

Caratterizzazione Idrodinamica di Spray Simili mediante Anemometria Phase Doppler (PDA).

Angelo ALGIERI
Università della Calabria

ABSTRACT

Le caratteristiche idrodinamiche di differenti water sprays sono state valutate adoperando la tecnica di Anemometria Phase Doppler (PDA). Questa consente di ottenere una dettagliata caratterizzazione fluidodinamica sia della fase discreta, in termini di velocità e distribuzione dei diametri delle goccioline costituenti lo spray, che della fase continua (l'aria "trascinata" dal getto).

In particolare sono stati esaminati tre water sprays del tipo "full cone" generati da atomizzatori commerciali. Gli ugelli utilizzati sono caratterizzati tutti dallo stesso design geometrico ma da differenti scale.

Lo studio ha lo scopo di valutare l'influenza delle dimensioni dell'atomizzatore (in particolare dell'orifizio dello swirl nozzle) sulle proprietà dello spray allorché tutte le altre caratteristiche e condizioni sperimentali sono mantenute invariate.

L'attività sperimentale mostra che la riduzione del diametro dell'orifizio determina una riduzione della velocità delle particelle a causa delle maggiori dissipazioni di energia dovute all'interazione fra particelle liquide ed aria. L'analisi svolta consente, inoltre, di evidenziare l'esistenza di una legge di similarità fra i differenti spray se i dati sperimentali sono espressi in un'opportuna forma adimensionale.

INTRODUZIONE

Gli spray, attualmente, rappresentano un potentissimo strumento per accelerare i processi chimico - fisici (come scambio di massa, momento ed energia) generantesi all'interfaccia fra due differenti fasi. La tecnica di atomizzazione trova, infatti, applicazioni in numerosissimi campi che vanno dai sistemi di iniezione di motori a combustione interna, ai sistemi di rivestimento di superfici, dal condizionamento di ambienti, all'uso come barriera contro incendi o rilasci di sostanze tossiche [1-5].

Per ogni applicazione risulta fondamentale una perfetta conoscenza del comportamento fluidodinamico dello spray sia in termini di velocità che di dimensione delle particelle costituenti il cono liquido. A tale scopo

possono essere adottate differenti tecniche, basate o su approcci numerici o sperimentali. Fra questi ultimi la tecnica di Anemometria Phase Doppler (PDA) trova un larghissimo impiego, fornendo contemporaneamente informazioni sulla dimensione e sulla velocità delle gocce costituenti il getto [6-9].

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di caratterizzare, mediante rilievi PDA, differenti water spray generati da atomizzatori geometricamente simili. A tale scopo sono stati adoperati tre swirl nozzles aventi lo stesso design geometrico ma una differente dimensione dell'orifizio in modo da valutarne l'influenza sullo sviluppo dello spray.

APPARATO SPERIMENTALE

L'attività sperimentale è stata condotta nella "Water Spray facility", rappresentata schematicamente in Figura 1. Una pompa volumetrica alimenta l'atomizzatore generante lo spray da caratterizzare. Il flusso prodotto viene quindi raccolto in una piscina (3.0 m x 4.0 m x 0.3 m) da dove viene fatto ricircolare dopo un'azione filtrante eseguita in un apposito circuito. La pressione operativa è continuamente monitorata con un trasduttore di pressione, mentre la portata fluente è misurata per mezzo di un tubo di Venturi. Sono garantite portate volumetriche fino ad 1 l/s, mentre le pressioni operative possono raggiungere i 12 bar.

Per la caratterizzazione idrodinamica degli spray, il sistema si compone, inoltre, di un Anemometro Phase Doppler, che consente di avere informazioni sulla dimensione e sulla velocità delle gocce costituenti il getto. Le unità trasmettenti e riceventi sono montate su un sistema di slitte che ne consente la traslazione orizzontale. L'atomizzatore, invece, può essere traslato verticalmente e lateralmente e, infine, ruotato intorno al proprio asse verticale. I quattro gradi di libertà del sistema consentono di investigare l'intero volume dello spray.

Il sistema PDA utilizzato è del tipo monodimensionale, pertanto, può essere misurata una sola componente di velocità per volta. La configurazione del sistema di ottiche è del tipo "forward scattering" con un angolo fra

emettitore e sistema ricevente pari a 30 gradi. Il laser è del tipo Helium-Neon con una potenza di 10 mW.

