

SVILUPPO DI UN MODELLO CFD PER L'OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DI PULIZIA DI FILTRI A MANICA MEDIANTE GETTI AD ARIA COMPRESSA

Lorenzo Burgio¹, Gianandrea Messa¹, Diego Scaccabarozzi², Chiara Martina², Corrado Maggi³ & Luigi Montanelli³

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano

(2) Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano

(3) Clean Air Europe S.r.l., Bulciago (LC)

ASPETTI CHIAVE

- Sviluppo di modello CFD per la simulazione del processo di pulitura di filtri a manica con getto d'aria compressa
- Validazione del modello sulla base di scenari semplificati analizzati sperimentalmente in letteratura
- Identificazione del parametro chiave per la calibrazione del modello

1 ASPETTI INGEGNERISTICI DEL PROCESSO E MOTIVAZIONE DELLO STUDIO

L'utilizzo di getti ad aria compressa è una delle tecniche più comuni per la pulizia dei filtri a manica impiegati nei cementifici e in molti processi industriali. Tale metodologia consiste nell'iniettare nel filtro un getto d'aria compressa in direzione controcorrente rispetto al processo di produzione, sfruttando l'azione meccanica di scuotimento prodotta dall'onda di pressione che si propaga fino al fondo della manica al fine di rimuovere la polvere adesa all'esterno del tessuto. La tipica configurazione dell'impianto di pulitura filtri è schematizzata in Fig. 1(a): l'apertura dell'elettrovalvola (2) fa sì che l'aria compressa venga rilasciata dal serbatoio in pressione (1) e attraverso il tubo di erogazione (3), fuoriuscendo lateralmente dagli ugelli (4) posizionati sopra i filtri a manica (5) in forma di getto.

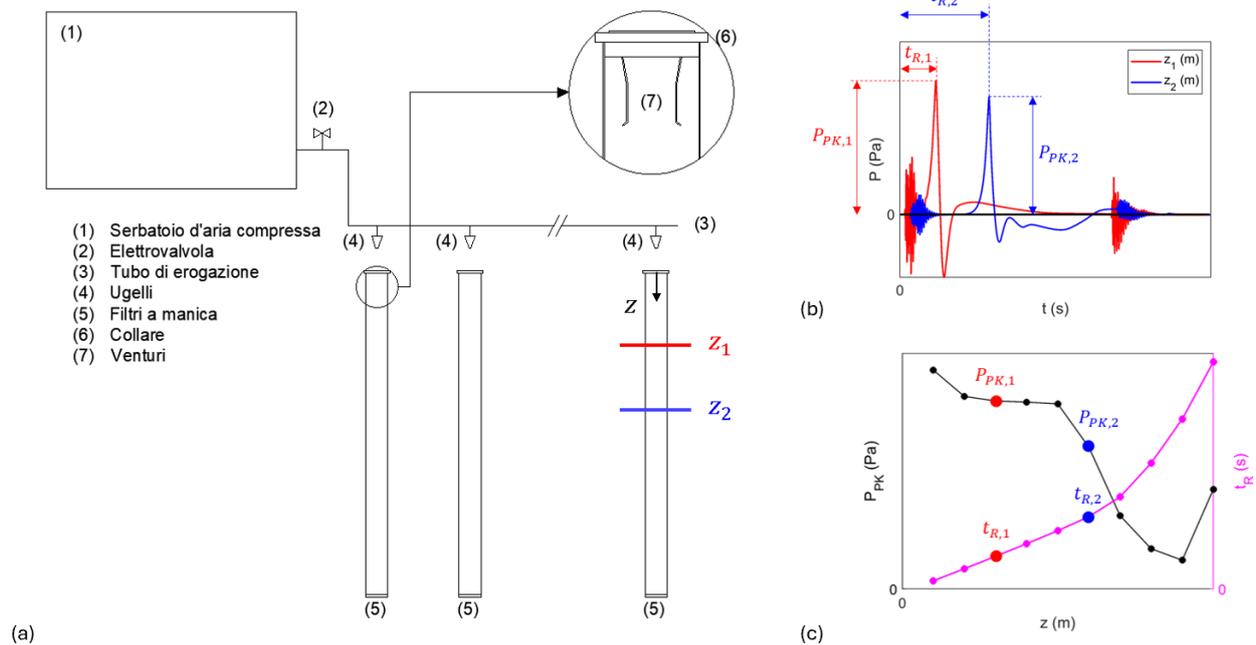


Figura 1. (a) Schematizzazione del funzionamento di un impianto di pulitura di filtri a manica mediante getto ad aria compressa; (b) Evoluzione temporale della pressione in due sezioni z_1 e z_2 lungo la manica; (c) Distribuzione delle pressioni di picco, P_{PK} , e dei tempi di arrivo, t_R , lungo la manica.

