ENEA Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP2 -080	L	1	66

Titolo

Analisi delle prestazioni di uno Spool Piece, costituito da Venturi classico e Wire Mesh Sensor, in deflusso orizzontale bifase aria-acqua

Ente emittente CIRTEN

PAGINA DI GUARDIA

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"

Argomenti trattati: Reattori e sistemi innovativi
Sicurezza Nucleare
Analisi incidentale

Sommario

Nel presente documento è descritta la caratterizzazione di uno Spool Piece costituito da un venturi classico e da un Wire Mesh Sensor, installati in un condotto orizzontale interessato dal deflusso di una miscela aria-acqua. Questo Spool Piece è stato installato e testato in un circuito realizzato presso il laboratorio del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, che consente di realizzare un deflusso bifase aria-acqua in un ampio range di portate, permettendo lo studio di deflussi caratterizzati da differenti condizioni fluidodinamiche. Lo studio ha consentito di approfondire i lavori effettuati dal Politecnico di Torino nell'ambito dell'attività LP2 "Reattori evolutivi INTD" del PAR2008-09, in particolare nell'ambito della scelta degli strumenti da installare nelle linee di rottura di SPES3 con l'obiettivo di misurare la portata massica bifase delle due fasi che transita nelle linee durante i transitori incidentali.

L'analisi dei segnali elettrici, relativi agli strumenti dello Spool Piece, ha permesso di caratterizzare il deflusso bifase in termini di flow pattern e portate delle singole fasi. Gli errori maggiori sulla stima delle grandezze fluidodinamiche si sono avuti in corrispondenza dei regimi di deflusso intermittenti. Per alti valori del titolo e di grado di vuoto, corrispondenti al range di misura di interesse per l'installazione nello SPES3, il modello consente di ottenere incertezze sulla stima di titolo e portata di liquido sempre inferiori al 10% e inferiori al 20% nella stima della portata massica della fase aeriforme. Il modello di analisi sviluppato consente, oltre che di stimare le portate delle due fasi, di ottenere importanti informazioni sulle caratteristiche fluidodinamiche della miscela. Nel presente documento una metodologia per l'identificazione del flow pattern è stata sviluppata e analizzata. Dall'analisi della variazione temporale dei segnali e dall'analisi in frequenza, per ogni tipologia di deflusso, vengono estratti i parametri fluidodinamici di riferimento, quali le frequenze caratteristiche i profili cordali del grado di vuoto e l'evoluzione dell'interaccia.

Sebbene il lavoro richieda ulteriori approfondimenti, la strumentazione e la metodologia di analisi sviluppata vengono proposte come possibile soluzione per la misura delle grandezze bifase nello SPES3.

Note

REPORT PAR 2011 LP2.D CIRTEN-POLITO RL 1560/2012

Autori: M. De Salve, G. Monni, B. Panella
POLITECNICO DI TORINO

Copia n. **In carico a:**

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	13/09/2012	NOME	P. Meloni		P. Meloni
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE

CIRTEN

Consorzio **I**nteruniversitario per la **R**icerca **TE**cnologica **N**ucleare

POLITECNICO DI TORINO

Analisi delle prestazioni di uno *Spool Piece,* costituito da Venturi classico e Wire Mesh Sensor, in deflusso orizzontale bifase aria-acqua

Autori

M. De Salve

G. Monni

B. Panella

CERSE-POLITO RL 1560/2011

TORINO LUGLIO 2012

Lavoro svolto in esecuzione dell'Attività LP2.D3
AdP MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico - Piano Annuale di Realizzazione 2011
Progetto 1.3.1 "Nuovo Nucleare da Fissione:
collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare"

Indice

Lista delle figure 3
Lista delle tabelle 4
Sommario 5
Introduzione 6
Sezione di prova, circuito sperimentale e strumentazione 7
Matrice Sperimentale 11
Prove Monofase 11
Prove Bifase 11
Caratteristiche degli Strumenti dello Spool Piece e loro teoria 13
Venturi 13
Modelli Venturi in deflusso bifase 16
Caratteristiche del Venturi e Calibrazione Monofase 18
Definizione di densità di miscela bifase "vista" dal Venturi 20
Wire Mesh Sensor 25
Elaborazione dei segnali del WMS 27
Calibrazione WMS: Confronto con grado di vuoto misurato con le valvole a chiusura rapida e con i modelli di letteratura 28
Modello dello SP 31
Procedura Sperimentale e Elaborazione dei Segnali 34
Analisi dei risultati 34
Analisi del comportamento del venturi in deflusso bifase 34
Analisi del comportamento dello SP 36
Classificazione dei flow pattern: profili di grado di vuoto e analisi del grado di vuoto medio temporale sulla sezione 40
Analisi deflussi intermittenti 45
Perdite di carico nello Spool Piece e Moltiplicatori bifase 49
Conclusioni 58
Bibliografia 60
APPENDICE I : Matrice Prove Monofase 62
APPENDICE II : Matrice Risultati Sperimentali Bifase 64

Lista delle figure

Fig. 1: Schema circuito sperimentale 8
Fig. 2: Sistema per l'alimentazione e la misura della portata del liquido 8
Fig. 3: Rappresentazione dei RUN sperimentali sulla mappa di Baker per deflussi orizzontali 13
Fig. 4: Rappresentazione schematica del misuratore differenziale Venturi 14
Fig. 5: Calibrazione monofase Venturi 19
Fig. 6: Coefficiente di scarico sperimentale e normativo per il Venturi 19
Fig. 7: Densità bifase aria-acqua a p = 1 bar in funzione del titolo per i diversi modelli 21
Fig. 8: Densità bifase aria-acqua a p = 200 bar in funzione del titolo per i diversi modelli 21
Fig. 9: Densità bifase acqua-vapore a p = 1 bar in funzione del titolo per i diversi modelli 21
Fig. 10: Densità bifase acqua-vapore a p = 185 bar in funzione del titolo per i diversi modelli 21
Fig. 11: Confronto tra densità della miscela bifase calcolate sulla base di modelli teorici 22
Fig. 12: Confronto tra W_{tot} bifase sperimentale e W_{tot} calcolata sulla base dei modelli di densità di miscela bifase. 22
Fig. 13: Confronto tra coefficienti di scarico del venturi in deflusso bifase, ottenuti sulla base dei modelli di densità di miscela 24
Fig. 14: Confronto tra coefficienti di scarico del Venturi in deflusso bifase e in deflusso monofase 25
Fig. 15: Calibrazione Venturi Bifase *C =f(Re)* 25
Fig. 16: Sensore 16x16 WMS200 26
Fig. 17: Area di riferimento dei punti di misura e definizione dei pesi *a(i,j)* 28
Fig. 18: Confronto α misurato tramite WMS e α misurato con le valvole di intercettazione 29
Fig. 19: Correlazioni x-α (sopra) e scostamenti rispetto ai valori sperimentali (sotto) 30
Fig. 20: Confronto curva x-α sperimentale e ottenuta dal modello dello SP 32
Fig. 21: Algoritmo di calcolo delle portate bifase 33
Fig. 22: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione della portata massica totale 34
Fig. 23: Cadute di pressione bifase nel Venturi: dipendenza dalle portate delle fasi 35
Fig. 24: Cadute di pressione bifase nel Venturi: dipendenza dal titolo 36
Fig. 25: Confronto tra titolo sperimentale e titolo ottenuto dal modello dello SP, scala lineare 37
Fig. 26: Confronto tra titolo sperimentale e titolo ottenuto dal modello dello SP, scala logaritmica 37
Fig. 27: Errore sul titolo ottenuto con il modello dello SP 38
Fig. 28: Confronto portata totale sperimentale e ottenuta dal modello dello SP 38
Fig. 29: Confronto portata acqua sperimentale e ottenuta dal modello dello SP 39
Fig. 30: Confronto portata aria sperimentale e ottenuta dal modello dello SP 39
Fig. 31: Profilo verticale medio del grado di vuoto per i flow patterns sperimentati (a) e relativo profilo di standard deviation (b) 41
Fig. 32: Andamento temporale della frazione di vuoto (a) e curva di distribuzione (b) 43
Fig. 33: Analisi in frequenza. Scala lineare (a) e scala logaritmica (b) 44
Fig. 34: Classificazione deflussi intermittenti 46
Fig. 35: Classificazione deflussi intermittenti 47
Fig. 36: Frequenze caratteristiche deflussi intermittenti 48
Fig. 37: Frequenze caratteristiche deflussi intermittenti: numero di Strouhal- frazione volumetrica di liquido 48
Fig. 38: Geometria e parametri di riferimento per le cadute di pressione in un condotto circolare 49
Fig. 39: Moltiplicatore bifase di Martinelli-Nelson (valido per acqua) 51
Fig. 40: Valori del moltiplicatore bifase Φ^2_{lo} in funzione di pressione e titolo per deflusso acqua-vapore [25] 53
Fig. 41: Relazione tra frazione di vuoto e titolo nella correlazione di Martinelli-Nelson [25] 54
Fig. 42: Cadute di pressione monofase nello SP (L=2690 mm) 56
Fig. 43: Cadute di pressione bifase nello SP (L=2690 mm) 56

Fig. 44: Confronto Moltiplicatori bifase sperimentali e da correlazione Lockhart-Martinelli 57
Fig. 45: Cadute di pressione bifase nello SP: Moltiplicatori bifase riferiti alla fase liquida 58

Lista delle tabelle

Tab. 1: Matrice Sperimentale Prove Bifase 12
Tab. 2: Caratteristiche Venturi 18
Tab. 3: Modelli per il calcolo della densità bifase [18] 20
Tab. 4: Caratteristiche WMS200 27
Tab. 5: Valori del parametro C in funzione delle condizioni di deflusso 53
Tab. 6: Matrice risultati sperimentali prove monofase acqua 63
Tab. 7: Matrice risultati sperimentali prove monofase aria 63
Tab. 8: Matrice risultati sperimentali prove bifase aria-acqua 65

1.

Sommario

Nel presente documento è descritta la caratterizzazione di uno Spool Piece costituito da un venturi classico e da un Wire Mesh Sensor, installati in un condotto orizzontale interessato dal deflusso di una miscela aria-acqua.
Presso il laboratorio del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, è stato costruito un circuito, avente una lunghezza totale circa 10 m e un diametro interno di 19.5 mm, contenente la *test section* in cui è installato lo Spool Piece. Il circuito di prova, collegato ai circuiti di alimentazione di acqua e aria, consente di realizzare un deflusso bifase aria-acqua in un ampio range di portate, permettendo lo studio di deflussi caratterizzati da differenti condizioni fluidodinamiche.
La risposta degli strumenti al variare delle caratteristiche della miscela, e la metodologia utilizzata per analizzare i segnali e ricavare le portate delle fasi, vengono qui descritte.
Lo studio consente di approfondire i lavori effettuati dal Politecnico di Torino nell'ambito dell'attività LP2 "Reattori evolutivi INTD", e in particolare nell'ambito della scelta degli strumenti da installare nelle linee di rottura di SPES3 con l'obiettivo di misurare la portata massica bifase delle due fasi che transita nelle linee durante i transitori incidentali.
L'analisi dei segnali elettrici, relativi agli strumenti dello Spool Piece, ha permesso di caratterizzare il deflusso bifase in termini di flow pattern e portate delle singole fasi. Il modello sviluppato ha permesso di stimare la portata totale della miscela bifase con un errore che nell'84% dei casi è inferiore al 20% e nel 73.3% dei casi è inferiore al 10%, in un range di variazione del titolo compreso tra 0.000274 e 0.73. Le incertezze maggiori concernenti la stima della portata massica di aria, risultano comunque inferiori al 30% nel 73.3% dei casi e inferiori al 20% nel 53.5% dei casi testati. Gli errori maggiori sulla stima delle grandezze fluidodinamiche si hanno in corrispondenza dei regimi di deflusso intermittenti; per alti valori del titolo e di grado di vuoto, corrispondenti al range di misura di interesse per l'installazione nello SPES3, il modello consente di ottenere incertezze sulla stima di titolo e portata di liquido sempre inferiori al 10% e inferiori al 20% nella stima della portata massica della fase aeriforme.

Il modello di analisi sviluppato consente, oltre che di stimare le portate delle due fasi, di ottenere importanti informazioni sulle caratteristiche fluidodinamiche della miscela. Nel presente documento una metodologia per l'identificazione del flow pattern è stata sviluppata e analizzata. Dall'analisi della variazione temporale dei segnali e dall'analisi in frequenza, per ogni tipologia di deflusso, vengono estratti i parametri fluidodinamici di riferimento, quali le frequenze caratteristiche i profili cordali del grado di vuoto e l'evoluzione dell'interaccia.

Il presente documento, che presenta i risultati della campagna sperimentale, è organizzato come descritto di seguito.
Nell'introduzione si riprendono sinteticamente gli obiettivi raggiunti negli studi precedenti e le motivazioni che hanno portato alla scelta degli strumenti costituenti il nuovo Spool Piece.
Vengono quindi descritte le caratteristiche della *test section*, degli strumenti dello Spool Piece e le metodologie utilizzate per effettuare le prove e per acquisire e analizzare i segnali.
Nella terza parte, vengono descritte le prove di calibrazione monofase mentre nella quarta parte, vengono analizzati i risultati delle prove di caratterizzazione svolte in condizioni bifase aria-acqua.

Sebbene il lavoro richieda ulteriori approfondimenti, la strumentazione e la metodologia di analisi sviluppata vengono proposte come possibile soluzione per la misura delle grandezze bifase nello SPES3.

Introduzione

Nell'ambito dell'attività LP2 "Reattori evolutivi INTD", con riferimento ai reattori di piccola e media taglia, il Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino, ha svolto una attività di ricerca teorico-sperimentale con lo scopo di sviluppare e caratterizzare la strumentazione per la misura della portata in un deflusso bifase.
Lo sviluppo di strumenti e metodi tali da fornire la portata e il titolo di una miscela bifase ha una lunga storia iniziata con lo sviluppo delle centrali termoelettriche a vapore e diventata sempre più importante a partire dagli anni 1960.
Negli anni 1975-1980 lo sviluppo della strumentazione in campo nucleare aveva l'obiettivo di misurare le grandezze che caratterizzavano i deflussi bifase nei grandi circuiti di prova per lo studio dei transitori incidentali degli impianti nucleari e si è introdotto il concetto di "Spool Piece" (SP) inteso come un insieme di strumenti connessi in serie in un condotto. Uno SP ideale è un condotto costituito da una serie di strumenti, alimentati in ingresso da un deflusso. Lo SP ideale ha una dinamica veloce, e individua un set di equazioni algebriche (in cui il numero di equazioni indipendenti è pari al numero delle grandezze incognite del deflusso) che permettono di descrivere il deflusso noti i segnali elettrici degli strumenti.
La scelta degli strumenti che compongono lo SP, è strettamente legata al tipo di deflusso che si intende analizzare, alla velocità delle fasi, alle pressioni e alle temperature [1-2-3].

Lo SP è costituito da una serie di strumenti sensibili alle variazioni delle proprietà fluidodinamiche della miscela: ad esempio il venturi fornisce un segnale proporzionale al prodotto ρu^2 (densità per il quadrato della velocità), la turbina un segnale proporzionale a u, il drag disk un segnale proporzionale alla quantità di moto del deflusso ($\rho u \cdot u$), la sonda a impedenza un segnale proporzionale al grado di vuoto α ed infine il gamma-densitometro un segnale proporzionale alla densità della miscela ρ.
Oltre che di questi strumenti, lo SP deve essere equipaggiato di trasduttori di pressione assoluta e differenziale, nonché di termocoppie per la misura di temperatura. Queste informazioni risultano di fondamentale importanza per la ricostruzione delle proprietà delle singole fasi e per l'interpretazione dei segnali degli altri strumenti.
Esistono numerose possibilità di combinare diversi strumenti per formare uno SP; in particolare negli ultimi anni si è cercato di sviluppare uno SP composto da soli due strumenti, con il vantaggio di ridurre le lunghezze richieste e ovviamente i costi e la complessità dell'installazione. Lo svantaggio che si ha nel ridurre il numero degli strumenti è la necessità di sopperire alle informazioni mancanti tramite modelli e correlazioni empiriche o teoriche.
Nell'ambito dell'attività di ricerca il Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino ha modellizzato e testato uno SP composto da un misuratore turbina e un drag disk [4].

