computazionale completo e realistico, ottenuto a partire dalla tomografia computerizzata (CT) del paziente. La geometria finale include, infatti, i dettagli anatomici dei seni mascellari e frontali, spesso ignorati nei modelli presenti in letteratura, nonostante la loro importanza in relazione all'insorgenza di possibili fenomeni infiammatori. La presente ricerca è basata su una metodologia sviluppata durante gli ultimi anni [1-5], che fa uso esclusivamente di software open-source. La procedura prevede l'utilizzo del software 3D-Slicer [6] per la manipolazione delle immagini relative alla CT, mentre per la simulazione numerica e per la fase di postprocessing prevede l'utilizzo dei software OpenFOAM [7] e ParaView [8].



**Figura 1:** CT in vista sagittale (sinistra), e sua ricostruzione (destra) ottenuta rimuovendo la connessione tra bocca ed epiglottide. In nero sono evidenziati i volumi d'aria.

In **Figura 1** è riportato un esempio di immagine CT in sezione sagittale, e la sua relativa ricostruzione, ottenuta mediante l'imposizione di un valore di soglia di HU (Hounsfield Unit) pari a -218. Nel processo di ricostruzione è stato rimosso digitalmente il collegamento tra bocca ed epiglottide. A partire dalla ricostruzione delle immagini relative alla CT è stato possibile sviluppare un modello STL (Stereo Lithography



interface) sulla base del quale realizzare le griglie di calcolo per effettuare le simulazioni numeriche.

L'attività svolta durante la fase 1 è stata prevalentemente focalizzata sul miglioramento dell'efficienza della procedura computazionale.

La procedura è stata ottimizzata limitando l'area esterna alla cavità nasale attraverso un volume sferico posizionato attorno alle narici del paziente, in modo da ridurre notevolmente il volume d'aria esterna da simulare, che precedentemente veniva definito mediante un volume esaedrico attorno a tutta la testa del paziente [1-5]. La dimensione e la posizione della sfera è stata accuratamente valutata al fine di evitare problemi di stabilità numerica. L'inserimento di tale sfera in luogo del precedente blocco esaedrico ha consentito di ottenere una notevole riduzione dei tempi di calcolo (più del 50%). In **Figura 2** è possibile osservare il modello STL del dominio computazionale finale.



Figura 2: Modello STL del dominio computazionale, composto dai volumi interni e dal volume sferico esterno.

Le simulazioni LES sono state effettuate mediante il modello di Smagorinsky [9], ed usando il solutore pimpleFoam, basato su un approccio misto PIMPLE-PISO [10]. Gli studi sono stati concentrati prevalentemente sui fenomeni di inspirazione stazionaria. Le analisi numeriche sono state effettuate su griglie di calcolo a diversi gradi di raffinamento, dai 2 fino a 25 milioni di elementi, e per regimi respiratori corrispondenti a portate di Q=13, 20 L/min. Al fine di riprodurre accuratamente le caratteristiche del campo di moto sono stati usati schemi numerici accurati al secondo ordine per tutti gli operatori delle equazioni differenziali di conservazione.

In **Figura 3** sono riportate due viste del dominio computazionale, con evidenziate le posizioni di alcune sezioni, utilizzate per la visualizzazione dei risultati numerici.



Le sezioni proposte sono 9, da 1 ad 8 si tratta si sezioni coronali, la sezione 9 è invece una sezione sagittale.

Nelle **Figure 4-7** è possibile osservare alcuni risultati numerici ottenuti dopo 0.6 sec di inspirazione stazionaria, su una griglia di calcolo da 25 milioni di elementi, per una portata di 20 L/min.

Nelle **Figure 4** e **5** è riportato l'andamento del modulo della velocità media e della pressione media per unità di densità in prossimità delle sezioni coronali 1-8, rispettivamente. Mentre nella Figura 6 è possibile osservare il comportamento del modulo della velocità media e della pressione media per unità di densità in prossimità della sezione sagittale.