Studi di letteratura, tra cui Liu & Shen (2019), indicano la possibilità di correlare l'efficienza di pulizia del filtro a parametri fluidodinamici caratterizzanti l'onda di pressione che attraversa la manica, ovvero la distribuzione delle pressioni di picco, P_{PK} , e dei relativi tempi di arrivo, t_R , lungo la manica stessa. Ciò è esemplificato nelle Fig. 1(b) e 1(c), dove si evince chiaramente il significato delle variabili P_{PK} e t_R . Una maggiore

efficienza di pulizia può essere ottenuta aumentando P_{PK} ovvero riducendo t_R . L'evidenza sperimentale, peraltro confermata dalle presenti simulazioni numeriche, mostra che l'installazione di un venturi sulla sommità del filtro (componente (7) in Fig. 1(a)) produce sia un aumento della quantità di aria in ingresso alla manica sia una maggiore forza dell'onda di pressione, che si traduce in P_{PK} maggiori e t_R minori. Tuttavia, sebbene questa sia una soluzione tecnologica ormai ben consolidata, l'interpretazione fluidodinamica del ruolo del venturi è ancora oggetto di discussione in letteratura (Andersen *et al.* 2016).

Nell'ottica di rendere l'impianto di depolverazione più sostenibile, uno dei molteplici aspetti da tenere in considerazione è la riduzione del consumo energetico del processo di pulizia dei filtri. L'obiettivo può essere considerato da due punti di vista. Da un lato, aumentare l'efficienza di pulizia a parità di pressione dell'aria nel serbatoio, P_0 , e della durata dello sparo, t_0 . Dall'altro lato, ridurre P_0 e t_0 mantenendo inalterata l'efficienza di pulizia. In entrambi i casi, ciò richiede di forzare a proprio vantaggio la relazione tra la P_0 , t_0 e le distribuzioni di P_{PK} e t_R . Nell'ambito di un progetto che ha visto coinvolti Clean Air Europe S.r.l. e il Politecnico di Milano, l'efficientamento del sistema di pulizia è stato realizzato mediante un design innovativo del venturi e, come strumento di lavoro principale, si è utilizzata fluidodinamica computazionale (Computational Fluid Dynamics, CFD). La principale sfida è stata costruire un modello CFD adeguato per effettuare un confronto tra diversi scenari progettuali, in modo tale che, partendo da risultati comparativi, Clean Air Europe S.r.l. potesse definire le direzioni da seguire nella progettazione del nuovo venturi. Un obiettivo ancora più ambizioso è quello di sviluppare un modello CFD che consenta di predire il comportamento fluidodinamico di ciascuno scenario in termini assoluti. Un simile strumento potrebbe non essere strettamente necessario al fine della progettazione del nuovo dispositivo, per cui, almeno in una fase preliminare, potrebbe essere sufficiente sapere se le prestazioni fluidodinamiche del venturi X siano migliori o peggiori di quelle del venturi Y in una serie di scenari operativi. Viceversa, disporre di un modello CFD accurato in termini assoluti sarebbe utile qualora, una volta definito il nuovo venturi, si volesse ottimizzare la gestione del sistema di pulizia del depolveratore, definendo, ad esempio, le pressioni dell'aria nel serbatoio, le durate degli spari e la loro frequenza. Tuttavia, la sfida è ardua, in quanto è ragionevole attendersi che l'effetto dei vari parametri di incertezza del modello – che sono in numero elevato, considerate le semplificazioni imposte dalla complessità dei processi fisici – sia molto più significativa in termini assoluti che in termini comparativi. La presente memoria illustra brevemente il lavoro effettuato dagli autori in questa direzione.