L'analisi dei segnali elettrici, relativi agli strumenti dello SP installato nel circuito di prova, ha permesso di caratterizzare il deflusso bifase e stimare le portate delle singole fasi nella miscela con un incertezza del 15%. Poiché non è presente uno strumento per la misura del grado di vuoto (Gammadensitometro, Wire-Mesh Sensor (WMS), Electrical Capacitance Tomography (ECT)) le informazioni che lo SP fornisce sono da considerarsi complete solo nella misura in cui le condizioni di prova (pressione, temperatura e

range di portate) sono quelle realizzate. Lo studio parametrico effettuato con il modello di Aya, ha permesso di concludere che, in limitati range di funzionamento, la conoscenza del tipo di flow pattern consente di evitare l'utilizzo del 3° strumento costituente lo SP [5].
Lo studio proposto, consentendo di verificare l'utilizzo di strumentazione convenzionale monofase in deflusso bifase caratterizzato da elevati gradi di vuoto, ha comunque una notevole rilevanza scientifica.
Nel proseguo dello studio il circuito è stato modificato al fine di inserire il misuratore di grado di vuoto. Lo studio ha infatti evidenziato che la risposta degli strumenti in regime bifase dipende fortemente dal flow pattern a monte, nonché dalla storia temporale del deflusso.
Uno degli strumenti che compongono lo SP dovrebbe quindi essere in grado di identificare il tipo di deflusso in maniera obiettiva; a questo scopo si sono analizzati i comportamenti di una sonda a impedenza a geometria concava, del Wire Mesh Sensor [6-8] e di una sonda tomografica capacitiva sviluppata presso la SIET [8-9-10]. Gli studi teorico-sperimentali hanno consentito di evidenziare i vantaggi e le potenzialità applicative delle diverse sonde e i relativi svantaggi.
Alla luce degli studi effettuati e in relazione all'applicabilità dello strumento nell'impianto SPES3 è stato proposto lo studio di un nuovo SP composto da un venturi, modello classico e da un misuratore di grado di vuoto: WMS e sonda tomografica SIET. Il venturi, non avendo parti in movimento ed essendo caratterizzato da un elevata robustezza, ben si presta a lavorare nelle condizioni fluidodinamiche che l'impianto sperimentale SPES3 dovrà simulare; mentre i misuratori di grado di vuoto quali sonda tomografica o WMS consentono di ricostruire la distribuzione delle fasi all'interno del condotto e di stabilire secondo criteri obiettivi il tipo di deflusso, oltre che il valore medio della frazione di vuoto di gas/vapore.

Nel presente studio vengono presentati i risultati della campagna sperimentale effettuata per caratterizzare lo SP costituito da un venturi e un WMS installati, con giacitura orizzontale, in un circuito che opera con un deflusso bifase aria-acqua. La metodologia sviluppata per analizzare i segnali e modellizzare il funzionamento dello SP sono qui descritti e discussi.

Sezione di prova, circuito sperimentale e strumentazione

Il condotto in cui fluisce il deflusso bifase (Fig. 1) è composto da un condotto con sviluppo prevalentemente orizzontale di circa 10 m di lunghezza totale, composto da due SP in serie: test section N°1 e test section N° 2. Nel presente studio viene analizzata la test section N°2, lo studio effettuato sulla test section N°1 è riportato in [5].
La prima parte del condotto orizzontale (test section N°1) è composta da due tratti in plexiglas aventi ognuno una lunghezza pari a 1200 mm e un diametro interno di 19.5 mm (De = 25 mm), e da uno Spool Piece, interposto tra questi, composto da una turbina (Hoffer), un drag disk (Ramapo MARK V) e da una sonda concava a impedenza composta da due piastre di rame, montata esternamente al condotto.
La regione in cui è montata la sezione di prova utilizzata nel presente studio è posta a valle di due gomiti di 90° disposti verticalmente, che consentono l'inversione della direzione del deflusso rispetto alla test section N°1. L'ingresso è situato a circa 3750 mm rispetto all'ingresso della test section N°1. Il Wire Mesh Sensor è installato tra due condotti in plexiglas di lunghezza 600 mm ciascuno e diametro interno 19.5 mm, mentre il venturi, posto a valle del WMS è installato tra due condotti di 500 mm e 490 mm a monte e a valle rispettivamente.

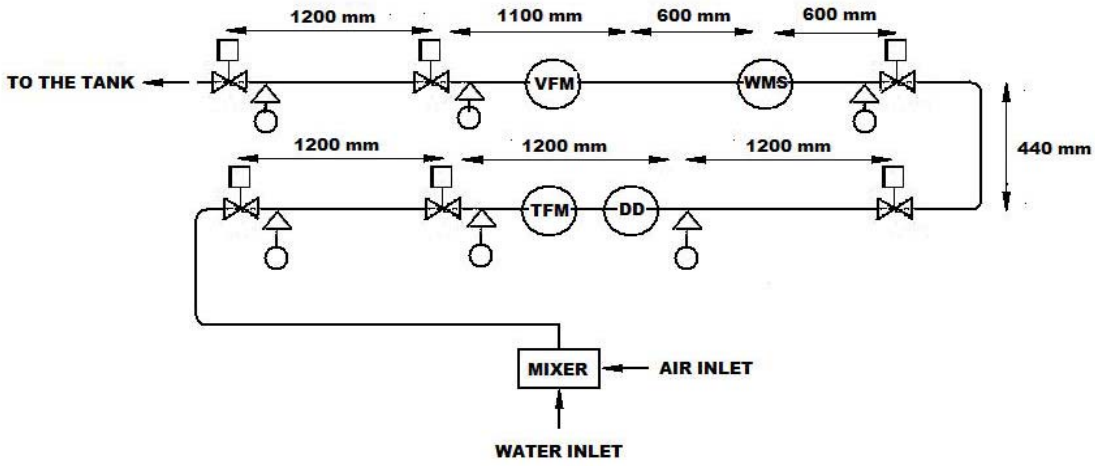


Fig. 1: Schema circuito sperimentale

Viene misurata la pressione all'ingresso del circuito attraverso un trasduttore di pressione assoluta Rosemount 3051/1 nel range 0.5-10 bar. Il circuito opera a una pressione compresa tra la pressione atmosferica e una pressione massima di 4 bar, a seconda delle condizioni di prova.
Il deflusso bifase è scaricato in un ambiente a pressione atmosferica.
Il circuito è dotato di valvole d'intercettazione a chiusura rapida che consentono di valutare il grado di vuoto volumetrico medio relativo a una lunghezza di 1300 mm e di varie prese di pressione che consentono la misura della pressione assoluta e differenziale della miscela.
Viene misurata la pressione differenziale tra monte e valle dello SP (L = 2690 mm) tramite un misuratore differenziale Rosemount nel range -310÷310 mmbar.
La caduta di pressione nel venturi viene misurata utilizzando due misuratori differenziali a seconda del range di portate sperimentato: -40÷40 mmbar e 0÷1250 mmbar per le portate più elevate.

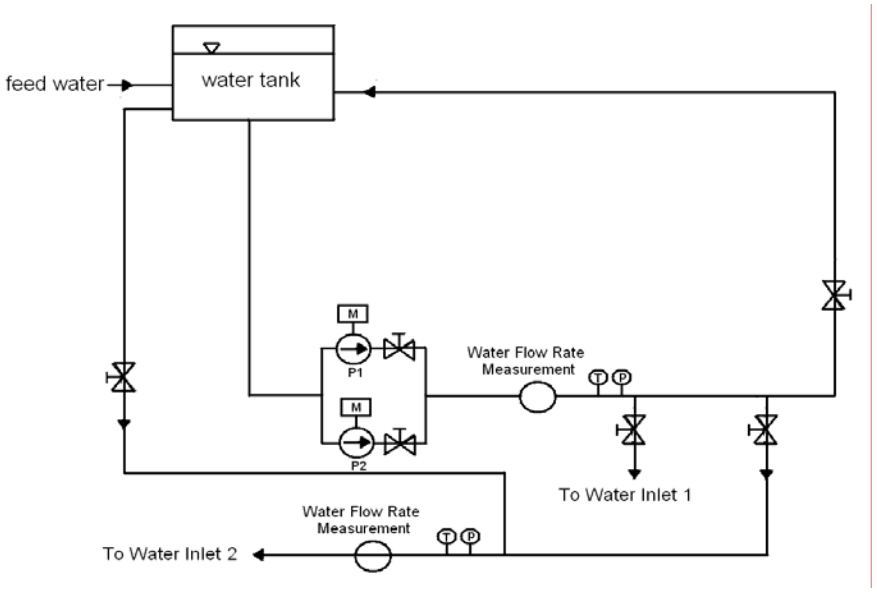


Fig. 2: Sistema per l'alimentazione e la misura della portata del liquido

L'impianto sperimentale in cui è montata la sezione di prova è composto dal circuito di alimentazione dell'acqua, dal circuito di alimentazione dell'aria, e dalla strumentazione necessaria per le misure di portata dei fluidi monofase, delle pressioni e delle temperature.

L'alimentazione dell'aria è assicurata dalla rete di servizio dell'aria compressa (pressione di circa 6 bar) e da un riduttore di pressione.
L'alimentazione dell'acqua è assicurata dal circuito (Fig. 2) costituito da una vasca, da due pompe esercite a numero di giri variabile, grazie all'impiego di un inverter, e da un collettore che distribuisce l'acqua ai circuiti di prova. La portata d'acqua può essere ottenuta sia utilizzando le pompe sia utilizzando il battente costante della vasca.
La portata di liquido viene misurata mediante un misuratore a ultrasuoni (Portaflow 330) utilizzato in reflex mode nel range 0-4000 l/h avente un'accuratezza compresa tra ±0.5% e ±2% del valore letto per velocità del fluido maggiori di 0.2 m/s e Di >75mm, ±3% del valore letto per velocità del fluido maggiori di 0.2 m/s e D_i compreso tra 13 mm e 75 mm o di ±6% del valore letto per velocità del fluido minori di 0.2 m/s.

Un banco di rotametri, aventi i range di misura riportati di seguito, è inoltre utilizzato per la misura più accurata delle basse portate:
- 0-100 l/h;
- 100-400 l/h

La portata d'aria è misurata, prima dell'invio al miscelatore, con un banco di rotametri aventi i seguenti campi di misura:
- 50-300 l/h;
- 500-5000 l/h;
- 6300 e 63000 Nl/h.

I rotametri, caratterizzati da un incertezza di misura pari al 2% del valore di fondo scala hanno quest'ultima riferita all'aria in condizioni normali (p = 1.013 bar e T = 20°C).
Poiché i rotametri sono esercitati alla pressione p, regolata con un riduttore di pressione, e alla temperatura T, pari alla temperatura ambiente, le portate indicate dalla scala devono essere convertite considerando le effettive condizioni termodinamiche dell'aria.
La portata volumetrica letta nel rotametro, è espressa in standard l/h tenendo conto delle effettive condizioni attraverso la seguente formula:

$$Q(p_0,T_0) = Q_{ASA}(p,T)\sqrt{\frac{p}{p_0}\frac{T_0}{T}} \qquad \textbf{(1)}$$

dove p_0=1.013 bar e T_0=20 °C.

La portata massica si ottiene quindi moltiplicando per la densità (calcolata in condizioni standard) la portata volumetrica.
La miscela bifase viene preparata in un miscelatore che alimenta un condotto avente lunghezza di 1800 mm e diametro interno 21 mm; nel miscelatore l'aria è introdotta in direzione radiale, mentre l'acqua può essere introdotta sia in direzione radiale che assiale in relazione alla portata che si desidera realizzare.
I segnali di portata e pressione vengono acquisiti utilizzando la scheda National Instruments DAQ system (NI USB-6218) tramite un programma sviluppato in ambiente LabView®.

I segnali del WMS vengono invece acquisiti utilizzando l'elettronica e il software appositamente sviluppati per il sensore [8], sincronizzando l'acquisizione con quella degli altri strumenti tramite l'utilizzo di un trigger.

Matrice Sperimentale

Prove Monofase

Una serie di prove con deflusso acqua e con deflusso aria sono state eseguite al fine di determinare la risposta degli strumenti in deflusso monofase e in particolare del venturi e del trasduttore per la misura di caduta di pressione dello SP. Le tabelle con i dati delle prove e i risultati sperimentali sono riportati in APPENDICE I.

Prove Bifase

Le prove in deflusso bifase sono state eseguite regolando le portate di aria e di acqua in un ampio range in modo tale da poter realizzare differenti flow patterns e gradi di vuoto al fine di valutare la risposta degli strumenti dello SP in differenti condizioni di deflusso.
Sono stati eseguiti 75 RUNs, ottenuti variando la portata di liquido tra 0.006 e 0.782 ks/s e la portata di gas tra 0.000084 e 0.0225 kg/s; il titolo ($x = W_g/W_{tot}$) corrispondente era compreso tra 0.00027 e 0.73.La matrice sperimentale realizzata è riportata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**. La tabella dei risultati sperimentali è riportata in APPENDICE II. I flow patterns, stimati con la mappa di Baker per deflussi orizzontali, sono riportati in Fig. 3, insieme al confronto con i flow patterns osservati. Le prove sono state eseguite a T = 20°C.

MATRICE SPERIMENTALE PROVE BIFASE						
	J_{water} [kg/s]	J_{air} [kg/s]	J_{tot} [kg/s]	p_{inlet} [bar]	ρ_{air} [kg/m^3]	x [-]
RUN 1	0.19	0.24	0.423345	1.016	1.208	0.00154
RUN 2	0.09	0.24	0.33024	1.002	1.192	0.00303
RUN 3	0.09	0.69	0.787898	1.002	1.191	0.00882
RUN 4	0.19	0.69	0.881003	1.018	1.210	0.00450
RUN 5	0.09	1.16	1.251093	1.006	1.197	0.01468
RUN 6	0.19	1.15	1.334822	1.027	1.221	0.00748
RUN 7	0.85	0.23	1.087408	1.223	1.455	0.00040
RUN 8	1.42	0.23	1.656926	1.562	1.858	0.00030
RUN 9	1.86	0.23	2.095782	1.838	2.185	0.00027
RUN 10	2.62	0.23	2.85469	2.603	3.096	0.00028
RUN 11	0.10	2.28	2.382376	1.017	1.209	0.02581
RUN 12	0.12	6.60	6.718977	1.030	1.225	0.06537
RUN 13	0.11	10.81	10.91639	1.059	1.260	0.11077
RUN 14	0.11	21.61	21.72576	1.238	1.473	0.22188
RUN 15	0.63	2.33	2.962632	1.270	1.511	0.00559
RUN 16	1.45	2.32	3.76215	1.971	2.344	0.00374
RUN 17	1.92	2.32	4.234149	2.469	2.936	0.00354
RUN 18	0.56	6.66	7.220514	1.266	1.506	0.01766
RUN 19	1.13	6.66	7.789271	2.246	2.671	0.01555
RUN 20	1.18	6.66	7.840323	2.376	2.825	0.01574
RUN 21	0.83	10.81	11.64144	2.139	2.543	0.03192
RUN 22	0.09	0.24	0.329326	1.048	1.247	0.00316
RUN 23	0.09	0.46	0.548768	1.047	1.245	0.00606
RUN 24	0.09	1.13	1.22273	1.053	1.252	0.01498
RUN 25	0.09	2.26	2.352356	1.057	1.257	0.02964