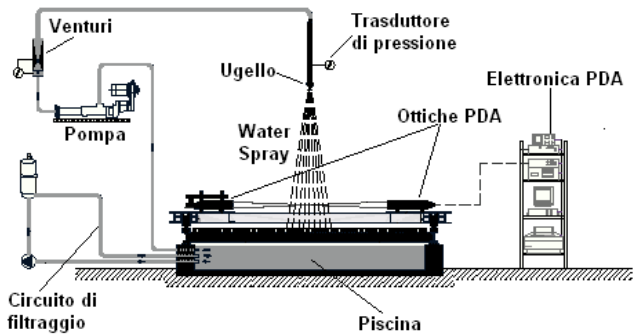


Figura 1 Setup sperimentale.

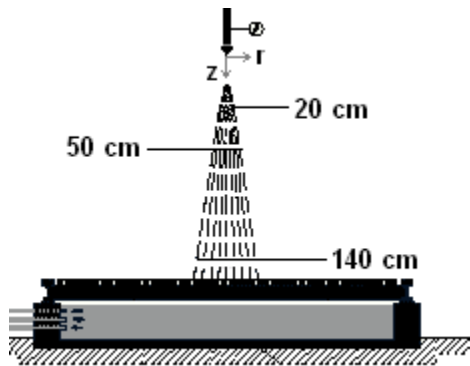


Figura 2. Locazione dei piani di misura. I valori fanno riferimento alla distanza H di ciascun piano dalla sezione di uscita dell'atomizzatore.

INVESTIGAZIONE SPERIMENTALE

WATER SPRAY

Sono stati esaminati tre water sprays del tipo "full cone" generati da atomizzatori commerciali. Gli ugelli presentano tutti lo stesso design geometrico, ma una differente dimensione dell'orifizio dello "swirl nozzle". Il confronto ha lo scopo di valutare l'influenza delle dimensioni del foro dell'atomizzatore sulle proprietà dello spray allorché tutte le altre caratteristiche e condizioni sperimentali sono mantenute invariate. L'atomizzatore di dimensione maggiore è preso come riferimento ed indicato anche come ugello alla scala 1/1. Gli altri due presentano la dimensione dell'orifizio ridotta di 1.4 e 3.5 volte rispetto a quello di riferimento e sono indicati anche come ugelli alla scala 1.4 e 3.5 rispettivamente.

CONDIZIONI OPERATIVE

Per ciascuno spray sono stati rilevati i profili di velocità assiale (componente z) per la fase liquida e la fase gassosa nonché la distribuzione dei diametri su tre piani perpendicolari all'asse dell'atomizzatore, disposti a 20, 50 e 140 cm dall'eiettore (Figura 2). Allo scopo di

consentire il confronto fra i differenti spray, sono state imposte le stesse condizioni durante l'attività sperimentale. In particolare la pressione operativa è stata fissata a 10 bar e continuamente monitorata per mezzo del trasduttore di pressione.

Inoltre, allo scopo di valutare l'effetto del Δp imposto sulla distribuzione delle velocità e dei diametri delle gocce, per l'ugello alla scala 1/1 i rilievi, in un dato punto, sono stati ripetuti nel range di pressione 150 ÷ 1000 kPa, come evidenziato dalla Tabella 1.

Pressione operativa [kPa]									
150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

Tabella 1 Pressioni operative imposte per valutare l'effetto sulla distribuzione di velocità e di dimensione delle gocce costituenti lo spray.

RISULTATI

La Figura 3 mostra il profilo radiale delle velocità assiali medie registrate a 50 cm di distanza dall'orifizio dell'atomizzatore. In particolare, sono riportati gli andamenti riscontrati sia per la fase liquida che per la fase continua (l'aria "trascinata" dallo spray) allorché è utilizzato l'ugello di dimensione maggiore. Considerando la fase liquida, il massimo è localizzato in corrispondenza dell'asse dell'eiettore, mentre i valori medi delle velocità si riducono muovendosi verso la parte esterna del cono d'acqua, a causa sia della sua maggiore interazione con l'aria circostante, che del progressivo incremento della componente orizzontale dei vettori velocità. L'andamento qualitativo registrato per la fase gassosa risulta equivalente al precedente: è visibile, infatti, la presenza di una sorta di offset fra le curve relative alle due differenti fasi. Un'importante differenza è evidente, tuttavia, nella locazione del valore massimo. A causa della maggiore velocità delle gocce d'acqua sulla parte sinistra dell'atomizzatore e, quindi, del più elevato effetto di trascinamento dell'aria in tale zona, la velocità massima dell'aria è leggermente spostata rispetto all'asse dell'ugello.