2 METODOLOGIA DI INDAGINE E ALCUNI RISULTATI SIGNIFICATIVI

Il modello CFD sviluppato è di tipo transitorio e risolve le FANS (Favre Averaged Navier-Stokes) per flussi comprimibili, accoppiate con il modello di turbolenza $k-\epsilon$ standard con un fattore correttivo che tiene conto della comprimibilità del fluido. La ragione di questa scelta è che, per i valori di P_0 tipici dell'applicazione considerata (3-7 barG), il flusso in uscita dall'ugello è supersonico ($M > 1$, dove M è il numero di Mach), ritornando subsonico ($M < 1$) e incomprimibile ($M < 0.3$) all'interno della manica. Siccome le condizioni del flusso in uscita dall'ugello condizionano significativamente le distribuzioni di P_{PK} e t_R , prima di procedere con la simulazione del sistema di pulizia si è deciso di affrontare un caso benchmark più semplice, ovvero sia il flusso comprimibile in un ugello convergente-divergente.

2.1 Simulazione del flusso comprimibile in ugelli convergenti-divergenti

Per la validazione del modello, si è fatto riferimento agli esperimenti di Back *et al.* (1965), in cui sono state misurate le distribuzioni della pressione statica lungo la parete, P_w , di due differenti ugelli convergenti-divergenti al variare della pressione dell'aria nel serbatoio, P_0 , con contropressione costante e pari al valore atmosferico. A titolo di esempio, viene mostrato in Fig. 2 il confronto con i dati sperimentali per il secondo dei due ugelli testati, le cui dimensioni sono riportate nello sketch (a). In particolare, viene fatto riferimento al profilo della pressione in parete normalizzata, P_w/P_0 , per due valori di P_0 che corrispondono a due comportamenti fluidodinamici molto differenti. In Fig. 2(b), il valore elevato di P_0 (13.72 bar) fa sì che il flusso si mantenga supersonico lungo tutto il tratto divergente, passando da $M = 1$ nella sezione contratta e raggiungendo un valore del numero di Mach intorno a 3 nella sezione di uscita. Viceversa, in Fig. 2(c) la pressione del serbatoio è più bassa (3.10 bar) e produce un'onda di shock nel tratto divergente del serbatoio, evidente dal brusco incremento di pressione nella figura e accompagnata da una repentina decrescita del numero di Mach

che, dopo aver raggiunto il valore unitario nella sezione contratta, cresce ulteriormente fino a circa 2.4 e quindi ritorna bruscamente a valori prossimi a 0.1. Il modello CFD è in grado di riprodurre con sufficiente accuratezza il flusso d'aria nell'ugello convergente-divergente in entrambe le condizioni. Analizzando i risultati con maggiore dettaglio, si osserva che la simulazione numerica sovrastima la posizione dell'onda di shock; tuttavia, a differenza di quella per $P_0=13.72$ bar, la soluzione per $P_0=3.10$ bar ha un carattere oscillatorio, ben rappresentato dalle barre verticali che rappresentano la variabilità temporale dei valori di P_w/P_0 . Lo studio preliminare sulla base degli esperimenti di Back *et al.* (1965) ha, da un lato, dimostrato l'affidabilità del modello fluidodinamico basato sulle FANS e, dall'altro, ha consentito di ottenere importanti informazioni in merito all'effetto della geometria dell'ugello sulle caratteristiche fluidodinamiche del getto. A questo punto, si è proceduto con la simulazione della propagazione dell'onda in un filtro a manica.

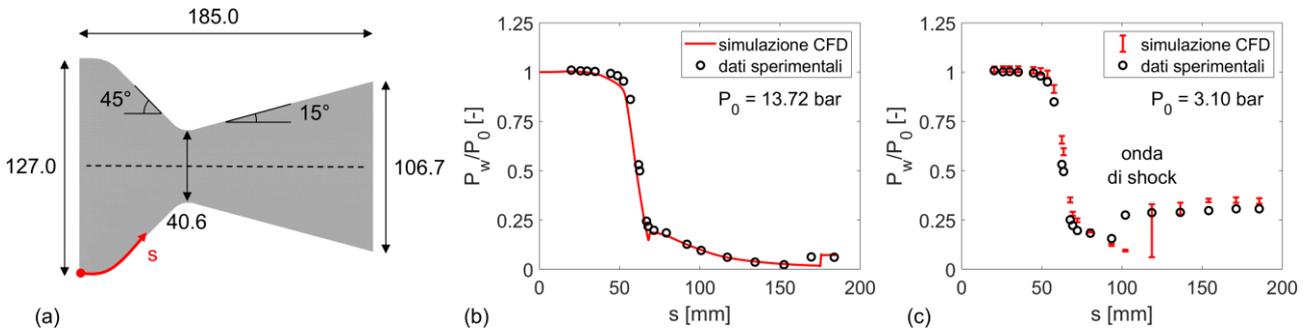


Figura 2. (a) Geometria del secondo ugello testato sperimentalmente da Back *et al.* (1965). (b,c) Profilo della pressione statica lungo la parete, normalizzata per la pressione del serbatoio P_0 , per due valori di P_0 : confronto tra i dati sperimentali e i risultati CFD.