RUN 26	0.09	6.60	6.696293	1.087	1.293	0.08408
RUN 27	0.09	10.81	10.90011	1.124	1.337	0.13448
RUN 28	0.28	0.23	0.509037	1.073	1.277	0.00105
RUN 29	0.28	0.46	0.734978	1.079	1.283	0.00209
RUN 30	0.28	1.14	1.418473	1.097	1.305	0.00530
RUN 31	0.28	2.26	2.538566	1.128	1.341	0.01074
RUN 32	0.28	6.60	6.882503	1.211	1.440	0.03295
RUN 33	0.28	10.81	11.08632	1.309	1.557	0.05687
RUN 34	0.47	0.23	0.695247	1.112	1.323	0.00065
RUN 35	0.47	0.46	0.923083	1.126	1.339	0.00132
RUN 36	0.43	1.14	1.567441	1.159	1.379	0.00366
RUN 37	0.65	2.26	2.910985	1.289	1.532	0.00529
RUN 38	0.47	6.60	7.068713	1.405	1.671	0.02318
RUN 39	0.47	10.81	11.27253	1.533	1.824	0.04065
RUN 40	0.93	0.23	1.162647	1.277	1.518	0.00038
RUN 41	0.93	0.46	1.390495	1.296	1.541	0.00076
RUN 42	0.93	1.14	2.070208	1.424	1.693	0.00207
RUN 43	0.93	2.26	3.1903	1.574	1.872	0.00453
RUN 44	0.93	6.60	7.534238	2.084	2.478	0.01729
RUN 45	0.93	8.73	9.656337	2.255	2.682	0.02454
RUN 46	1.40	0.23	1.628172	1.542	1.834	0.00030
RUN 47	1.40	0.46	1.856019	1.611	1.916	0.00063
RUN 48	1.40	1.14	2.535733	1.750	2.081	0.00170
RUN 49	1.40	2.26	3.655825	1.938	2.305	0.00372
RUN 50	1.40	6.60	7.999763	2.627	3.124	0.01457
RUN 51	1.40	8.73	10.12186	2.889	3.435	0.02103
RUN 52	1.86	0.23	2.093697	1.850	2.200	0.00027
RUN 53	1.86	0.46	2.321544	2.015	2.396	0.00059
RUN 54	1.86	1.14	3.001258	2.226	2.648	0.00162
RUN 55	1.86	2.26	4.12135	2.437	2.898	0.00351
RUN 56	1.86	6.60	8.465288	3.321	3.949	0.01383
RUN 57	1.86	8.73	10.58739	3.664	4.357	0.02003
RUN 58	0.02	21.21	21.22859	1.163	1.382	0.61184
RUN 59	0.05	21.21	21.25652	1.222	1.453	0.39863
RUN 60	0.07	21.21	21.27514	1.236	1.470	0.32387
RUN 61	0.09	21.21	21.30308	1.291	1.535	0.25928
RUN 62	0.19	21.21	21.39618	1.431	1.702	0.16251
RUN 63	0.28	21.21	21.48929	1.631	1.940	0.12850
RUN 64	0.02	29.27	29.28412	1.281	1.523	0.70552
RUN 65	0.05	29.27	29.31206	1.348	1.603	0.50212
RUN 66	0.07	29.27	29.33068	1.378	1.639	0.42417
RUN 67	0.09	29.27	29.35861	1.458	1.734	0.35296
RUN 68	0.19	29.27	29.45171	1.670	1.986	0.23803
RUN 69	0.28	29.27	29.54482	1.934	2.300	0.19438
RUN 70	0.02	31.68	31.69732	1.327	1.578	0.72882
RUN 71	0.05	31.68	31.72526	1.475	1.754	0.54436
RUN 72	0.07	31.68	31.74388	1.499	1.782	0.46443
RUN 73	0.09	31.68	31.77181	1.515	1.802	0.38029
RUN 74	0.19	31.68	31.86491	1.849	2.198	0.27240
RUN 75	0.26	31.68	31.9394	2.001	2.380	0.22448

Tab. 1: Matrice Sperimentale Prove Bifase

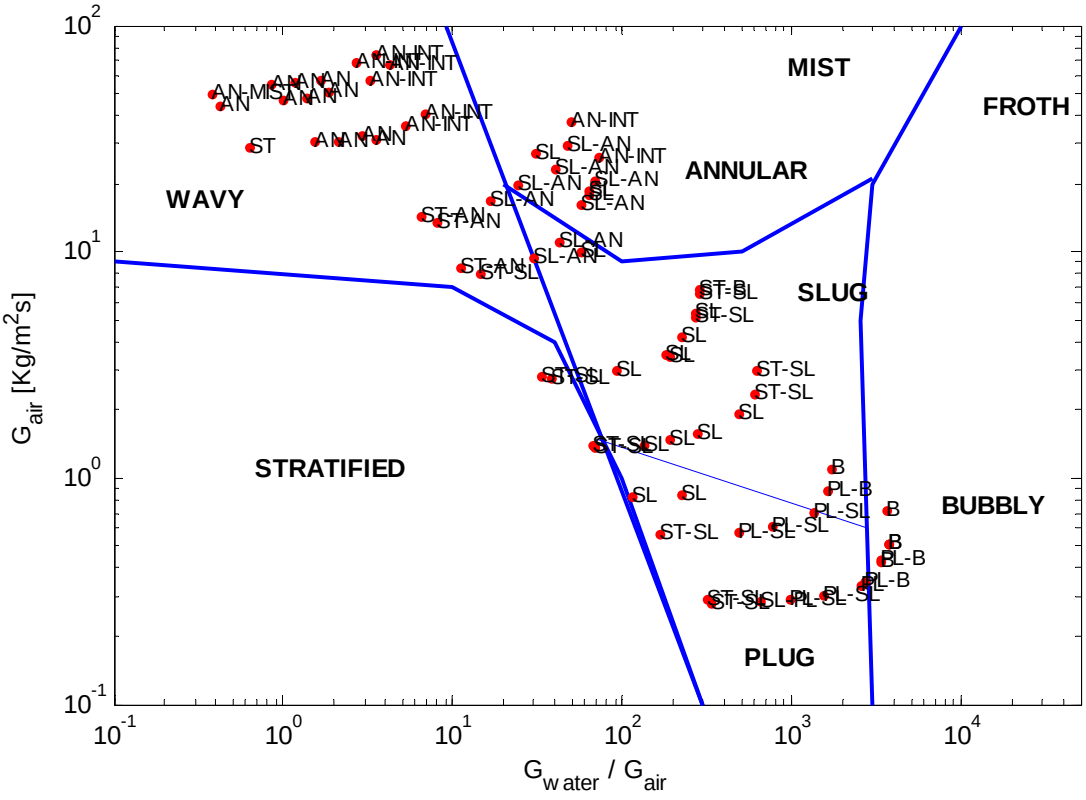


Fig. 3: Rappresentazione dei RUN sperimentali sulla mappa di Baker per deflussi orizzontali

Nel grafico di Fig. 3 ordinate e ascisse rappresentano rispettivamente la portata areica di aria e il rapporto tra le portate areiche delle due fasi.

Caratteristiche degli Strumenti dello Spool Piece e loro teoria

Nel presente studio si vuole verificare la possibilità di caratterizzare il deflusso aria-acqua mediante uno SP costituito da una venturi classico e un misuratore di grado di vuoto, nello specifico WMS.
Ovvero si intende formulare una metodologia per l'interpretazione dei segnali che consenta la stima della portata in massa delle fasi. Rispetto alle metodologie fin'ora utilizzate, l'utilizzo del WMS consente di ottenere importanti informazioni riguardo la distribuzione delle fasi all'interno della sezione del condotto e nel tempo. La conoscenza della topologia del deflusso e delle caratteristiche fluidodinamiche dei diversi flow patterns può essere quindi utilizzata nell'interpretazione dei segnali elettrici degli strumenti e nello sviluppo del modello dello SP.

Venturi

Il calcolo della portata di fluido, in deflusso monofase, tramite la misura della caduta di pressione all'interno di un restringimento della sezione del condotto, è uno dei metodi più utilizzati nelle

applicazioni industriali. Vari tipi di misuratori aventi differenti geometrie possono essere impiegati; i più noti sono gli orifizi e i venturi.
Numerose norme tecniche (ISO,UNI, DIN, ANSI, API, e ASME) definiscono gli standard tecnici per la costruzione, l'installazione e l'utilizzo di questi strumenti, evitando la necessità di una taratura, in applicazioni monofase.

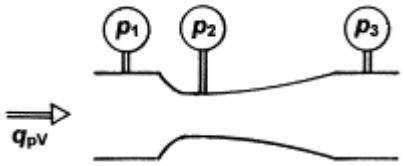


Fig. 4: Rappresentazione schematica del misuratore differenziale Venturi

Partendo dall'equazione di Bernoulli, che stabilisce la relazione tra energia cinetica e energia statica di una vena fluida, si ricava l'equazione generale per i misuratori di portata a pressione differenziale:

$$Q = CA_2\left(\frac{2\Delta p}{\rho\left(1-\beta^4\right)}\right)^{0.5} \qquad \textbf{(2)}$$

Q	Portata Volumetrica,
C	Coefficiente di scarico (adimensionato e specifico del tipo di misuratore)
A_2	Area contratta
$\Delta p = p_1 - p_2$	Caduta di pressione nel misuratore
p_1	Pressione a monte
p_2	Pressione nella sezione ristretta A_2 ,
$\beta = D_2/D_1$	Rapporto tra diametri (diam. a A_2/pipe diam.),
ρ	Densità del fluido

Se inoltre, si considerano gli effetti dovuti alla compressibilità del fluido e all'espansione termica, l'equazione diventa (Oliveira et all. (2008):

$$Q = \left[CA_2\left(\frac{2\Delta p}{\rho\left(1-\beta^4\right)}\right)^{0.5}\right]\cdot F_a \cdot Y \qquad \textbf{(3)}$$

F_a	Fattore di correzione di espansione termica
Y	Coefficiente di comprimibilità

I valori numerici del coefficiente F_a sono forniti dalla norma ISO5167e si basano su dati sperimentali.
Per liquidi (fluidi incomprimibili) F_a = 1
Per gas e vapore (fluidi comprimibili) 1< F_a
viene calcolato utilizzando formule e correlazioni dipendenti dal tipo di misuratore.

Il coefficiente di scarico C, funzione del tipo di misuratore, è inoltre dipendente dal numero di Reynolds e da β.
Ulteriori parametri correttivi possono essere introdotti nella derivazione di C, in funzione dello strumento di riferimento. Questi parametri possono essere sia di derivazione teorica che sperimentale e sono tabellati da American National Standards Institute (ANSI), da American Petroleum Institute (API), e da American Society of Mechanical Engineers (ASME).
Il coefficiente C è determinato in laboratorio, utilizzando procedure di misura standardizzate e strumenti campione. Le calibrazioni in-situ si rendono necessarie se i test di laboratorio non sono disponibili o se è richiesta un'accuratezza maggiore rispetto a quella fornita dalla calibrazione di laboratorio.

La dipendenza dal numero di Re è dovuta al fatto che la relazione esistente tra portata e caduta di pressione è modificata dal profilo di velocità che può essere laminare o turbolento a seconda del valore assunto da Re. Inoltre a seconda dell'intervallo di portata e dei parametri geometrici del venturi possono intervenire anche fenomeni di cavitazione e distacco della vena fluida.

I venturi, rispetto agli orifizi, sono meno sensibili ai profili di velocità e richiedono quindi tratti di calma più corti. Inoltre poiché non hanno parti in movimento ed sono poco soggetti a corrosione e erosione, non richiedono particolare manutenzione e rappresentano una valida alternativa per la scelta del misuratore di portata.

Il venturi Herschel [12], o venturi classico, è composto da un elemento lungo caratterizzato da un ingresso affusolato e un'uscita conico divergente. La pressione d'ingresso è misurata all'ingresso, e la pressione statica nella sezione ristretta.
Jitschin [13] ha effettuato una serie di misure sperimentali utilizzando un venturi classico e un orifizio. Trovò che il valore di *C* tende a 1 per elevate numeri di Reynolds, in accordo con DIN1952 e EN ISO 5167-1, che fornisce $C=0.990\pm0.005$ (in funzione della rugosità di parete) a $\mathrm{Re}>2\times10^5$. Il coefficiente di scarico decresce significativamente al decrescere di Re, a causa probabilmente di una maggiore influenza dell'attrito di parete.
L'equazione di Bernoulli evidenzia che la caduta di pressione attraverso il misuratore è proporzionale al quadrato della portata. Considerando questa relazione non lineare, si può notare che il 10 per cento della portata di fondo scala produce soltanto l'1% della pressione differenziale di fondo scala. Considerando anche l'accuratezza del trasmettitore, in linea generale la precisione del misuratore differenziale si degrada nella zona di misura vicina al limite inferiore del range di funzionamento dello strumento. Inoltre l'accuratezza di misura diminuisce per bassi numeri di Re.
In deflusso monofase l'accuratezza dei venturi è pari a circa ±0.2%. Questo significa che al 10% della portata di fondo scala l'incertezza relativamente bassa sulla misura della caduta di pressione si traduce in un incertezza del 20% sulla misura di portata. Per questo motivo il range di funzionamento dei venturi è solitamente limitato a 3:1 o 4:1 [14]

In alcune applicazioni, il misuratore di portata deve essere progettato con cura poiché variazioni di pressione e temperatura di esercizio possono influenzare notevolmente la misurazione del flusso. In altre parole, la densità del fluido può variare significativamente e come risultato, la pressione differenziale prodotta si modifica significativamente durante il funzionamento. La mancata compensazione di questi effetti può causare errori sulla misura di portata maggiori del 20% [14]. In

queste applicazioni, un software che consenta di compensare direttamente l'effetto pressione - temperatura è quindi fondamentale.

Modelli Venturi in deflusso bifase

Per quanto riguarda l'utilizzo del venturi per misure bifase, negli ultimi 40 anni, numerose ricerche hanno riguardato sia deflussi aria-acqua che deflussi acqua-vapore.
Per via delle sue caratteristiche infatti il venturi è preferito, nelle applicazioni bifase, ad altri misuratori differenziali:

- è meno soggetto a produrre blockage della fase liquida [15]
- ha una minima influenza sul deflusso [16]
- produce la minore perdita di carico e richiede le minori lunghezze di calma

La stima della portata bifase tramite l'utilizzo della correlazione monofase del venturi, nell'ipotesi di considerare il deflusso bifase come una miscela omogenea, ne sovrastima però il valore: questo è chiaramente causato da un aumento delle cadute di pressione nel bifase, prodotte dall'interazione tra le fasi liquida e gas.
Questa sovrastima viene solitamente corretta utilizzando correlazioni basate su dati sperimentali o modelli semi-empirici.

Baker [17] evidenzia 3 approcci maggiormente utilizzati:

- correzione del valore di densità, in modo da considerare la presenza di una seconda fase all'interno della miscela,
- correzione del coefficiente di scarico, in modo da considerare la presenza di una seconda fase,
- utilizzo dei moltiplicatori bifase per mettere in relazione la Δp bifase con la Δp monofase liquida o gassosa.

Le correlazioni attualmente utilizzate sono però derivate per range molto ristretti dei parametri di deflusso (pressione, temperatura, velocità delle fasi, titolo, tipi di fluido, etc..) e dipendono fortemente dai dati geometrici del misuratore (β, D_1, D_2, L, etc..). L'utilizzo delle correlazioni al di fuori del range prescritto comporta usualmente errori non accettabili nel calcolo della portata.
La maggior parte delle correlazioni sono comunque valide per bassi ($x<0.1$) o molto alti ($x>0.95$) valori di titolo.
I modelli di partenza utilizzati in deflusso bifase sono il modello omogeneo e il modello a fasi separate, dove la portata massica totale è ottenuta come:

$$\dot{m} = K \cdot \sqrt{\Delta p_{TP} \rho_{TP}} \qquad \textbf{(4)}$$

$$K = \frac{C \cdot F_a \cdot Y}{\sqrt{1-\beta^4}} A_2 \qquad \textbf{(5)}$$

Modello Omogeneo

Si assume che le due fasi siano miscelate omogeneamente, che abbiano la stessa velocità e siano in equilibrio termico. la densità della miscela può quindi essere scritta come:

$$\rho_{TP} = \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right)^{-1} \quad \textbf{(6)}$$

Modello a fasi separate

$$\rho_{TP} = \alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l \quad \textbf{(7)}$$

dove

m	portata massica della miscela (somma di portata liquida e gassosa) [kgs^{-1}]
ΔP_{TP}	caduta di pressione bifase [Pa]
ρ_{TP}	densità della miscela [kgm^{-3}]
ρ_l	densità del liquido [kgm^{-3}]
ρ_g	densità del gas [kgm^{-3}]
α	grado di vuoto
K	coefficiente di calibrazione monofase dello strumento

I valori assunti da C possono derivare da misure o dati monofase, o da specifiche calibrazioni in–situ, ove questo è possibile.

Oltre a questi modelli, sono disponibili numerose correlazioni di letteratura basate sulla correzione del valore di densità o sulla correzione del valore di pressione.
Ovviamente entrambi gli approcci implicano la conoscenza del valore del titolo e/o del grado di vuoto della miscela bifase, da qui la necessità di un secondo strumento necessario a ricavare l'informazione mancante.
Alcune correlazioni sono di seguito citate e riassunte in [2]:

- Murdock (1962),
- James, (1965),
- Bizon (1965),
- Lin (1982),
- Chisholm, (1974),

e più recentemente:

- de Leeuw (1997)
- Steven(2005)
- Xu and al. (2003),
- Moura and Marvillet (1997).