La Figura 4 riporta, invece, i profili radiali dei diametri medi registrati nelle stesse condizioni sperimentali. La figura fa riferimento al diametro medio di Sauter d_{32} , nonché al diametro medio aritmetico d_{10} , superficiale d_{20} e volumetrico d_{30} . In tal caso è evidente una minore simmetria dei profili rispetto al caso delle componenti assiali di velocità. Indipendentemente dal tipo di diametro considerato, è presente un massimo relativo in corrispondenza dell'asse dell'atomizzatore. Muovendosi in direzione radiale verso la parte esterna dello spray la dimensione media delle particelle tende inizialmente a ridursi, raggiungendo un minimo a circa 10 cm di distanza dall'asse dell'ugello, per poi presentare un andamento crescente. Tali trends sono da attribuire "all'air entrainment". L'aria attirata dallo spray trascina, infatti, principalmente le particelle liquide più piccole (dotate di minore inerzia) dalla parte esterna dello spray verso l'asse, determinando così una quasi-vacanza delle gocce più piccole in vicinanza dell'involuppo del cono

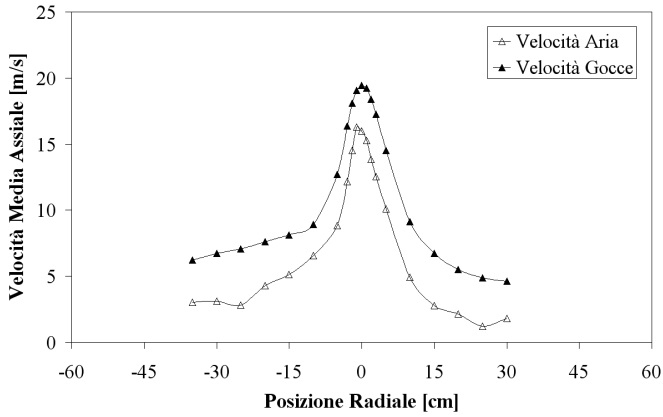


Figura 3. Profili radiali delle velocità assiali medie per le due fasi. Ugello alla scala 1/1. H=50cm.

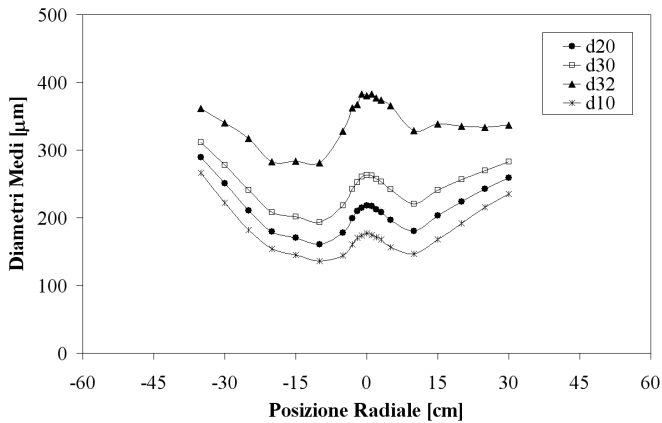


Figura 4. Profili radiali dei diametri medi delle gocce costituenti lo spray. Ugello alla scala 1/1. H=50cm.

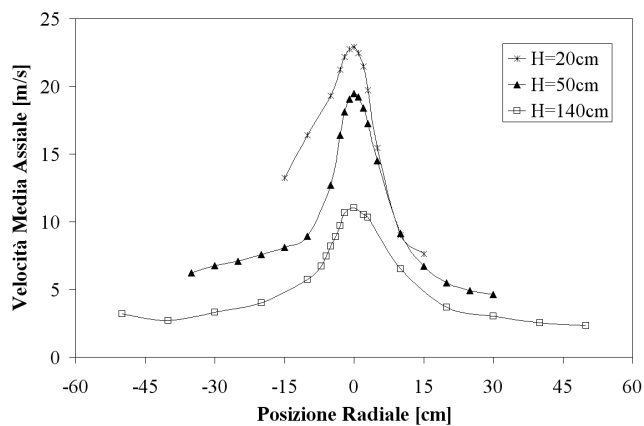


Figura 5. Profili radiali delle velocità assiali registrate sui tre differenti piani di misura. Ugello alla scala 1/1.

liquido ed una maggiore concentrazione al suo interno. Tuttavia, a causa della relativa piccola distanza dall'ugello, il fenomeno dell'air entrainment non influenza sufficientemente la parte più interna del getto, dove i diametri sono piuttosto elevati.

L'effetto della distanza del piano di misura dall'orifizio dell'atomizzatore sullo sviluppo del cono d'acqua è visibile in Figura 5 in termini di velocità medie assiali. In essa sono riportati i risultati registrati a 20, 50 e 140 cm dall'ugello. Allontanando il piano di misura dall'eiettore, le velocità tendono progressivamente a ridursi mentre i profili in direzione radiale diventano sempre più piatti. Tali risultati sono dovuti sia alla maggiore interazione tra gocce liquide ed aria che al progressivo incremento della sezione trasversale dello spray.