In **Figura 7** è invece proposta una vista prospettica del dominio computazionale che mette in evidenza, attraverso la visualizzazione di alcune linee di corrente l'andamento del flusso nella parte superiore della cavità nasale. Le linee di corrente sono colorate secondo il modulo della velocità media.



**Figura 3**: Posizioni delle sezioni coronali, numerate dal 1 ad 8, e della sezione sagittale 9, utilizzate per la visualizzazione dei risultati numerici.





**Figura 4**: Modulo della velocità media, dopo 0.6 sec di inspirazione stazionaria, nelle sezioni coronali da 1 a 4 (sezioni da 1 a 4, prima riga da sinistra verso destra, sezioni da 5 ad 8, seconda riga da sinistra verso destra), in riferimento ad una griglia di calcolo di 25 milioni di elementi con una portata di 20 l/min.



**Figura 5**: Andamento della pressione media per unità di densità, dopo 0.6 sec di inspirazione stazionaria, nelle sezioni coronali da 1 ad 8 (sezioni da 1 a 4, prima riga da sinistra verso destra, sezioni da 5 ad 8, seconda riga da sinistra verso destra), in riferimento ad una griglia di calcolo di 25 milioni di elementi con una portata di 20 l/min.

### Fondazione Serpero



**Figura 6**: Pressione media per unità di densità (sinistra) e modulo della velocità media (destra), dopo 0.6 sec di inspirazione stazionaria, nella sezione sagittale, in riferimento ad una griglia di calcolo di 25 milioni di elementi con una portata di 20 l/min.

Congiuntamente all'ottimizzazione della procedura computazionale ed all'analisi del campo di moto, un braccio collaterale dell'attività di ricerca effettuata nella prima fase del progetto ha riguardato l'analisi della deposizione di particelle di acqua all'interno della cavità nasale. Tale attività è stata realizzata mediante il finanziamento della fondazione FORST (FOndazione per la Ricerca Scientifica Termale) nell'ambito del progetto ATHEWADE (Assessment of the THermal WAter DElivery via computational fluid dynamics), le attività finanziate dalle due fondazioni (Serpero e FORST) si sono per un periodo sovrapposte ed integrate sinergicamente.

In **Figura 8** è possibile osservare il pattern di deposizione di particelle di acqua di diametro 5  $\mu$ m nella parte superiore della cavità nasale, dopo 0.6 sec di inspirazione stazionaria, ottenuto su una griglia di calcolo da 25 milioni di elementi, in riferimento ad una portata da 20 L/min. Le particelle depositate sono evidenziate in blu, mentre la mucosa è in trasparenza.





**Figura 7**: Linee di corrente nella parte superiore della cavità nasale, colorate secondo il modulo della velocità, ottenute dopo 0.6 sec di inspirazione stazionaria, in riferimento ad una griglia di calcolo di 25 milioni di elementi con una portata di 20 l/min.



**Figura 8**: Pattern di deposizione di particelle di acqua di diametro 5 µm all'interno della cavità nasale, in vista sagittale (a sinistra) ed in vista coronale (destra), ottenuto dopo 0.6 sec di inspirazione stazionaria, in riferimento ad una griglia di calcolo di 25 milioni di elementi con una portata di 20 l/min. Le particelle depositate sono evidenziate in blu, la mucosa è in trasparenza.

Nella **Figura 9**, invece, è proposto uno studio quantitativo della deposizione delle particelle di acqua, per due differenti diametri dp= $5,10 \mu m$ . La superficie della parte superiore del dominio computazionale è stata suddivisa in fettine (slabs) e per ogni slabs è stata valutata la densità di particelle depositate Dx come rapporto tra il numero

# Fondazione Serpero

di particelle depositate sulla singola slab, e l'area della slabs stessa. Gli andamenti della densità Dx slabs per slabs sono proposti nella parte destra della figura, in riferimento a portate Q di 13L/min (grafico in alto a destra) e 20L/min (grafico in basso a destra).