Caratteristiche del Venturi e Calibrazione Monofase

Le caratteristiche geometriche e di funzionamento del venturi utilizzato nel presente studio sono riportate in Tab. 2. Il misuratore differenziale è stato costruito dalla Bosco e C. di Torino secondo i criteri delle norme UNI, sebbene con dimensioni ridotte. Per questa tipologia di strumento la norma UNI fornisce il valore del coefficiente di scarico *C* in un definito range di numeri di Re e parametri geometrici:

$50\ mm \le D \le 250\ mm$
$0.4 \le \beta \le 0.75$
$2 \cdot 10^5 \le Re_D \le 1 \cdot 10^6$

il queste condizioni C_{UNI} = 0.995.

Poiché nelle condizioni di lavoro il numero di Re è inferiore a 10^5 e poiché la geometria di riferimento non è compresa nella normativa il coefficiente predetto non può essere utilizzato nel caso in esame.
Il coefficiente di scarico del misuratore C, è fornito come dato di targa per una caduta di pressione pari a 700 mmH_2O con una portata di acqua pari a 300 g/s. In queste condizioni il coefficiente C_{targa} = 0.9699 (Re = 20000).

Caratteristiche Venturi		UM
D	26	mm
d	10.251	mm
β	0.394	-
Δp	700	mmH_2O
W_{water}	300	g/s
$L_{upstream}$	500	mm
$L_{downstream}$	490	mm

Tab. 2: Caratteristiche Venturi

Il funzionamento monofase del venturi è stato verificato in laboratorio, dopo l'installazione nel circuito di prova dello SP. La risposta monofase acqua è stata confrontata con la risposta calcolata utilizzando i dati di targa dello strumento e con il coefficiente fornito dalla normativa. È stato quindi testato il comportamento dello strumento in deflusso monofase aria, come riportato in Fig. 5. Il coefficiente sperimentale aria e acqua è stato calcolato in base alle misure sperimentali di portata e pressione (Equazione (8)) considerando F_a e Y pari a uno:

$$C = \frac{Q}{F_a \cdot Y \cdot A_2} \cdot \left(\frac{\rho\left(1-\beta^4\right)}{2\Delta p} \right)^{0.5} \qquad \textbf{(8)}$$

Le curve ricavate sono riportate in Fig. 6 e rappresentate in funzione del numero di Reynolds.
Il grafico di Fig. 6 mostra chiaramente la dipendenza del coefficiente C dal numero di Reynolds; il valore di C è circa costante per numeri di Reynolds superiori a 15000 ma decresce rapidamente per numeri di Reynolds inferiori.
la normativa, applicabile come detto solo per diametri del venturi maggiori e per velocità del fluido più elevate, fornisce un coefficiente maggiore sia di quello di targa sia del valore ricavato sperimentalmente;

anche il coefficiente di targa, ricavato per Re= 20000 risulta essere leggermente più elevato del valore ricavato sperimentalmente ($C_{sperimentale}$ = 0.94 per 20000 ≤ Re ≤ 70000)

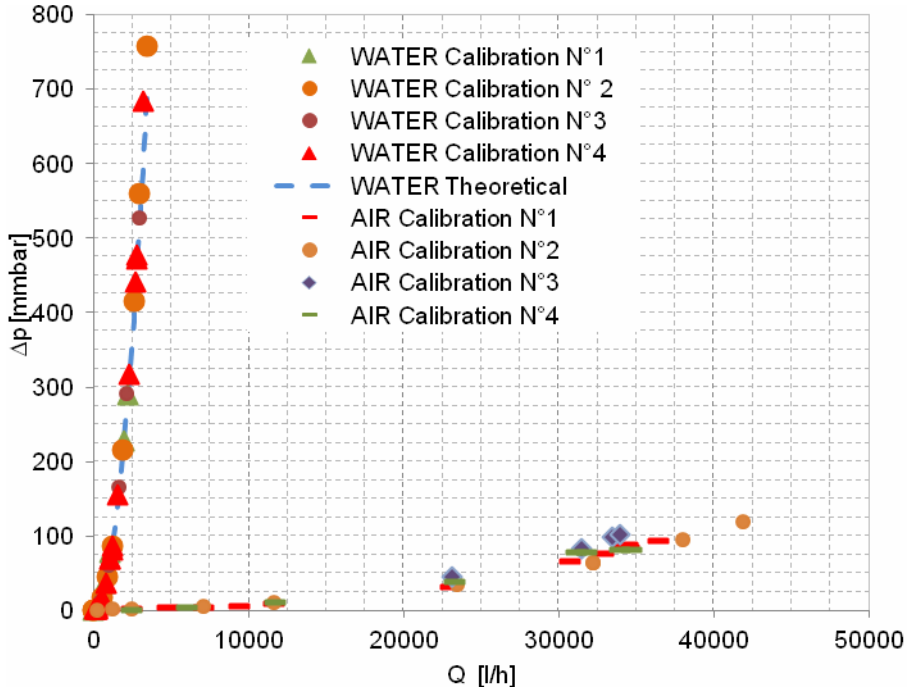


Fig. 5: Calibrazione monofase Venturi

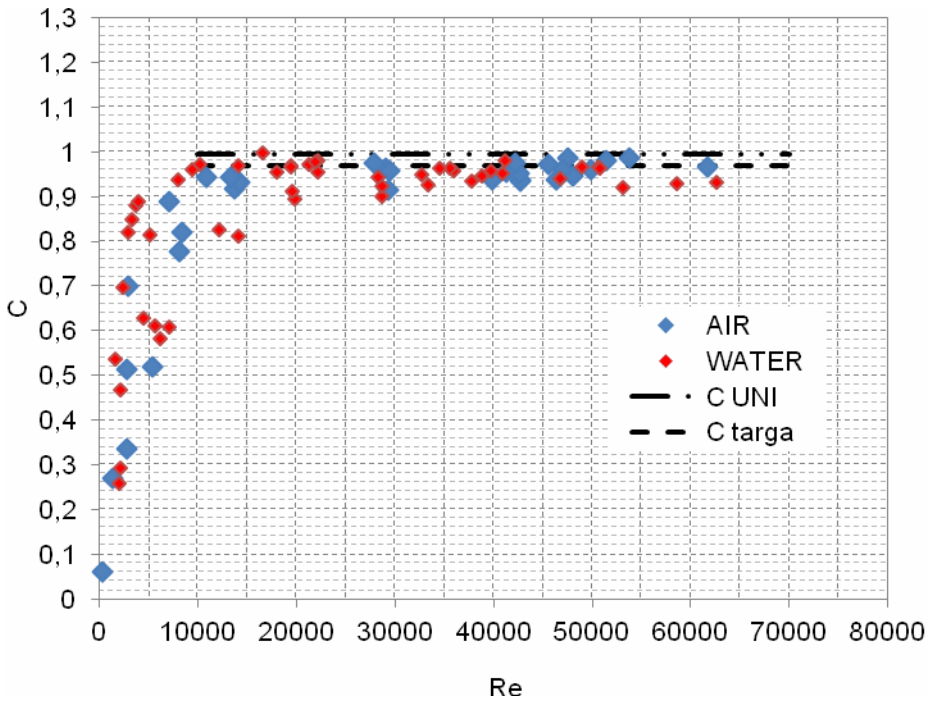


Fig. 6: Coefficiente di scarico sperimentale e normativo per il Venturi

La dipendenza dal numero di Reynolds può essere approssimata da una legge del tipo:

$$C = a + b \cdot \sqrt{\frac{10^c}{\mathrm{Re}^d}} \qquad (9)$$

dove i parametri *a*, *b*, *c* e *d* vengono ricavati da calibrazioni sperimentali.

Definizione di densità di miscela bifase "vista" dal Venturi

Nell'utilizzo del venturi in deflusso bifase, come primo step occorre definire un modello che consenta di calcolare la densità della miscela bifase (Equazione (4)). Come evidenziato da Friedel in [18] ad eccezione della densità gravitazionale le altre definizioni di densità bifase che vengono utilizzate in modelli e correlazioni non sempre hanno delle corrispondenze con la fisica del problema, e il loro utilizzo può portare a risultati erronei.
Mentre in deflusso monofase la definizione di densità è univoca, in deflusso bifase, a causa dello slip (rapporto tra le velocità medie delle fasi o slittamento) più tipi di densità possono essere definiti a seconda dell'equazione di conservazione considerata e molte definizioni possono essere estrapolate a seconda delle ipotesi effettuate sul tipo di deflusso (omogeneo, Equazione (6), a fasi separate, Equazione (7), etc..). Le differenti definizioni di densità bifase sono riportate in Tab. 3.

Nei grafici di Fig. 7-10 le densità, calcolate con i diversi modelli, sono riportate per le miscele acqua-aria e acqua-vapore a pressione ambiente e in pressione.

Basis	Mixture density	Submodel
Gravity	$\epsilon\rho_G = (1-\epsilon)\rho_L$	Void fraction ϵ according to Z. S. Rouhani $\epsilon = x^*/\rho_G[C_o/\rho_{hom} = W_D/m^*]^{-1}$ $C_o = 1 + 0.12\ (1-x^*)$ $w_D = 1.18\ (1-x^*)\ (g\sigma(\rho_L-\rho_G)/\rho_L^2)^{0.25}$ with $m^* = (M_G^* + M_L^*)/A_{pipe}$ $\rho_{hom} = (x^*/\rho_G + (1-x^*)/\rho_L)^{-1}$ $x^* = M_G^*/(M_G^* + M_L^*)$ $\epsilon^* = V_G^*/(V_G^* + V_L^*)$
Momentum balance	$[x^{*2}/(\epsilon\rho_G) + (1-x^*)^2/((1-\epsilon)\rho_L)]^{-1}$	
Kinetic energy balance	$[x^{*3}/(\epsilon^2\ \rho_G^2) + (1-x^*)^3/((1-\epsilon)^2\ \rho_L^2)]^{-1}$	
Homogeneous mixture	$\epsilon^*\rho_G + (1-\epsilon^*)\ \rho_L = (x^*/\rho_G + (1-x^*)/\rho_L)^{-1}$	
Superficial velocity	$(x^{*2}/\rho_G + (1-x^*)^2/\rho_L)^{-1}$	
Linear weighing	$x^*\rho_G + (1-x^*)\rho_L$	
Density addition	$[x^*/\sqrt{\rho_G} + (1-x^*)/\sqrt{\rho_L}]^{-2}$	Void fraction ϵ according to R. Huq $\epsilon = 1-2(1-x^*)^2/(1-2x^* + D)$ with $D = (1 + 2B(\rho_L/\rho_G-1))^{0.5}$ $B = 2x^*(1-x^*)$
Volume flux weighing	$(\epsilon^*/\rho_G + (1-\epsilon^*)/\rho_L)^{-1} \approx \rho_G$	
Ferrell Model	$\rho^2_{K\ in\ energy}/\rho_{hom}$	

Tab. 3: Modelli per il calcolo della densità bifase [18]

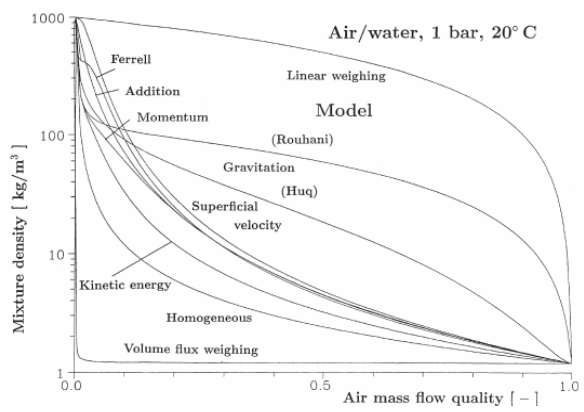


Fig. 7: Densità bifase aria-acqua a p = 1 bar in funzione del titolo per i diversi modelli

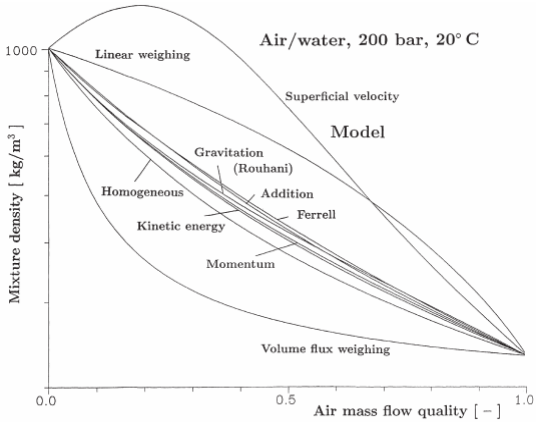


Fig. 8: Densità bifase aria-acqua a p = 200 bar in funzione del titolo per i diversi modelli

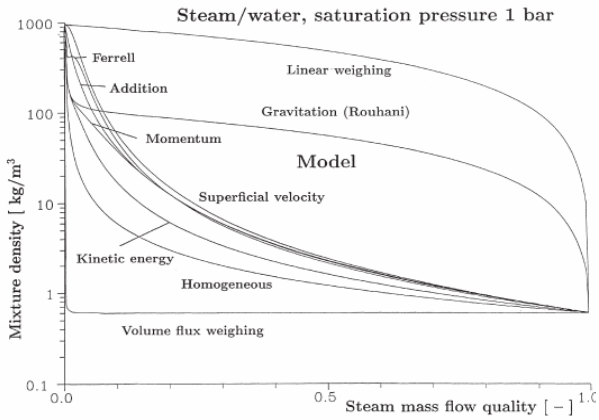


Fig. 9: Densità bifase acqua-vapore a p = 1 bar in funzione del titolo per i diversi modelli

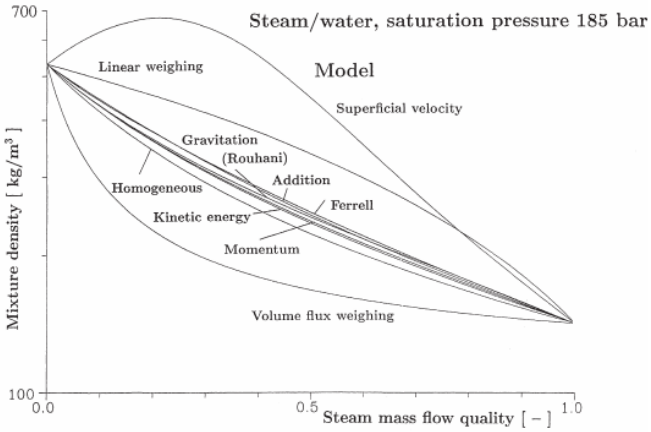


Fig. 10: Densità bifase acqua-vapore a p = 185 bar in funzione del titolo per i diversi modelli

Per definire quale "densità" possa essere introdotta nell'equazione del venturi (Equazione (3) e (4)) in coerenza con la fisica del problema, si è calcolata la risposta dello strumento (in termini di portata totale stimata) e il relativo coefficiente di scarico C utilizzando le espressioni di densità:

- da modello omogeneo
- da modello a fasi separate
- da equazione di bilancio della quantità di moto.

Le variazioni di densità, in funzione del titolo sperimentale, per i 3 modelli, sono riportate in Fig. 11.