A 20 cm dall'ugello è evidente una forte asimmetria nei dati di velocità. In particolare, come notato in precedenza, i valori più elevati si registrano alla sinistra dell'asse dell'atomizzatore. Tale effetto tende, tuttavia, a ridursi incrementando la distanza dall'orifizio, con profili più simmetrici alle distanze maggiori.

Allo scopo di confrontare i risultati conseguiti sui tre piani di misura e superare, quindi, i problemi di asimmetria dello spray, sono stati considerati i valori medi aritmetici. Per ciascuna posizione radiale, è stata considerata, infatti, la media fra le velocità registrate alla sinistra ed alla destra dell'asse dell'atomizzatore, ottenendo così i profili riportati in Figura 6.

L'adozione di un'opportuna adimensionalizzazione consente di evidenziare la presenza di leggi autosimilari all'interno dello spray. È possibile, infatti, individuare un andamento comune fra i profili medi di velocità, se i dati sono rappresentati come

$$\frac{v}{v_{ax}} = f\left(\frac{r}{r_{0.5}}\right) \quad (1)$$

dove v è la velocità media assiale registrata in un generico punto;

v_{ax} è la corrispondente velocità misurata sull'asse dello spray;

r è la posizione radiale in cui è misurata la velocità;

$r_{0.5}$ è la posizione radiale dove la velocità è uguale alla metà del valore registrato sull'asse dello spray.

La Figura 7 evidenzia, infatti, che tutti i dati sperimentali tendono ad essere approssimati dalla stessa curva (linea continua) se è adottata la precedente adimensionalizzazione, indipendentemente dalla distanza del piano di misura dall'orifizio dell'atomizzatore. L'esistenza di una legge universale, valida per un atomizzatore, risulta essere di fondamentale importanza sia in fase di verifica dei rilievi sperimentali che in fase di caratterizzazione del getto.

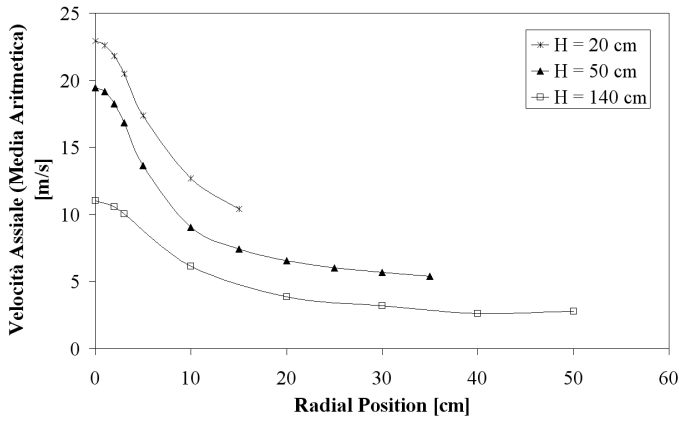


Figura 6. Medie aritmetiche delle velocità assiali sui tre differenti piani di misura. Ugello alla scala 1/1.

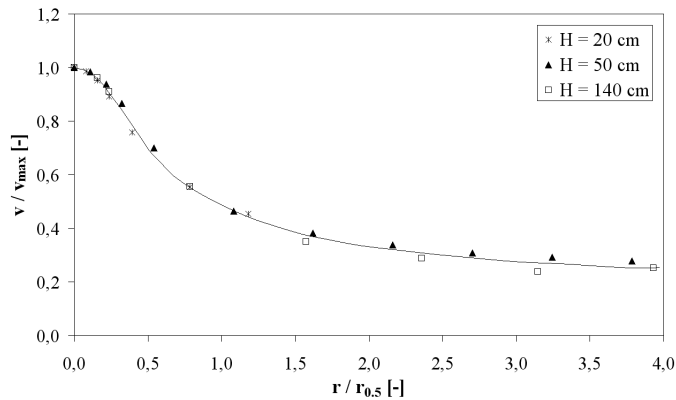


Figura 7. Legge di autosimilarità per l'ugello alla scala 1/1.

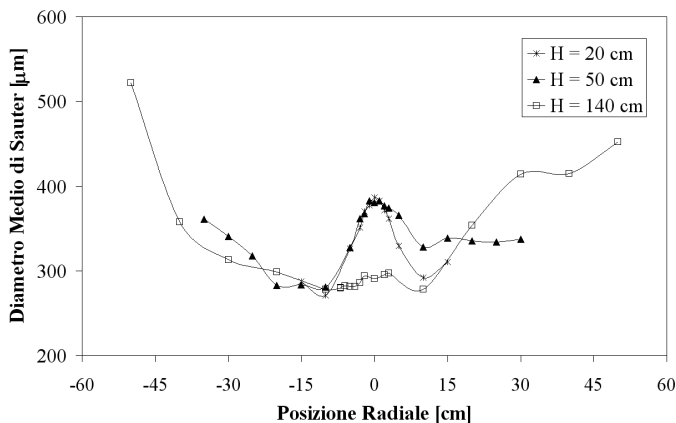


Figura 8. Profili radiali dei diametri medi di Sauter registrati sui tre differenti piani di misura. Ugello alla scala 1/1.