2.2 Simulazione della propagazione dell'onda di pressione in un filtro a manica

Come secondo caso di simulazione, si è fatto riferimento agli esperimenti di Liu & Shen (2019) e, in particolare, ad uno dei test in cui una singola manica di diametro 13 cm e lunghezza 8 m, realizzata in tessuto poliestere avente spessore 1.8 mm, è esposta ad un getto d'aria di durata 0.1 s e pressione del serbatoio 5 bar. Gli autori hanno misurato le pressioni di picco, P_{PK} , e i relativi tempi di arrivo, t_R , tramite sensori posizionati ogni metro lungo la manica. In cima alla manica è installato un venturi le cui dimensioni geometriche sono riportate nell'articolo. Viceversa, non sono forniti dettagli in merito alla geometria dell'ugello utilizzato per produrre il getto, di cui è soltanto noto il diametro di uscita pari a 18 mm. La mancanza di tali informazioni, ovviamente, contribuisce ad aumentare l'incertezza del modello. Sulla base del caso studio descritto nel paragrafo 2.1, si è deciso di importare, nel modello CFD, il profilo del tratto convergente dell'ugello testato da Back *et al.* (1965) e mostrato in Fig. 2(a), dopo averlo opportunamente riscaldato.

La principale criticità di queste simulazioni risiede nell'elevato onere computazionale, che obbliga forzatamente ad fare delle semplificazioni che possono ridurre l'accuratezza del modello. Ad esempio, il sistema è stato modellato come 2D assialsimmetrico, non includendo dunque l'effetto della gabbia metallica su cui è avvolto il tessuto. Inoltre, la vibrazione della manica indotta dal passaggio dell'onda di pressione non è stata risolta esplicitamente ma, come avviene nei pochi studi simili riportati in letteratura, come Andersen *et al.* (2016), la manica è stata modellata come una superficie bidimensionale fissa in cui il gradiente trasversale di pressione è legato alla velocità di filtrazione mediante la legge di Darcy per flusso in mezzi porosi, che dipende da un coefficiente di permeabilità α [m^2]. Pur con queste semplificazioni, il tempo di calcolo necessario per simulare 1 s del processo è dell'ordine di 4-5 giorni utilizzando un desktop con 6 CPUs, principalmente a causa del ridotto del passo temporale di integrazione, dell'ordine di 10^{-6} - 10^{-5} s.

La soluzione del modello CFD appare consistente con la fisica del fenomeno. Come si evince dalle Fig. 3(a) e 3(b), il modello coglie correttamente l'attenuazione dell'onda di pressione e il suo progressivo rallentamento, e si nota chiaramente che l'onda di pressione è accompagnata da un'onda di velocità. I picchi di pressione, P_{PK} , e i relativi tempi di arrivo, t_R , sono coerenti con le misure sperimentali. E' infine interessante notare come i valori di P_{PK} e t_R siano fortemente dipendenti dalla scelta del coefficiente di permeabilità della legge di Darcy. Malgrado α abbia un preciso significato fisico, ed esistano dei protocolli per la determinazione sperimentale di tale parametro per vari tessuti (come la normativa EN ISO 9237), in pratica, nella complessità del modello CFD, α è trattato come un coefficiente di taratura. L'intervallo di valori di α considerato nei

precedenti studi di letteratura è tra 10^{-13} m^2 e 10^{-7} m^2 . Le Fig. 3(c) e 3(d) indicano chiaramente che, al diminuire di α , il profilo delle P_{PK} tende a modificarsi e i valori di P_{PK} tendono ad aumentare, mentre i tempi di arrivo t_R tendano a diminuire. D'altro canto, il raggiungimento della convergenza numerica è più complesso per α ridotti. Nel caso specifico, il valore $\alpha=9 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, che si trova nell'ampio intervallo di letteratura, produce previsioni numeriche in buon accordo con i dati sperimentali.