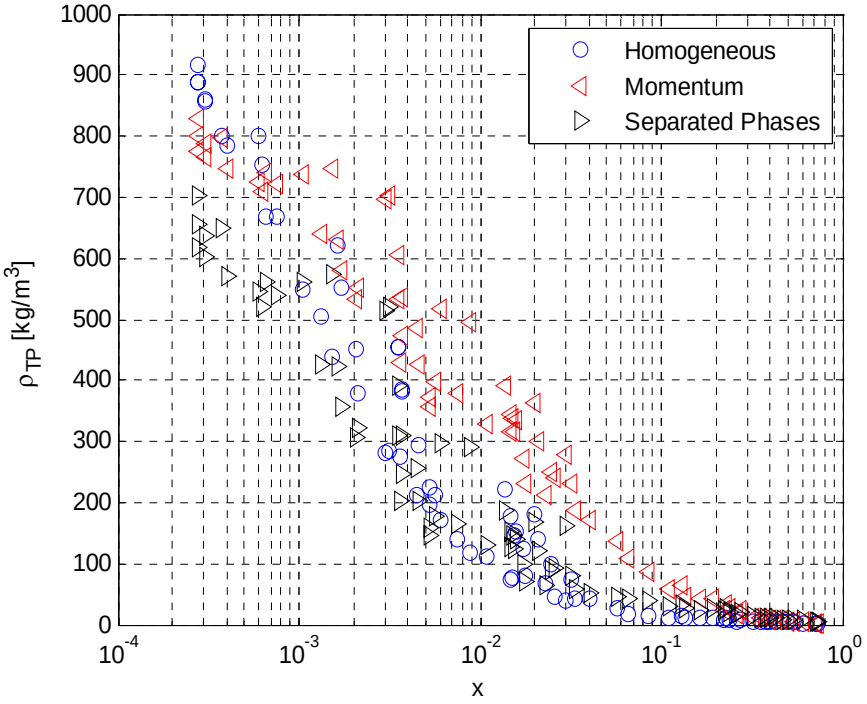


Fig. 11: Confronto tra densità della miscela bifase calcolate sulla base di modelli teorici

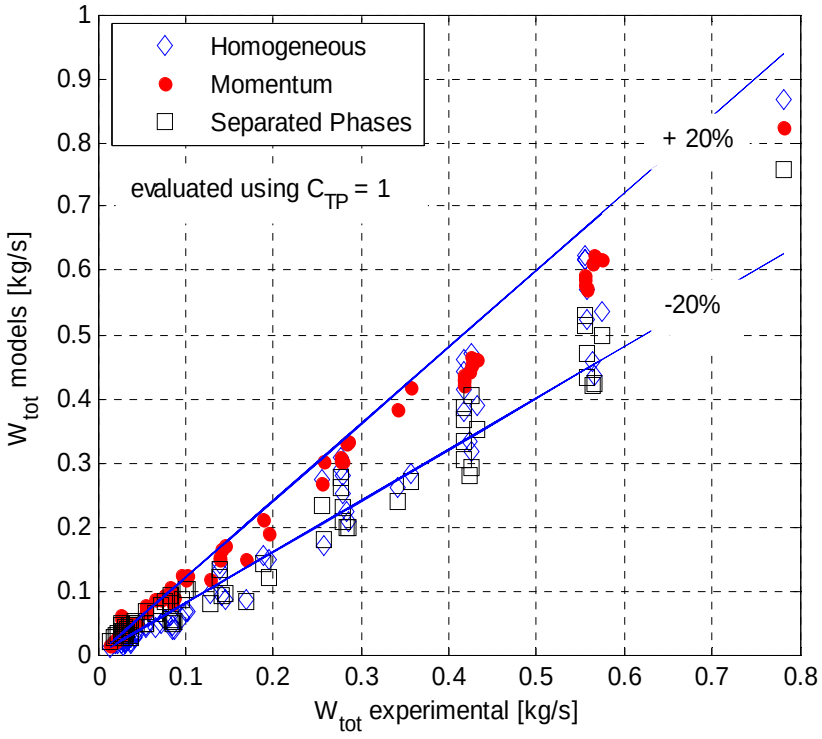


Fig. 12: Confronto tra W_{tot} bifase sperimentale e W_{tot} calcolata sulla base dei modelli di densità di miscela bifase

Utilizzando le densità bifase calcolate con i modelli esposti si è stimata la portata totale della miscela utilizzando un valore unitario del coefficiente di scarico del venturi in deflusso bifase, C_{TP}.

Nel grafico di Fig. 12 è riportato il confronto tra il valore sperimentale della portata totale della miscela bifase e il valore ottenuto utilizzando l'equazione (4) e l'equazione (5). Il valore della densità è stato calcolato utilizzando il modello omogeneo, il modello a fasi separate e il modello basato sulla conservazione della quantità di moto. Il valore di portata è stato ricavato imponendo un valore unitario al coefficiente C.

Sulla base dell'analisi effettuata, si è potuto concludere che, per quanto riguarda il venturi, la densità corrispondente è quella ricavata dall'equazione di conservazione della quantità di moto (Momentum Density). Come riportato in Fig. 13, il coefficiente di scarico C, ottenuto come

$$C_{TP} = \frac{W_{tot}}{F_a \cdot Y \cdot A_2} \cdot \left(\frac{\left(1-\beta^4\right)}{2\rho_{TP}\Delta p_{TP}} \right)^{0.5} \quad \textbf{(10)}$$

mostra una ridotta *standard deviation* rispetto a quelli ottenuti dagli altri modelli e un andamento coerente con il coefficiente ottenuto in deflusso monofase.
Il numero di Re bifase è stato calcolato utilizzando la densità ottenuta con il modello sopra descritto e con un valore di viscosità μ_{TP} calcolato come:

$$\mu_{TP} = \left(\frac{x^2}{\alpha \cdot \mu_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\cdot \mu_l} \right)^{-1} \quad \textbf{(11)}$$

La curva C-Re ricavata da un analisi di *best-fit* è di seguito riportata (Fig. 15):

$$\begin{cases} C_{TP} = a + b \cdot \sqrt{\dfrac{10^c}{\mathrm{Re}^d}} & \mathrm{Re} < 1.5 \cdot 10^4 \\ C_{TP} = 0.91 & \mathrm{Re} > 1.5 \cdot 10^4 \end{cases} \quad \textbf{(12)}$$

con

a=1.1, b=0.6, c=3.5 e *d=1*.

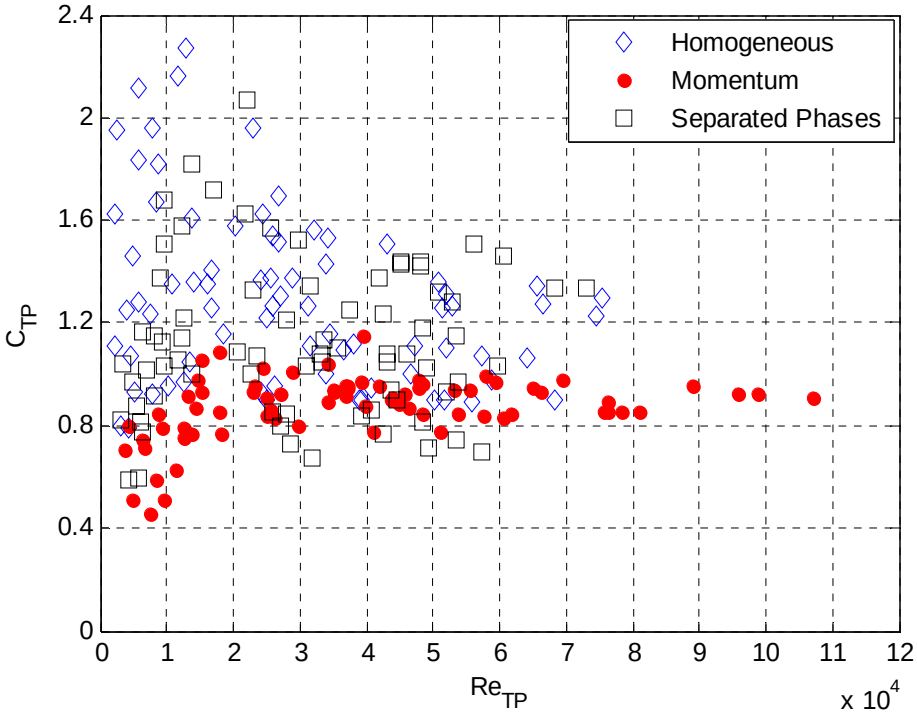


Fig. 13: Confronto tra coefficienti di scarico del venturi in deflusso bifase, ottenuti sulla base dei modelli di densità di miscela

Sulla base dei risultati ottenuti si evidenzia che il coefficiente di scarico in deflusso bifase è inferiore al valore assunto dal coefficiente in deflusso monofase, nel range di numeri di Re in cui può essere considerato costante. La variazione rispetto al caso monofase è da ricercare nei diversi fenomeni fluidodinamici che interessano un deflusso monofase e un deflusso bifase.

Il valore assunto dal coefficiente di deflusso nel caso monofase è da attribuire a fenomeni di distacco della vena fluida nella sezione convergente-divergente; nel caso bifase, la presenza di un interfaccia tra i due fluidi rende l'interpretazione del significato del coefficiente di scarico più complessa. Inoltre il valore di densità di miscela risulta essere fortemente correlato con il valore del coefficiente in quanto indice della distribuzione delle fasi all'interno dello strumento e della frazione massica delle fasi.

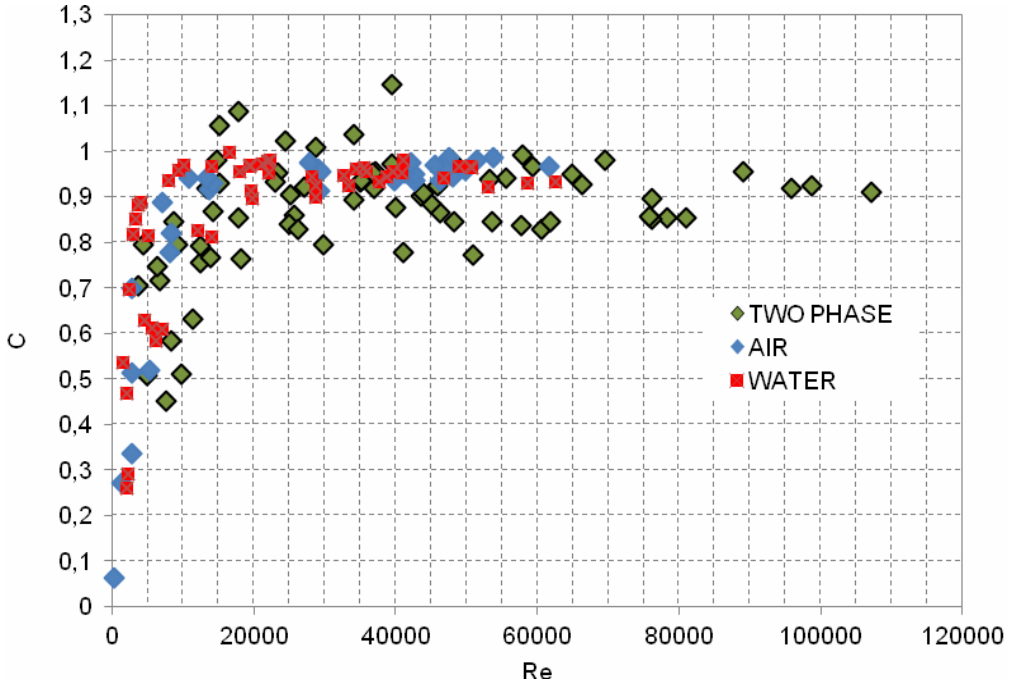


Fig. 14: Confronto tra coefficienti di scarico del Venturi in deflusso bifase e in deflusso monofase

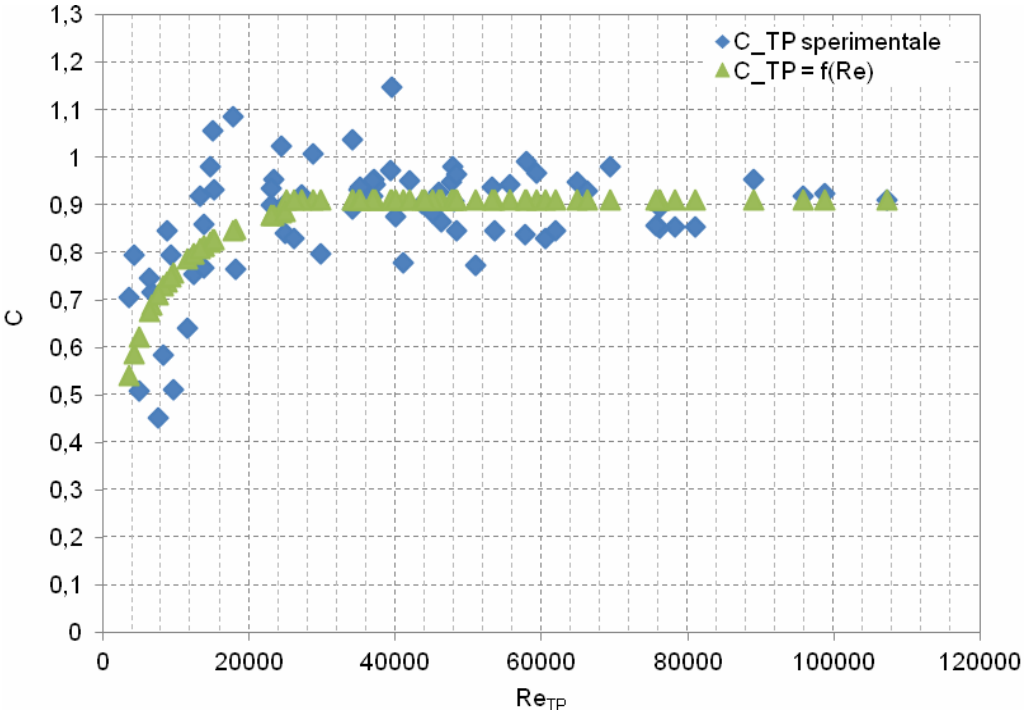


Fig. 15: Calibrazione Venturi Bifase *C =f(Re)*

Wire Mesh Sensor

Nell'ambito dell'attività LP2 "Reattori evolutivi INTD", il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, ha svolto un'attività di ricerca sperimentale atta a studiare la distribuzione delle fasi in un condotto percorso da un deflusso bifase aria-acqua con l'utilizzo della strumentazione speciale "Wire Mesh Sensor". I dettagli del lavoro sono presentati in [6-8]

Il Wire Mesh Sensor (WMS) è uno strumento composto da un sensore (griglia di elettrodi interni al condotto) e da un'elettronica che consente di misurare un segnale elettrico proporzionale al valore di conduttività locale. Il sensore sperimentato è riportato in Fig. 16.

Lo strumento utilizzato (WMS200) è stato sviluppato da Prasser [19] e prodotto presso la Teletronic Rossendorf GmbH, Dresden, per il circuito di prova del Politecnico di Torino. Lo strumento consente di studiare fluidi la cui conduttività elettrica è compresa tra 0.5 e 100 µS/cm.

Il sensore (Fig. 16) è stato progettato per coprire interamente la sezione del condotto (D_i = 19.5 mm). È composto da due file di elettrodi, equidistanti tra loro, che individuano due piani paralleli posti a una distanza di 1.5 mm. Il primo piano funge da trasmettitore mentre il secondo da ricevitore. Ogni piano è composto da 16 elettrodi paralleli (D_{wire} = 70 µm e passo pari a 1.31 mm) disposti perpendicolarmente rispetto agli elettrodi del piano adiacente. Per ogni coppia di elettrodi è generato un segnale proporzionale alla conduttività elettrica tra gli elettrodi.

Con un diametro dei fili pari a 70 µm circa il 5.4% della sezione è occupato dal sensore, mentre il restante 94.6% è superficie libera. Sebbene il sensore sia parzialmente intrusivo, questo svantaggio è compensato dall'alta risoluzione temporale e spaziale e dalla semplicità di analisi, che consente di effettuare misure dirette senza la necessità di algoritmi di ricostruzione dell'immagine come richiesto dalle tomografie classiche.

Il sensore è montato tra due flange in PVC adeguate all'installazione nel circuito di prova.

Ulteriori caratteristiche del sensore sono riportate in dettaglio in [6].