È possibile in tal modo, infatti, validare durante la fase sperimentale i dati ottenuti e ridurre drasticamente il numero di misure necessarie per avere una piena caratterizzazione del comportamento fluidodinamico dello spray. L'esistenza di profili autosimilari è stato verificato anche per l'aria trascinata dallo spray [10].

L'effetto della distanza del piano di misura dall'ugello sulla distribuzione dei diametri medi della fase liquida è visibile in Figura 8 in termini di diametro medio di Sauter d_{32} . Il diagramma mostra che i profili a 20, 50 e 140 cm dall'atomizzatore non presentano una significativa simmetria rispetto all'asse dell'eiettore. In particolare si nota la presenza di gradienti più elevati sulla sinistra del cono liquido, là dove le velocità medie sono maggiori. È importante notare, inoltre, il differente effetto dell'air entrainment sulla distribuzione dei diametri. Come già evidenziato in precedenza, l'aria trascinata dallo spray determina una redistribuzione delle goccioline liquide all'interno del getto. Incrementando la distanza dall'ugello tale fenomeno diventa sempre più importante, interessando significativamente l'intera sezione trasversale dello spray. Come conseguenza, contrariamente a quanto registrato a 20 e 50 cm dall'atomizzatore, alla massima distanza dall'ugello i profili radiali dei diametri d_{32} risultano piuttosto piatti nella parte interna del cono liquido e con valori minimi.

La precedente analisi sperimentale è stata ripetuta adoperando altri due atomizzatori, caratterizzati dallo stesso design geometrico del precedente ma da una differente dimensione dell'orifizio. Le misure di Anemometria Phase Doppler hanno evidenziato la notevole influenza di tale dimensione sullo sviluppo dello spray. Il diametro del foro dell'ugello, infatti, determina la dimensione delle gocce prodotte. Minore è la dimensione dell'orifizio, minore sono i diametri delle particelle d'acqua, come visibile ad esempio in Figura 9 nella quale sono riportati i profili radiali del diametro medio di Sauter a 50 cm dall'atomizzatore adoperando i tre differenti ugelli. La riduzione della dimensione delle gocce determina, inoltre, un più efficiente scambio di momento ed energia fra spray e l'aria circostante [1, 2]. Conseguentemente al ridursi dell'orifizio è presente una maggiore dissipazione di energia cinetica della fase liquida e, quindi, si registrano minori velocità a parità di distanza dall'atomizzatore. La Figura 10 mostra i profili di velocità registrati sempre a 50 cm dall'eiettore.

In ogni caso, per tutti gli ugelli adoperati è stata verificata l'esistenza di profili autosimilari di velocità quando è adottata l'adimensionalizzazione espressa dall'equazione 1 [10]. Si nota, tuttavia, che ciascuno spray è caratterizzato da un proprio profilo di similitudine, con minori gradienti di velocità in direzione radiale al crescere della dimensione del foro (Figura 11).

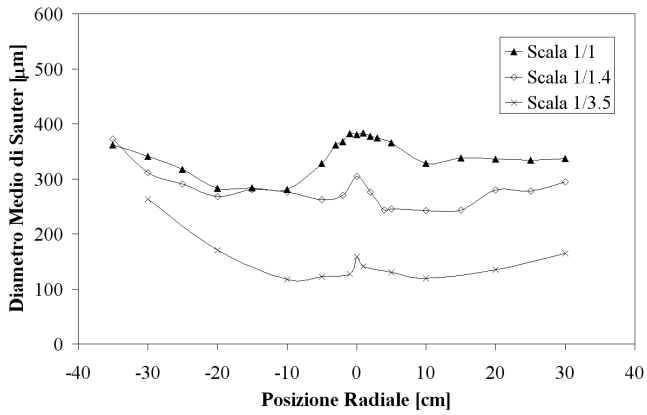


Figura 9. Effetto della dimensione dell'ugello sui profili dei diametri medi di Sauter ($H=50\text{cm}$).