**Figura 9**: Suddivisione della superficie del dominio computazionale in slabs (sinistra), per semplicità sono riportate solo le slab dispari. Andamento della densità di deposizione di particelle Dx nelle singole slab, per particelle di diametro dp 5 e 10  $\mu$ m, ottenute dopo 0.6 sec di inspirazione stazionaria, in riferimento ad una griglia di calcolo di 25 milioni di elementi, per una portata di 13 l/min (in alto a destra) e 20 l/min (in basso a destra).

\*\*\*\*\*



### Riferimenti bibliografici

[1] G. Lamberti et al. RANS/LES/DNS simulations of the airflow in nasal cavities. Poster Am. Physial Society, November 22-24, Boston (USA), 2015.

[2] F. Messina et al. Fluidodinamica nasale: risultati preliminari. Congr. Naz. della Società Italiana di Otorinolaringologia e Chirurgia Cervico-Facciale, Roma (I), May 28-31, 2013.

[3] C. Pesci. OpenNOSE: an open-source procedure for the simulation of nasal aerodynamics. Master's thesis, Dep. of Aerospace science and Technology, Politecnico di Milano, 2013.

[4] C. Pipolo et al. Simulation of the nasal airflow with computational fluid dynamics in nasal breathing difficulties: definition of parameters. Congr. Naz. Soc. Ital. Otorinol., Roma, Italy, May 27-30, 2015.

[5] M. Quadrio et al. Effect of CT resolution and radiodensity threshold on the CFD evaluation of nasal airflow. Med Biol Eng Comput, 54:411–419, 2016.

[6] A. Fedorov et al. 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network. J. Magn. Reson. Imaging, 30(9):22770690, 2012.

[7] H.G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, and C. Fureby. A Tensorial Approach to Computational Continuum Mechanics using Object Oriented Techniques, Comput. Phys., 12(6):620–631, 1998.

[8] J. Ahrens, B. Geveci, C. Law, C. Hansen, and C. Johnson. paraview: An end-user tool for largedata visualization. The visualization handbook, 717, 2005.

[9] J. Smagorinsky. General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment. Mon. Weather Rev.,91(3):99–164, 1963.

[10] J.H. Ferzinger and M. Peric. Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer, Berlin, 2013.

### Pubblicazioni

- Covello V, Pipolo C, Saibene AM, Felisati G, Quadrio M. Numerical simulation of thermal water delivery in the human nasal cavity. Comput Biol Med. 2018 Sep 1;100:62-73. doi: 10.1016/j.compbiomed.2018.06.029. Epub 2018 Jun 28.
- Buijs EFM, Covello V, Pipolo C, Saibene AM, Felisati G, Quadrio M. Thermal water delivery in the nose: experimental results describing droplet deposition through computational fluid dynamics. Acta Otorhinolaryngol Ital. 2019 Dec;39(6):396-403. doi: 10.14639/0392-100X-2250. Epub 2019 Jan 31.



### Congressi

- L. Castellani, V. Covello, C. Pipolo, A.M. Saibene, G. Felisati, M. Quadrio. Computational fluid dynamics simulation of nasal airflow with LES (Large Eddy Simulation) model, ERS (European rhinologic society) 2018, 27th congress of the European rhinologic society, Queen Elizabeth II conference centre, London, 22-26 April 2018 [Poster].
- C. Pipolo, M. Quadrio, A.M. Saibene, C. Rosso, L. Castellani, G. Felisati. Simulation of the nasal airflow with Computational Fluiddynamics in Nasal Breathing Difficulties: the LES approach. 21<sup>st</sup> IFOS World Congress, Paris, 24-28 June 2017 [Poster].
- V. Covello, C. Pipolo, G. Felisati, M. Quadrio. Numerical simulation of human nasal cavity flow with particles, CINECA Workshop on HPC Methods for Engineering Applications, Milano, 19-21 June 2017 [Invited speaker]