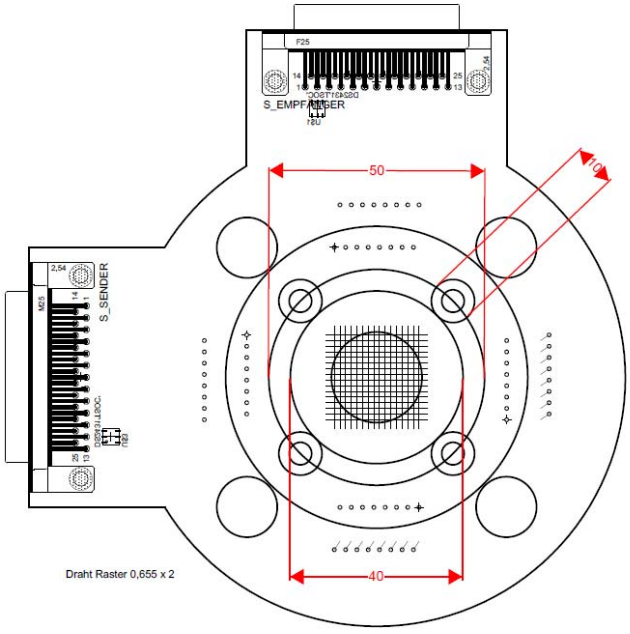


Fig. 16: Sensore 16x16 WMS200

Caratteristiche Wire Mesh Sensor (WMS200)		UM
Numero degli elettrodi in trasmissione	16	-

Numero degli elettrodi in ricezione	16	-
Massima frequenza nel processo di misura con 16 elettrodi in trasmissione	10	kHz
Ampiezza impulso trasmesso agli elettrodi di trasmissione	±3	V
Durata impulso	6 (short) - 12 (long)	µs

Tab. 4: Caratteristiche WMS200

Elaborazione dei segnali del WMS

Il WMS è costituito da due piani su ognuno dei quali giacciono 16 elettrodi, il valore locale istantaneo di conducibilità elettrica è misurato direttamente tra tutte le coppie di fili. Ciò si traduce in 16 × 16 punti di misura, che sono equamente distribuiti sulla sezione trasversale. Il concetto di frame associato al processo di misura si riduce quindi ad una matrice bidimensionale di 256 elementi (16 x 16) i cui valori sono costituiti da un numero proporzionale alla conducibilità elettrica del fluido osservato dalla singola coppia di elettrodi.
Il file di acquisizione dei dati sperimentali, realizzato con una frequenza di acquisizione, f, definita dall'operatore, è quindi rappresentabile con una matrice tridimensionale $V(i,j,k)$ in cui i e j si riferiscono alla posizione spaziale e l'indice k rappresenta l'indicazione temporale.
La procedura utilizzata per elaborare i segnali del WMS e di seguito descritta è stata sviluppata in [7-8].
Utilizzando i segnali registrati in condizioni statiche monofase aria e acqua il segnale prima di tutto normalizzato:

$$V^*(i,j,k)=\frac{V(i,j,k)-V_w(i,j)}{V_a(i,j)-V_w(i,j)} \qquad \textbf{(13)}$$

dove V_w e V_a rappresentano le matrici monofase acqua e aria rispettivamente.
Il valore V^*, assumendo una relazione lineare tra proprietà elettrica e grado di vuoto, risulta essere linearmente proporzionale alla grandezza di interesse, riferita a una sezione definita come l'area del quadrato avente lato pari al passo della mesh di misura [8].
Poiché alcuni punti della griglia di elettrodi sono posizionati vicino alle pareti o esternamente al condotto, occorre definire dei pesi che consentano di calcolare l'effettivo valore del segnale riferito al solo fluido.
Una matrice di pesi, $a(i,j)$, viene calcolata in funzione della posizione spaziale del punto di misura come s/p^2; dove p^2 (p = 1.3 mm è il passo della mesh) è l'area di riferimento e s è l'area che effettivamente si trova all'interno del condotto.
il valore di $a(i,j)$, sarà quindi pari a 1 se tutta l'area di riferimento si trova all'interno del condotto e minore di 1 se parte dell'area interseca la parete del condotto. In Fig. 17 è riportato lo schema del criterio utilizzato per la definizione della matrice $a(i,j)$.

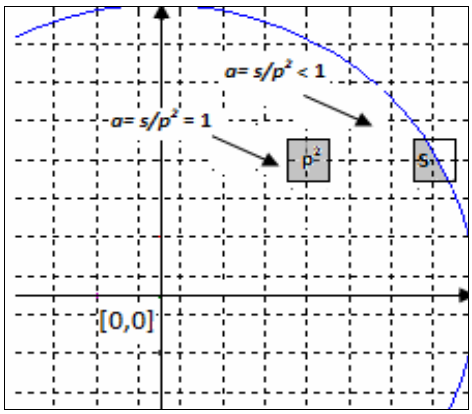


Fig. 17: Area di riferimento dei punti di misura e definizione dei pesi *a(i,j)*

Il grado di vuoto istantaneo e locale è quindi ricavato come:

$$\alpha(i,j,k)=\frac{V^*(i,j,k)-1}{a(i,j)}+1 \qquad \textbf{(14)}$$

Dalla storia temporale dei segnali, vengono estratti i valori medi locali del grado di vuoto; utilizzati per ricostruire i profili orizzontali e verticali della grandezza e per il riconoscimento del flow pattern:

$$\alpha(i,j)=\frac{1}{k_T}\cdot\sum_{k=1}^{k_T}\alpha(i,j,k) \qquad \textbf{(15)}$$

$$\sigma_a(i,j)=\left[\frac{1}{k_T}\cdot\sum_{k=1}^{k_T}(\alpha(i,j,k)-\alpha(i,j))^2\right]^{1/2} \qquad \textbf{(16)}$$

dove k_T è il numero di frame misurati (pari a $f{\cdot}T$), f è la frequenza di acquisizione e T è il tempo di misura. I valori di standard deviation vengono utilizzati per ottenere importanti informazioni circa la variazione temporale e spaziale del grado di vuoto e quindi sul tipo di deflusso realizzato.
Infine il valore medio temporale del grado di vuoto sulla sezione è valutato come:

$$\alpha(k)=\frac{1}{\sum_{i=1}^{16}\sum_{j=1}^{16}a(i,j)}\cdot\sum_{i=1}^{16}\sum_{j=1}^{16}\alpha(i,j,k)\cdot a(i,j) \qquad \textbf{(17)}$$

Calibrazione WMS: Confronto con grado di vuoto misurato con le valvole a chiusura rapida e con i modelli di letteratura

Il grado di vuoto, calcolato con il procedimento descritto nel precedente paragrafo, è stato confrontato con il valore ottenuto sperimentalmente utilizzando le valvole a chiusura rapida. Il confronto tra le curve α-x è riportato in Fig. 18. I valori di grado di vuoto ottenuti con le valvole a chiusura rapida rappresentano i valori medi di 10 intercettazioni effettuate nelle stesse condizioni di deflusso. Sebbene il grado di vuoto sia da intendere come volumetrico per quanto riguarda le intercettazioni e aerale per

quanto riguarda il WMS, si può vedere, dal confronto riportato in Fig. 18, che i valori sono consistenti; solo per bassi valori di titolo, corrispondenti a deflusso *stratified* e *bubbly*, il grado di vuoto misurato con le valvole risulta essere più piccolo del grado di vuoto calcolato a partire dai segnali del WMS.

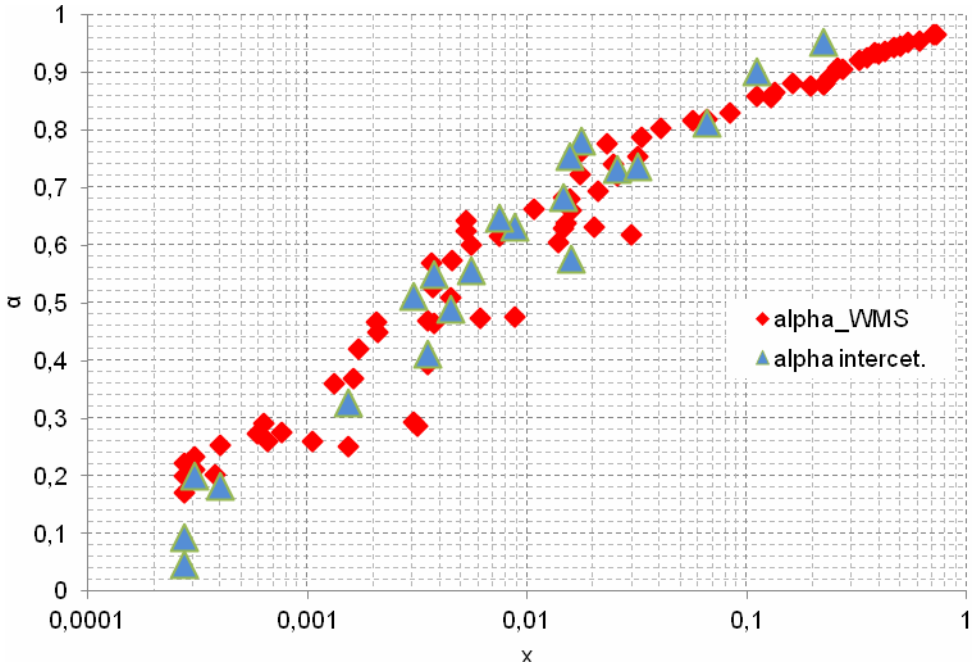


Fig. 18: Confronto α misurato tramite WMS e α misurato con le valvole di intercettazione

Il grado di vuoto sperimentale è stato quindi confrontato con i modelli di letteratura al fine di definire quale correlazione meglio rappresentasse la relazione α-x sperimentale.

Le curve di Fig. 19 rappresentano i gradi di vuoto ottenuti in funzione del titolo con le correlazioni di Lockhart-Martinelli, di Baroczy, di Chisholm e di Wallis, che vengono di seguito riportate.

Lockhart-Martinelli (1949):
$$\alpha = \left[1 + 0.28 \cdot \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.64} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.36} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.07}\right]^{-1} \quad \textbf{(18)}$$

Baroczy (1966):
$$\alpha = \left[1 + \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.74} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.65} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.13}\right]^{-1} \quad \textbf{(19)}$$

Chisholm (1983):
$$\alpha = \frac{1}{\alpha_h + (1-\alpha_h)^{0.5}} \alpha_h \quad \textbf{(20)}$$

Wallis (1969):
$$\alpha = \left[1 + X_{tt}^{0.8}\right]^{-0.38} \quad \textbf{(21)}$$

dove α_h è il grado di vuoto calcolato con il modello omogeneo, e X_{tt} è il parametro di Martinelli definito come:

$$X_{tt} = \left[\left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.1} \right] \quad \textbf{(22)}$$

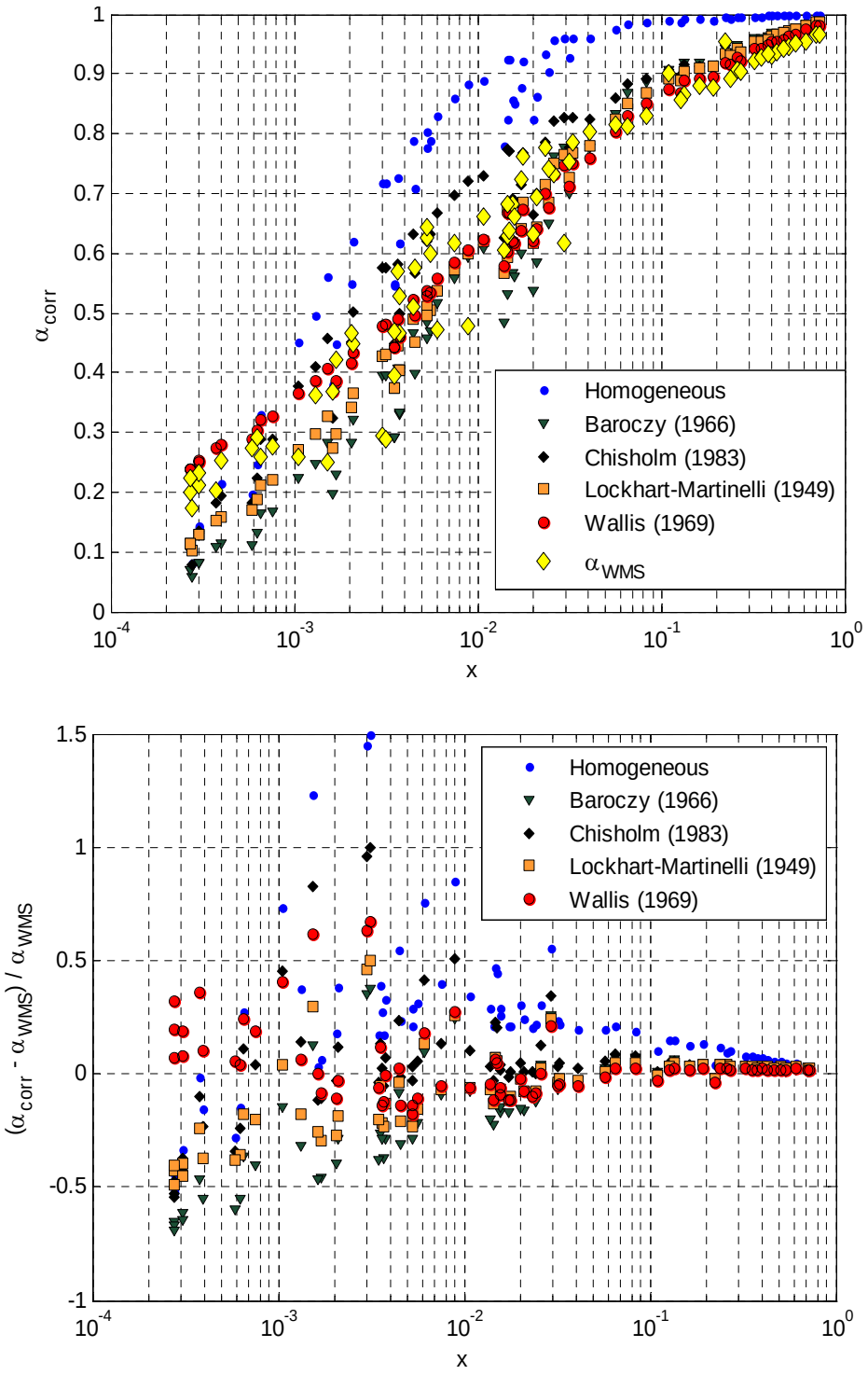


Fig. 19: Correlazioni x-α (sopra) e scostamenti rispetto ai valori sperimentali (sotto)

Dal confronto si evince che la correlazione di Lockhart-Martinelli e la correlazione di Wallis rappresentano bene la relazione sperimentale *x*-α, per valori del titolo superiori a 10^{-2}; mentre, come riportato nel grafico inferiore in Fig. 19, lo scarto rispetto ai valori sperimentali aumenta per bassi titoli.

Modello dello SP

Il modello dello SP, consiste di un set di equazioni che consentono di ricavare le portate delle fasi che scorrono nel condotto a partire dai segnali di

- WMS
- Venturi
- Pressione
- Temperatura

Dalle misure di pressione e temperatura si ricavano le proprietà delle singole fasi:

- densità
- viscosità

Dai segnali del WMS si ricava il valore di grado di vuoto medio sulla sezione utilizzando l'equazione (17) e altre informazioni, concernenti la disposizione delle fasi, che possano essere utili per interpretare i segnali del venturi e eventualmente correggere l'output del modello scelto. Il valore del grado di vuoto diventa quindi un input del modello del venturi. Come visto nei paragrafi precedenti, numerose correlazioni, aventi differenti campi di applicabilità sono disponibili in letteratura per modellizzare il comportamento del venturi quando interessato da un deflusso bifase.
Nel presente studio si è utilizzato un approccio iterativo come descritto di seguito e schematicamente riportato in Fig. 21.
Come input del modello vengono forniti il grado di vuoto medio sulla sezione, il valore medio delle cadute di pressione nel venturi e le proprietà delle fasi. Si introduce un valore *guess* del titolo che consente di calcolare, utilizzando una correlazione *x*-α, il grado di vuoto. Il grado di vuoto così calcolato viene confrontato con il grado di vuoto ottenuto dai segnali del WMS: fino a che lo scostamento non è inferiore a un determinato valore si aggiorna il valore del titolo. Ottenuta l'accuratezza desiderata si calcola la densità bifase, la viscosità della miscela e utilizzando come primo *guess* del coefficiente di scarico C_{TP} un valore pari a quello monofase liquido, si calcola il numero di Reynolds e la portata totale. Si itera quindi, fino ad ottenere un valore di convergenza del coefficiente e quindi della portata totale. Noto il titolo si calcolano quindi le portate delle singole fasi. Per *x*-α, si è utilizzata la correlazione di LM, corretta con coefficienti tarati sulle prove sperimentali eseguite durante la campagna sperimentale in esame (Equazione (23)). Il confronto tra i valori sperimentali e i valori ottenuti dalla correlazione è riportato in Fig. 20.