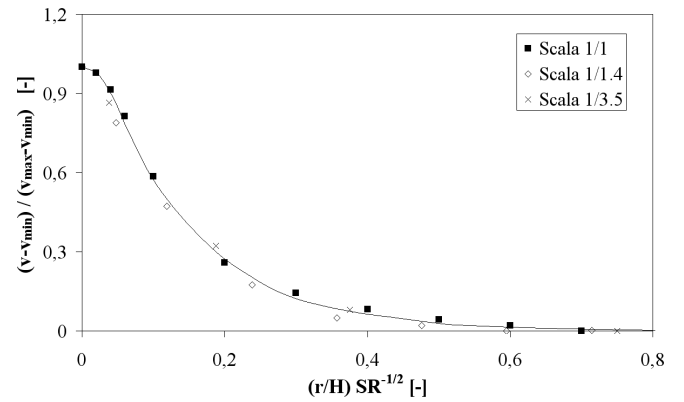


Figura 12. Legge di similarità fra i differenti ugelli.

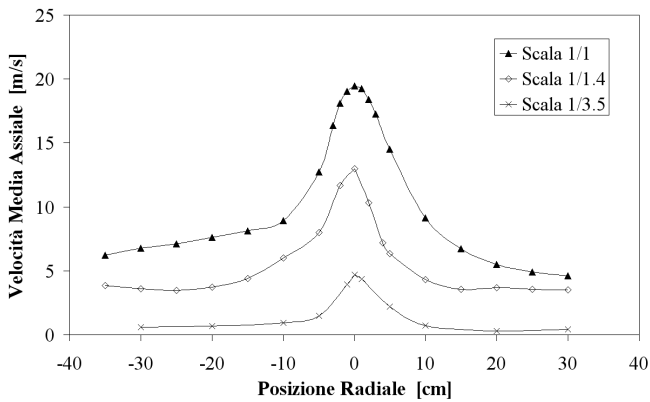


Figura 10. Effetto della dimensione dell'ugello sui profili di velocità ($H=50\text{cm}$).

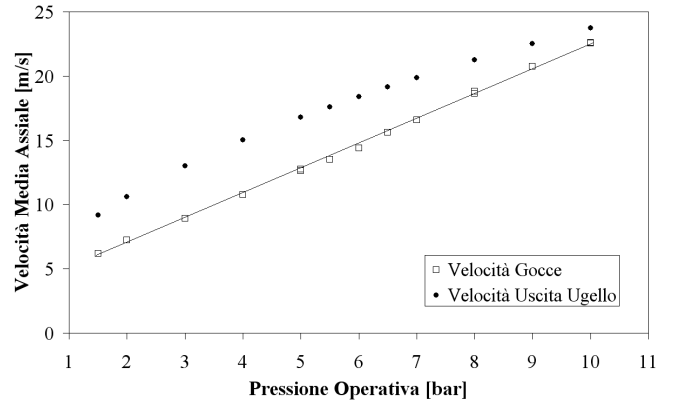


Figura 13. Effetto della pressione operativa sulla velocità in un dato punto. Ugello alla scala 1/1 – $H = 20\text{ cm}$.

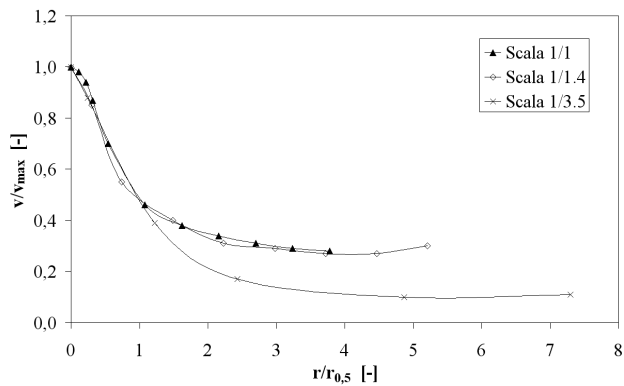


Figura 11. Leggi di autosimilarità per i tre ugelli di differente dimensione.

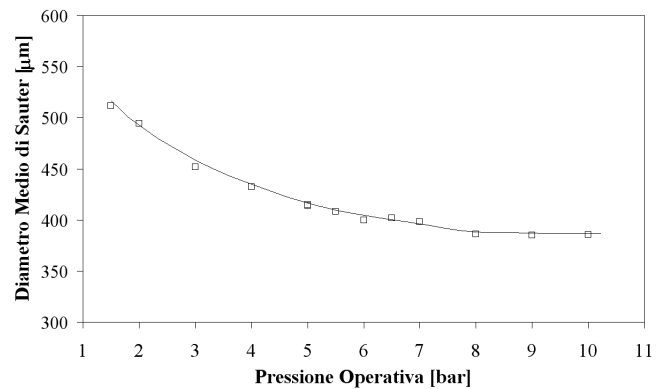


Figura 14. Effetto della pressione operativa sul diametro medio di Sauter in un dato punto. Ugello alla scala 1/1 – $H = 20\text{ cm}$.