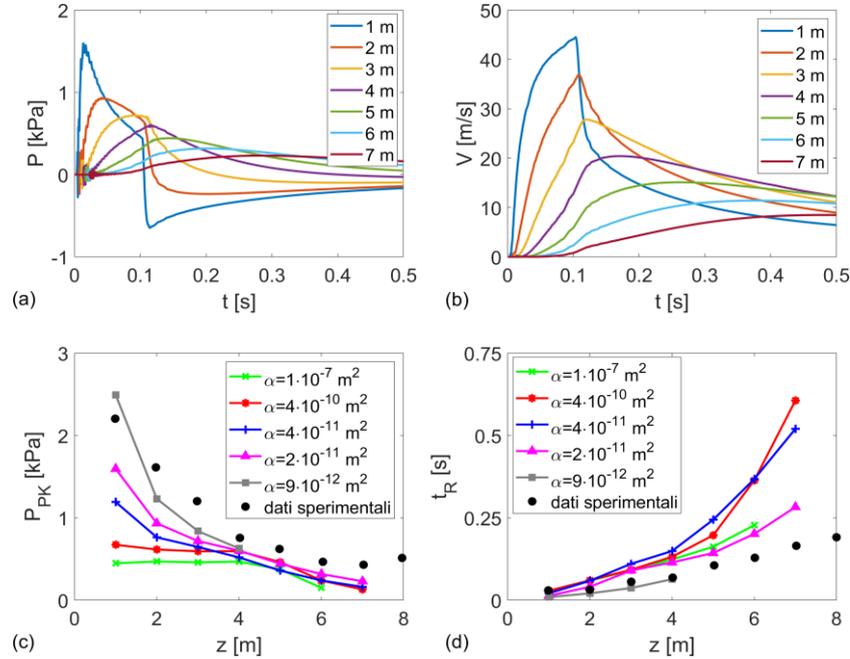


Figura 3. Andamento temporale della pressione (a) e del modulo della velocità (b) in diverse posizioni lungo la manica ottenute numericamente con $\alpha=2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$. (a) Picchi di pressione, P_{PK} , e (b) tempi di arrivo dei picchi di pressione, t_R , lungo la manica ottenuti numericamente con diversi valori di α e misurati sperimentalmente da Liu & Shen (2019).

3 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E SVILUPPI FUTURI

Lo studio ha consentito di stabilire che, pur con tutte le semplificazioni dettate dall'elevato onere computazionale, il modello CFD costruito basato sulle FANS consente di predire in maniera accurata le variabili fluidodinamiche connesse all'efficienza di pulizia dei filtri a manica, ovvero le pressioni di picco, P_{PK} , e i relativi tempi di arrivo, t_R . I valori di P_{PK} e t_R sono però dipendenti dalla scelta del coefficiente di permeabilità usato per descrivere il comportamento della manica in tessuto, α , che al momento è trattato come un coefficiente di taratura. Si prevede di continuare la ricerca muovendosi in due direzioni. Da un lato, si intende affinare il modello CFD, stabilendo in maniera più approfondita l'effetto dei vari parametri di incertezza. Dall'altro, si vuole calibrare il modello sulla base di test sperimentali precedentemente effettuati sul venturi innovativo, così da poterlo proporre come strumento ingegneristico per la gestione ottimizzata del sistema di pulizia nel complesso.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Andersen, B., Nielsen, N., & Walther, J. Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters, *Powder Technology*, 2016, 291, 284–298.
- Back, L.H., Gier, H.L., & Massier, P.F. Comparison of measured and predicted flows through conical supersonic nozzles, with emphasis on the transonic region, *AIAA Journal* 1965, 3(9), 1606-1614.
- EN ISO 9237: Textiles. Determination of permeability of fabrics to air, International Organization for Standardization, 1995.
- Liu, X. & Shen, H. Effect of Venturi Structures on the Cleaning Performance of a Pulse Jet Baghouse, *Applied Sciences*, 2019, 9(18), 3687.
- Rudd, J.L., Yang, J.N., Manning, S.D. & Garver, W.R. Durability design requirements and analysis for metallic airframes, *Design of Fatigue and Fracture Resistant Structures*, ed. P.R. Abelkis & G.M. Hudson, ASTM STP 761, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, 1982, pp. 133-151.