Come evidenziato nel grafico inferiore di Fig. 20, dove sono rappresentati gli scarti tra il grado di vuoto ricavato dal modello e il grado di vuoto misurato, gli scarti crescono al diminuire del titolo e sono massimi nella zona in cui il deflusso è intermittente. per valori di titolo superiori a 10^{-2} lo scarto è inferiore al 10%, mentre per valori di titolo minori di 10^{-3} è inferiore al 30%.

$$\begin{cases} \alpha = \left[1 + 0.2 \cdot \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.6} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.36} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.07}\right]^{-1} & x < 1 \cdot 10^{-3} \\ \alpha = \left[1 + 0.28 \cdot \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.6} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.36} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.07}\right]^{-1} & 10^{-3} \le x \le 6 \cdot 10^{-2} \\ \alpha = \left[1 + 0.45 \cdot \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.6} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.36} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.07}\right]^{-1} & x > 6 \cdot 10^{-2} \end{cases} \quad \textbf{(23)}$$

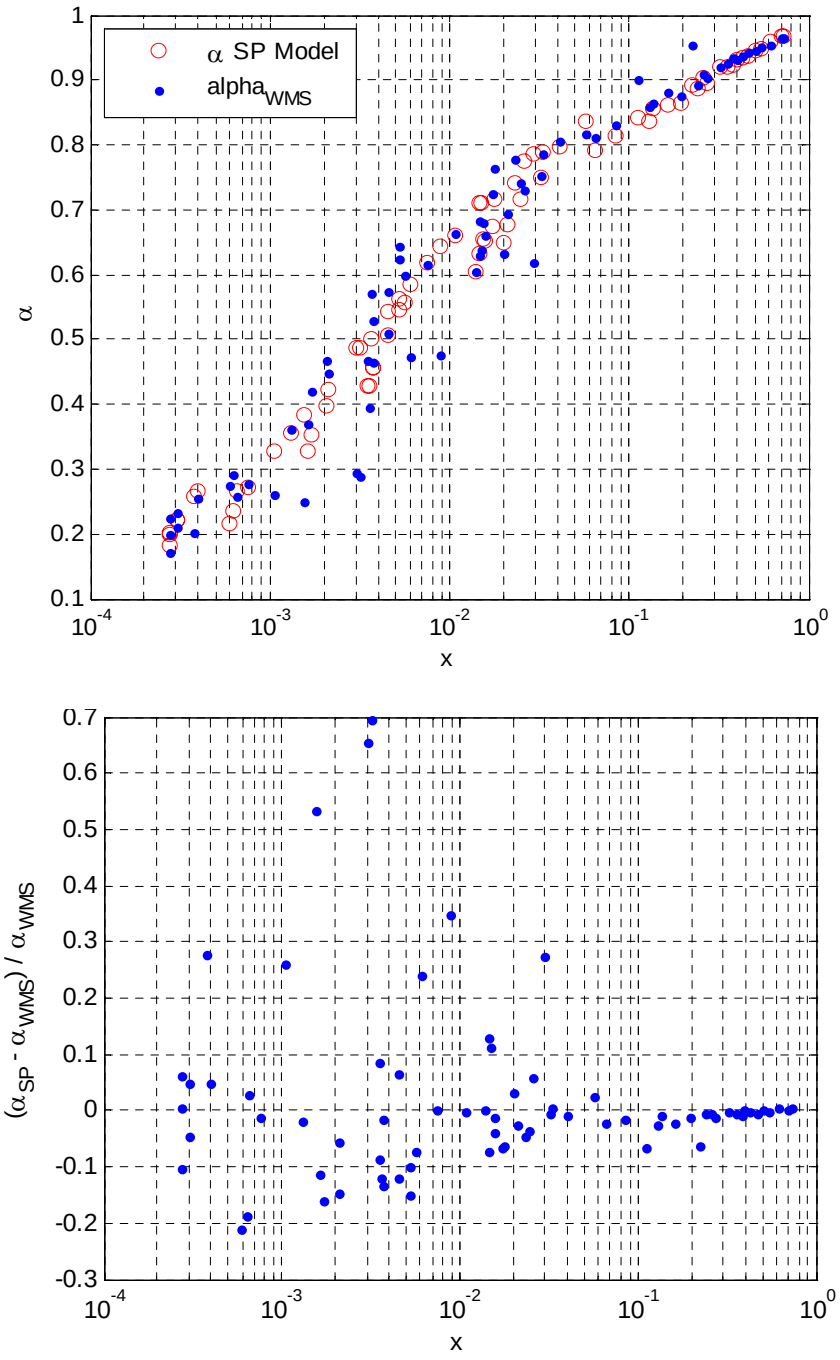


Fig. 20: Confronto curva x-α sperimentale e ottenuta dal modello dello SP

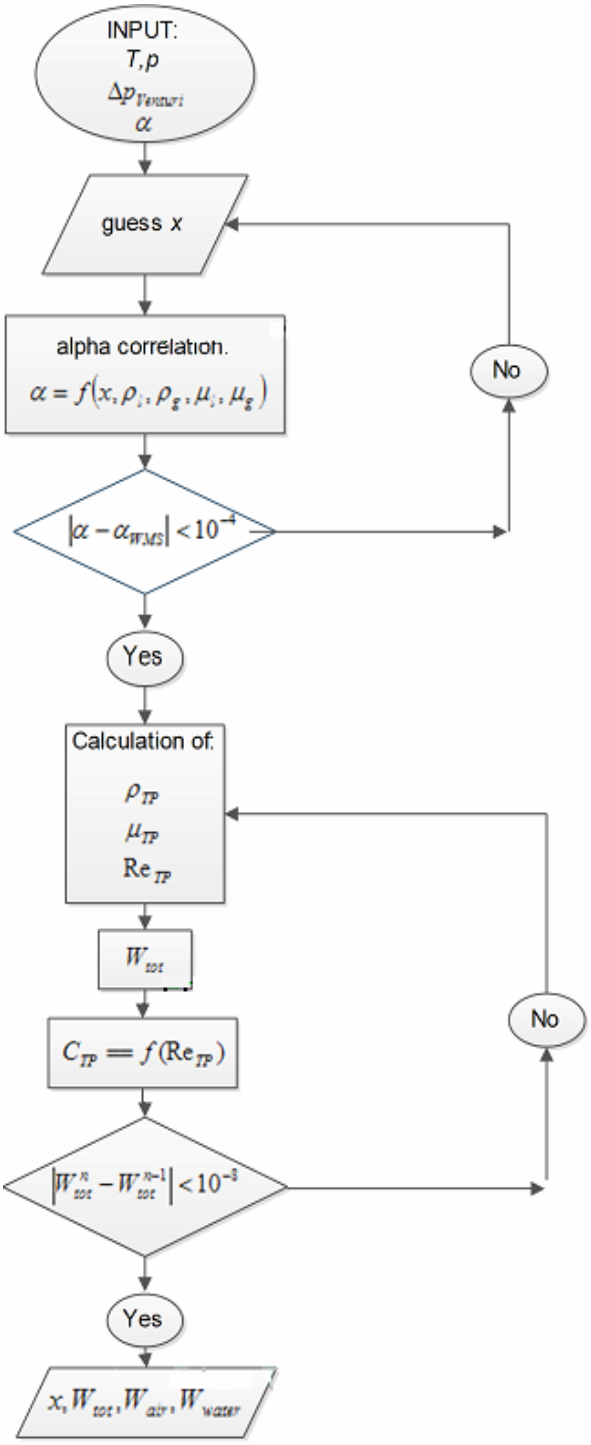


Fig. 21: Algoritmo di calcolo delle portate bifase

Procedura Sperimentale e Elaborazione dei Segnali

Nella procedura di prova adottata, il condotto viene, prima di tutto, asciugato e poi riempito di liquido in modo tale da misurare il valore di riferimento monofase (maschera) per il WMS, rispettivamente monofase aria e monofase acqua. Si fissano le portate delle due fasi (RUN) e si scelgono i misuratori aventi il range di misura più appropriato. Si procede quindi con la registrazione dei segnali una volta che il deflusso è sviluppato. I condotti di Plexiglass consentono di visualizzare il deflusso e definire il tipo di flow pattern corrispondente a ogni RUN. Nelle prove bifase i segnali degli strumenti dello SP, i valori delle portate monofase a monte della miscelazione e i valori delle pressioni vengono acquisiti per 30 s utilizzando una frequenza di acquisizione di 1250 Hz. I segnali vengono quindi elaborati in ambiente Matlab®.
Per quel che concerne il modello dello SP, si utilizzano i segnali mediati (media aritmetica) sui 30 secondi di acquisizione; un analisi degli andamenti temporali dei segnali degli strumenti, viene eseguita al fine di ricavare informazioni atte a classificare univocamente il deflusso.

Analisi dei risultati

Analisi del comportamento del venturi in deflusso bifase

In Fig. 22 sono riportate le cadute di pressione misurate nel venturi per le condizioni bifase testate. Nel grafico vengono riportate le cadute di pressione in funzione della portata massica totale e le curve ottenute in deflusso monofase aria e acqua. Come si evince, i valori delle cadute di pressione bifase sono contenuti nella regione di piano compresa tra le due parabole che definiscono la relazione Δp-W_{tot} in monofase.

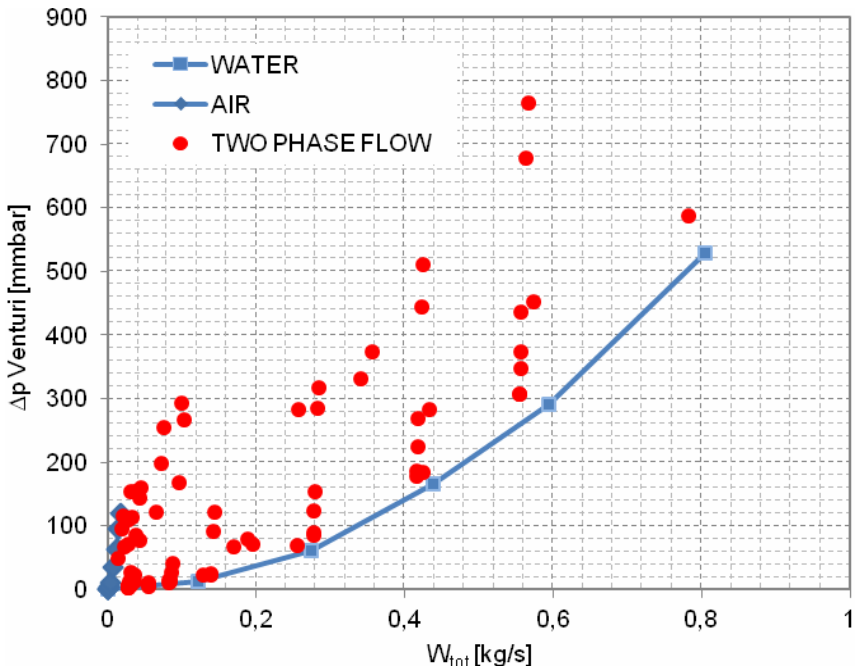


Fig. 22: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione della portata massica totale

Le pressioni differenziali registrate in deflusso bifase sono state quindi analizzate in modo tale da evidenziare le dipendenze dalle portate di fase liquida e gassosa, Fig. 23.

Le curve di Fig. 23 evidenziano chiaramente la stretta dipendenza del segnale del venturi dalla coppia delle velocità superficiali. Mantenendo costante la velocità di liquido e aumentando la portata di aria il segnale aumenta in modo regolare.

Lo studio di queste dipendenze è fondamentale nell'utilizzo del venturi come misuratore in condizioni bifase, in quanto consente di caratterizzare lo strumento e dovrebbe consentire la creazione di un modello che permetta di ricavare il titolo della miscela e la portata totale senza l'ausilio di correlazioni di letteratura o fattori correttivi di derivazione empirica.

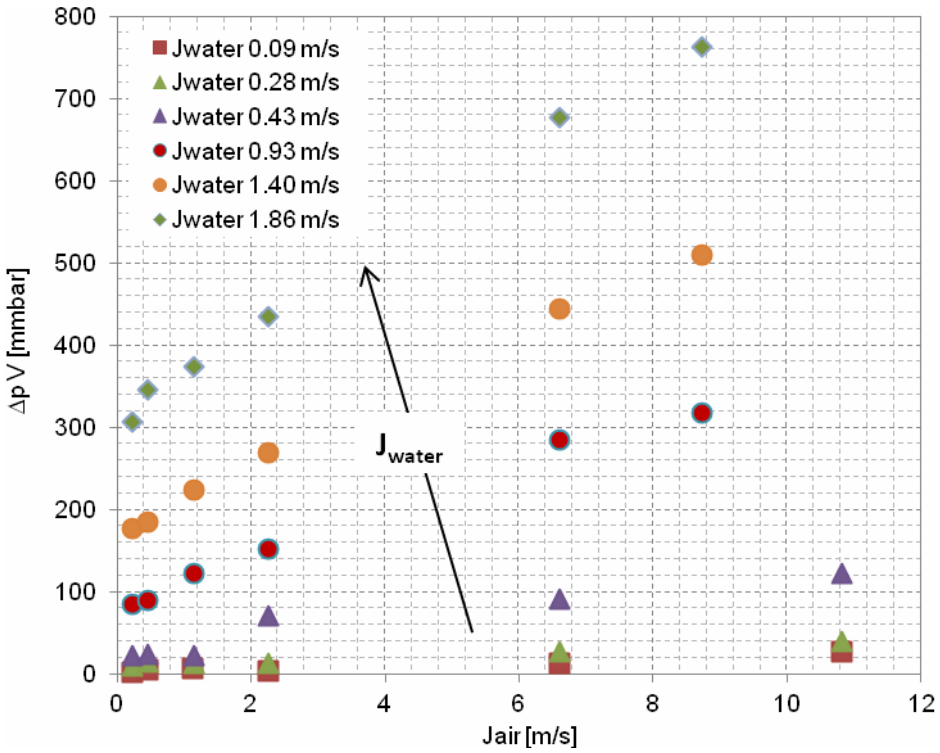


Fig. 23: Cadute di pressione bifase nel Venturi: dipendenza dalle portate delle fasi

In Fig. 24 è riportato il grafico in cui le cadute di pressione sono rappresentate in funzione della velocità superficiale di liquido e parametrizzate con il valore del titolo.

Poiché le prove sperimentali non sono state eseguite a titolo costante, il grafico riporta la parametrizzazione ottenuta suddividendo le prove a seconda del range di titolo sperimentato.

Dal grafico si può notare una forte dipendenza della risposta del venturi in funzione del titolo della miscela e in particolare si evidenziano forti variazioni di pendenza delle curve Δp-W per titoli inferiori a 0.005, compresi tra 0.01 e 0.05 e tra 0.1 e 1.

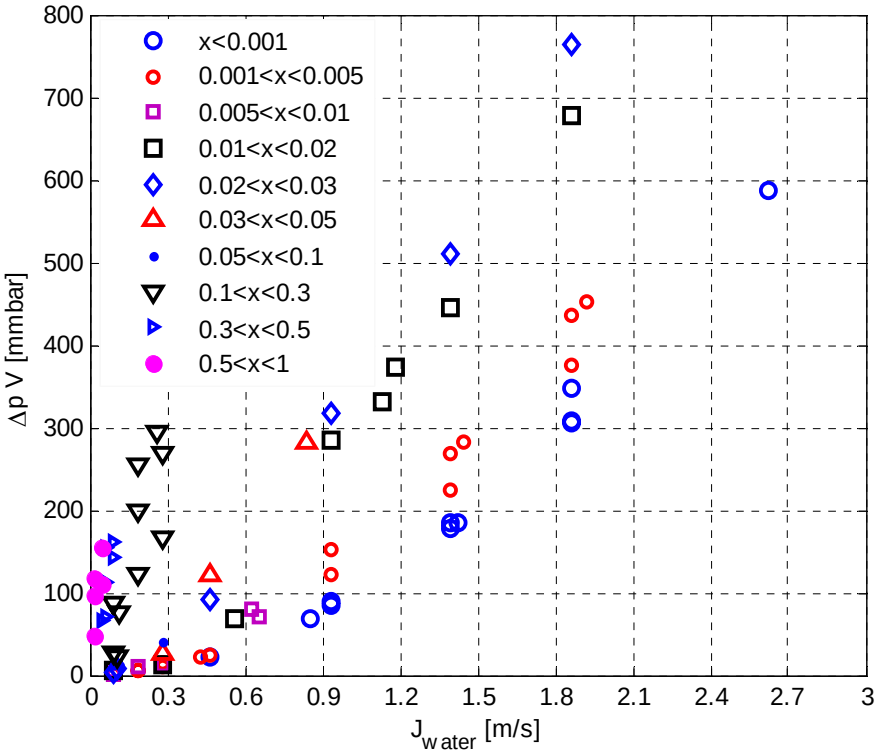


Fig. 24: Cadute di pressione bifase nel Venturi: dipendenza dal titolo

Analisi del comportamento dello SP

Utilizzando il modello dello SP descritto nel capitolo precedente, sono state ricavate le portate delle fasi a partire dai segnali (mediati sul tempo di acquisizione di 30 s) degli strumenti componenti lo SP.

In Fig. 25, è riportato il confronto tra il titolo ottenuto dal modello e il titolo misurato sperimentalmente. Lo scostamento percentuale è sempre inferiore al 20%, e nel 72% dei casi inferiore al 10%, per valori superiori a 0.1; per valori del titolo inferiori allo 0.1 lo scostamento aumenta, e l'errore percentuale supera in alcuni casi il 60%, rimanendo comunque al di sotto del 50% nel 90% dei casi, come mostrato in Fig. 26 e Fig. 27.