È stata realizzata, quindi, un'analisi sistematica dei dati allo scopo di correlare i risultati conseguiti con i differenti atomizzatori. In particolare, fissando l'attenzione sui rilievi ottenuti alla stessa distanza dall'ugello, è stato evidenziato che esiste una legge comune fra i differenti spray se i dati di velocità sono espressi secondo la seguente forma

$$\frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} = f\left(\frac{r}{H} \frac{1}{SR^{1/2}}\right) \quad (2)$$

dove v è la velocità media assiale registrata in un generico punto;
 v_{\min} è la corrispondente velocità minima registrata sullo stesso piano trasversale del generico punto di misura;
 v_{\max} è la corrispondente velocità massima registrata sullo stesso piano trasversale del generico punto di misura;
 r è la posizione radiale in cui è misurata la velocità;
 H è la distanza fra il piano di misura e l'ugello, introdotta per scopi adimensionali;
 SR è il fattore di scala fra l'orifizio del generico atomizzatore e quello di dimensione maggiore.

La Figura 12 mostra i risultati ottenuti. In particolare, la linea continua rappresenta la comune tendenza dei dati di velocità. L'esistenza di una legge di similitudine fra spray generati da atomizzatori geometricamente simili è di fondamentale importanza in quanto consente di ridurre drasticamente il numero di misure che devono essere eseguite allorché ugelli caratterizzati dallo stesso design geometrico devono essere studiati. Infatti, una volta che un profilo radiale per un dato ugello è stato ottenuto, è possibile estrapolare i corrispondenti profili per atomizzatori simili se i valori massimi e minimi di velocità per questi ultimi eiettori sono noti. I due precedenti valori di velocità sono facilmente ottenibili poiché essi corrispondono, per gli ugelli adoperati, rispettivamente al valore sull'asse e sull'involuppo dello spray. In tal modo, con poche misure, è possibile definire il profilo delle velocità assiali su un'intera sezione trasversale. Naturalmente, ulteriori rilievi sono utili per verificare i valori predetti dal modello.

Plottando i dati sperimentali nella forma adimensionale suggerita, è possibile, inoltre, effettuare una rapida verifica.

In futuro verranno effettuate analisi di altri atomizzatori allo scopo di verificare se la precedente legge può essere estesa anche ad altre configurazioni geometriche.

Infine, è stato esaminato l'effetto della pressione operativa sulla velocità e sul diametro delle gocce d'acqua. I risultati si riferiscono all'eiettore di dimensione maggiore quando il punto di misura è localizzato sull'asse dell'atomizzatore a 20 cm di distanza dall'orifizio. La pressione operativa è stata variata fra

150 e 1000 kPa (Tabella 1). Come atteso [11], le velocità crescono all'aumentare del Δp imposto. In particolare, dalla Figura 13 è evidente un legame lineare fra velocità media delle particelle e pressione operativa, mentre le velocità all'uscita dall'orifizio scalano con la radice quadrata del Δp imposto, in accordo con l'equazione:

$$FN = \frac{\dot{m}_l}{\sqrt{\Delta p}} \quad (3)$$

dove FN è il "flow number", costante per un atomizzatore;
 \dot{m}_l è la portata liquida.

I diametri, invece, crescono al ridursi della pressione operativa (Figura 14) in accordo con la letteratura [9, 11]. Più precisamente considerando i diametri medi di Sauter si nota che per $\Delta p < 800$ kPa i diametri si riducono secondo la legge:

$$d_{32} = \frac{C}{\Delta p^\alpha} \quad (4)$$

dove C è una costante dipendente dalle caratteristiche geometriche dell'atomizzatore e dalle proprietà fisiche delle fasi gassosa e liquida. Al contrario, quando $\Delta p \geq 800$ kPa non è visibile alcun effetto della pressione: la dimensione delle particelle rimane, infatti, costante e con un valore pari al minimo registrato.

CONCLUSIONI

La tecnica di Anemometria Phase Doppler (PDA) è stata adoperata allo scopo di caratterizzare tre water sprays generati da atomizzatori commerciali caratterizzati dallo stesso design geometrico ma da una differente dimensione dell'orifizio.

Per ciascuno spray sono stati rilevati i profili di velocità assiale per la fase liquida e la fase gassosa nonché la distribuzione dei diametri su tre piani perpendicolari all'asse dell'atomizzatore, in modo da valutare l'effetto della distanza dall'ugello sulle distribuzioni di velocità e dei diametri.

I risultati mostrano che, fissato l'eiettore, le velocità assiali si riducono allontanandosi dall'atomizzatore e che i profili in direzione radiale diventano via via più piatti in virtù sia della maggiore interazione fra le gocce dello spray con l'aria circostante che dell'incremento della sezione trasversale del getto. Inoltre, è stato dimostrato che, per ciascuno spray, l'adozione di un'opportuna adimensionalizzazione consente di definire una legge di "similitudine" fra i profili di velocità indipendentemente dalla distanza del piano di misura dall'ugello.

L'analisi dei dati relativi ai profili dei diametri delle goccioline liquide evidenzia la notevole importanza della

distanza del piano di misura sui risultati ottenuti, a causa della differente entità "dell'air entrainment", il cui effetto cresce allontanandosi dall'ugello.

Il confronto fra i differenti spray mostra la notevole influenza esercitata dalla dimensione dell'orifizio dell'atomizzatore sullo sviluppo del cono liquido. La riduzione del diametro del foro determina, infatti, una diminuzione della dimensione delle gocce e, quindi, una riduzione della velocità a causa del più efficiente scambio di momento ed energia fra particelle liquide ed aria.

L'analisi svolta consente, infine, di evidenziare l'esistenza di una legge di similarità fra i differenti spray, generati da atomizzatori geometricamente simili. Si nota, infatti, che tutti i rilievi sperimentali si distribuiscono su un'unica curva, indipendentemente dalle dimensioni dell'ugello adoperato, se i dati sono espressi in un'opportuna forma adimensionale.

RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento va ai Proff. S. Bova, M. Carbonaro, G. Florio e M. Napolitano, che hanno reso possibile il presente lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- 1 W. Jia, H.-H. Qiu, "Experimental investigation of droplet dynamic in spray cooling", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27, 829-838, 2003
- 2 N. Dombrowski, J. Singh, "An experimental study of air entrainment by multiple spray nozzles", ICLASS-91 Gaithersburg, MD (U.S.A.), July 1991.
- 3 J. P. Dimbour, A. Dandrieux, D. Gilbert, G. Dusserre, "The use of water sprays for mitigating chlorine gaseous releases escaping from a storage shed", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16, 259-269, 2003.
- 4 F. Zhao, M.-C. Lai, D. L. Harrington, "Automotive spark-ignited direct injection gasoline engines", *Progress in Energy and Combustion Science*, 25, 437-562, 1999.
- 5 J. F. Widmann, D. T. Sheppard, R. M. Leptow, "Non-Intrusive Measurements in Fire Sprinkler Sprays", *Fire Technology*, 37, 297-315, 2001.
- 6 I. Zbicinski, A. Delag, C. Strumillo, J. Adamiec, "Advanced experimental analysis of drying kinetic in spray drying", *Chemical Engineering Journal*, 86, 207-216, 2002.
- 7 Z. Zhang, S. Ziada, "PDA measurements of droplet size and mass flux in the three-dimensional atomisation region of water jet in air cross-flow", *Experiments in Fluids*, 28, 29-35, 2000.
- 8 J. Tillwick, V. Uhlenwinkel, K. Bauckhage, "Analysis of the spray forming process using backscattering phase-Doppler anemometry", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20, 530-537, 1999.
- 9 G. E. McCreery, C. M. Stoots, "Drop formation mechanisms and size distributions for spray plate nozzles", *Int. J. Multiphase Flow* Vol. 22, No. 3, 431-452, 1996.

- 10 A. Algieri, "Experimental study of water spray curtain", PR 2003-01, von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2003.
- 11 J.-M. Buchlin, "Two-phase flow with phase transition - Thermohydraulic modelling of liquid sprays", *Lecture Series 1995-06*, von Karman Institute for Fluid Dynamics 29 May - 1 June, 1995.

LISTA DEI SIMBOLI

- FN è il "flow number";
- H è la distanza fra il piano di misura e l'ugello;
- SR è il fattore di scala fra l'orifizio del generico atomizzatore e quello di dimensione maggiore;
- d_{10} è il diametro medio aritmetico;
- d_{20} è il diametro medio superficiale;
- d_{30} è il diametro medio volumetrico;
- d_{32} è il diametro medio di Sauter;
- f è una generica funzione;
- \dot{m}_l è la portata liquida;
- r è la posizione radiale in cui è misurata la velocità;
- $r_{0.5}$ è la posizione radiale dove la velocità è uguale alla metà del valore registrato sull'asse dello spray;
- v è la velocità media assiale registrata in un generico punto;
- v_{ax} è la corrispondente velocità misurata sull'asse dello spray;
- v_{min} è la corrispondente velocità minima registrata sullo stesso piano trasversale del generico punto di misura;
- v_{max} è la corrispondente velocità massima registrata sullo stesso piano trasversale del generico punto di misura;
- α è un esponente;
- Δp è la pressione operativa imposta.

CONTATTI

Dipartimento di Meccanica
Università della Calabria
87030 Arcavacata di Rende (CS)

Angelo ALGIERI a.algieri@unical.it