Una volta ricavato il titolo della miscela, si può calcolare la densità utilizzando la relazione ottenuta dal bilancio di quantità di moto e si può quindi procedere implementando la seconda parte del modello da cui si ricava iterativamente la portata totale, Fig. 28, e di conseguenza le portate di acqua, Fig. 29, e aria, Fig. 30.

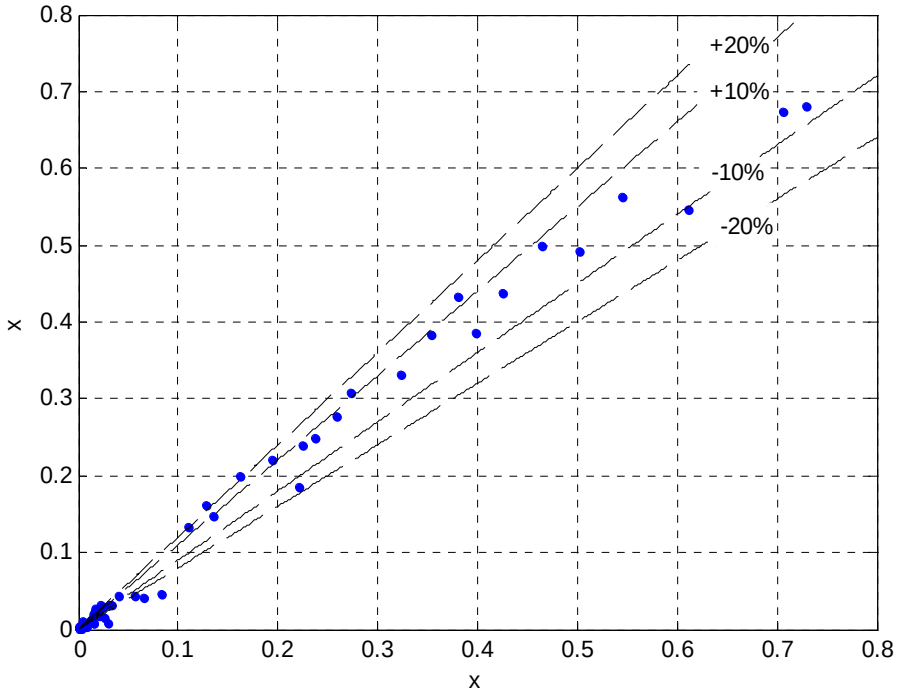


Fig. 25: Confronto tra titolo sperimentale e titolo ottenuto dal modello dello SP, scala lineare

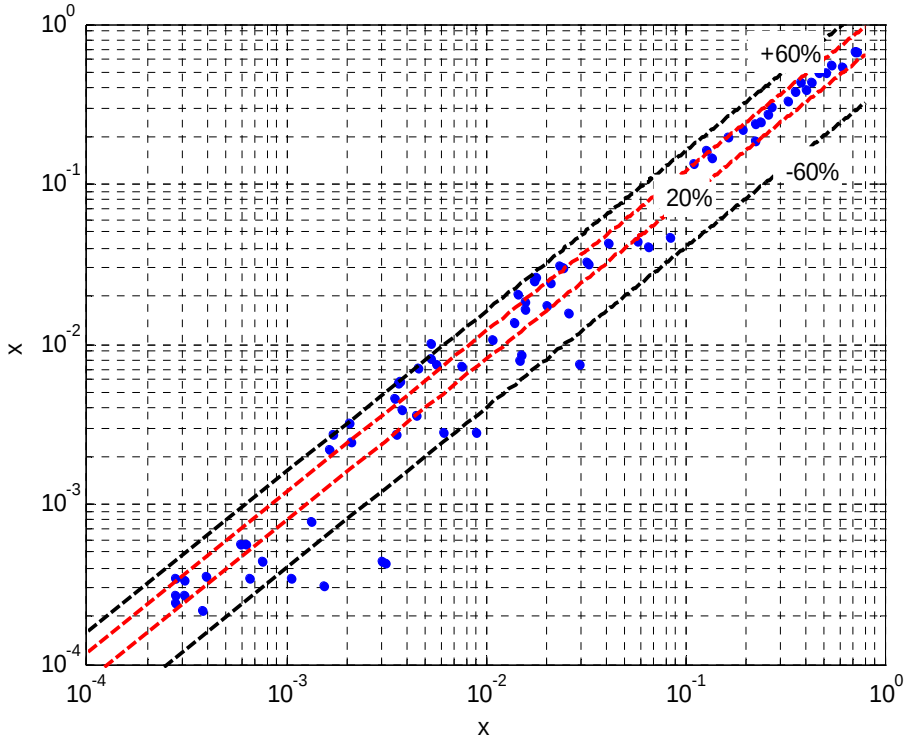


Fig. 26: Confronto tra titolo sperimentale e titolo ottenuto dal modello dello SP, scala logaritmica

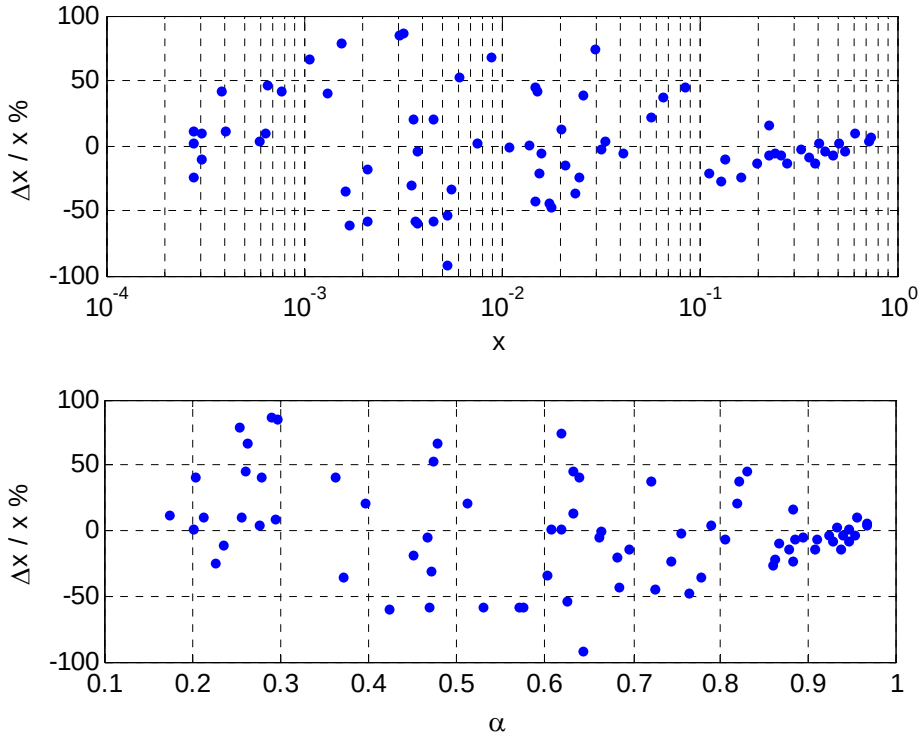


Fig. 27: Errore sul titolo ottenuto con il modello dello SP

Il modello sviluppato permette di stimare la portata totale della miscela bifase, come mostrato in Fig. 28 con un errore che nell'84% dei casi è inferiore al 20% e nel 73.3% dei casi è inferiore al 10%.

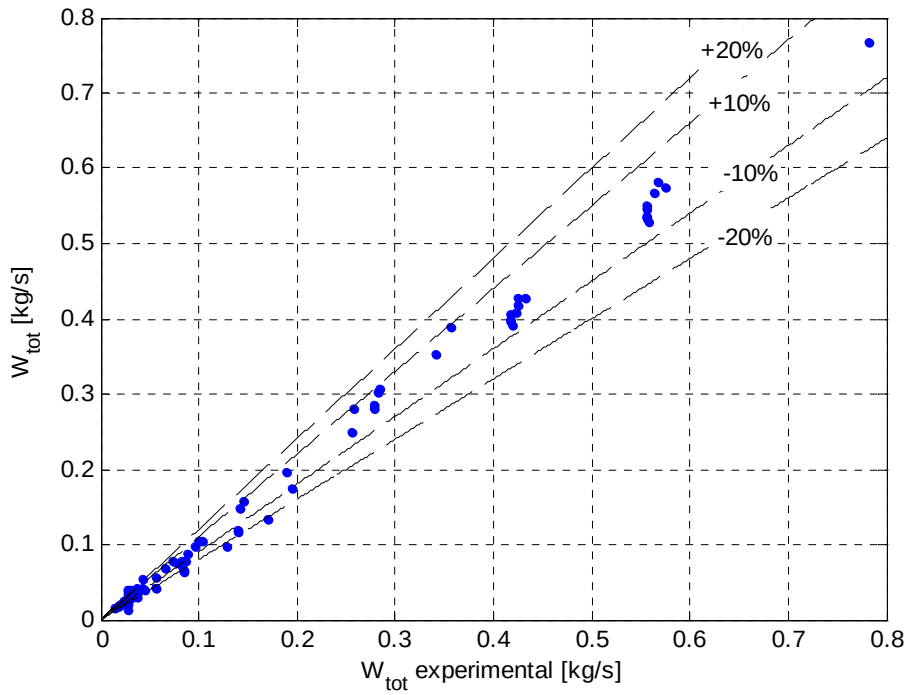


Fig. 28: Confronto portata totale sperimentale e ottenuta dal modello dello SP

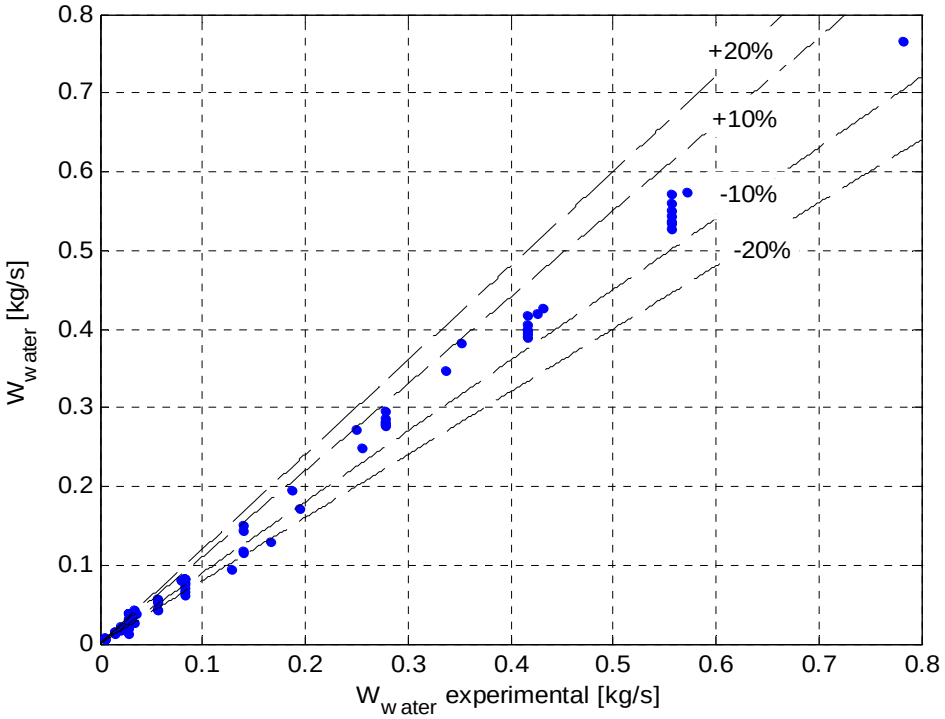


Fig. 29: Confronto portata acqua sperimentale e ottenuta dal modello dello SP

Le incertezze maggiori riguardano la stima della portata massica di aria, Fig. 30 che essendo numericamente più piccola di quella di acqua risente maggiormente degli errori associati alla stima del titolo e della portata totale. Anche in questo caso, il modello consente però di ottenere buoni risultati, con un errore sulla stima della portata di aria inferiore al 30% nel 73.3% dei casi e inferiore al 20% nel 53.5% dei casi testati.

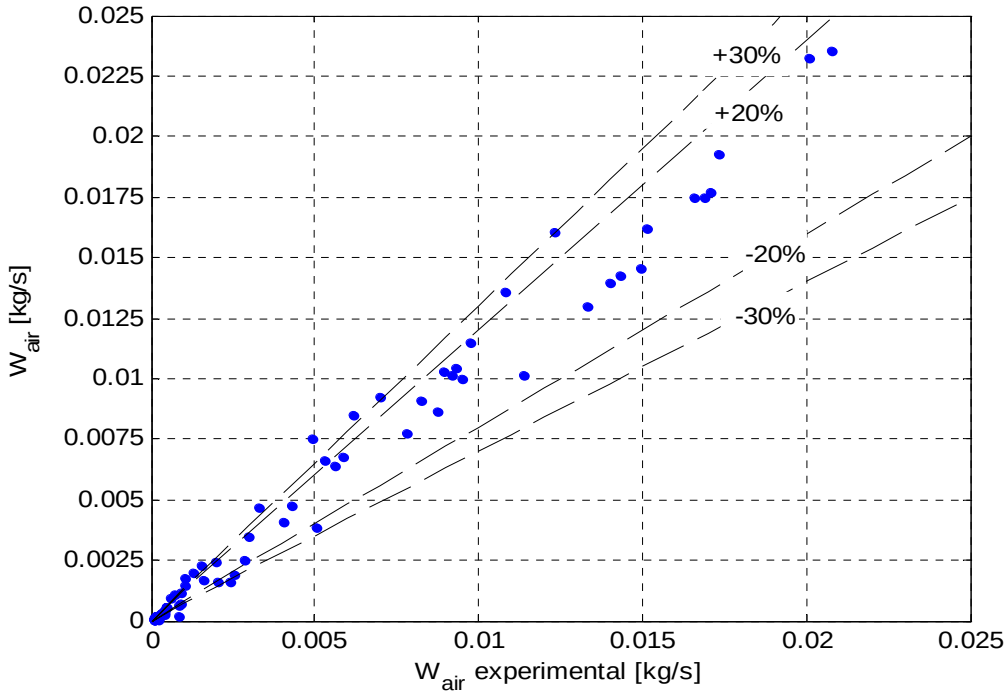


Fig. 30: Confronto portata aria sperimentale e ottenuta dal modello dello SP

Gli errori maggiori sulla stima delle grandezze fluidodinamiche si hanno in corrispondenza dei regimi di deflusso intermittenti, per i quali l'utilizzo di un valore medio delle grandezze può non essere adeguato a descrivere la fluidodinamica nella sua complessità.

In questi casi (ad esempio slug flow) una correlazione univoca x-α è poco consistente in quanto più valori del grado di vuoto possono caratterizzare il deflusso, anziché un unico grado di vuoto medio, come fin qui considerato.

Da qui l'importanza dell'identificazione dei flow pattern attraverso un metodo obiettivo e non basato sulle osservazioni visive.

Dall'analisi degli andamenti temporali dei segnali è possibile ricavare queste importanti informazioni.

Occorre però sottolineare che nel range sperimentato ai deflussi intermittenti corrisponde anche un valore coefficiente di deflusso del venturi fortemente dipendente dal numero di Reynolds; una stima errata del valore di questo parametro si traduce in un errore sulla stima di C e quindi a cascata sulla stima delle portate.

Classificazione dei flow pattern: profili di grado di vuoto e analisi del grado di vuoto medio temporale sulla sezione

L'utilizzo del WMS consente di ottenere informazioni, non solo sul grado di vuoto medio sulla sezione, ma anche sulla distribuzione delle fasi all'interno del condotto e quindi sul flow pattern.
Utilizzando le informazioni concernenti il deflusso che si instaura all'interno dello SP è possibile modificare il modello precedente, consentendo di ridurre l'incertezza sulla stima delle portate bifase utilizzando correlazioni sviluppate ad hoc per i regimi di deflusso sperimentati e completando la conoscenza dei parametri che caratterizzano il deflusso.
Come riportato in Fig. 3 e in Tab. 8, i flow pattern sperimentati spaziano da *stratified-wavy* a *bubbly*, e alcuni RUN sono stati eseguiti nelle zone di transizione tra due flow pattern differenti. Come emerge dal confronto tra i flow patterns osservati e i flow patterns previsti dalla mappa di Baker, la visualizzazione della topologia del deflusso non è un metodo obiettivo e specie per determinati deflussi e nelle zone di transizione, l'identificazione dei diversi flow patterns può non essere semplice. Inoltre, poiché nell'applicazione pratica non si ha la possibilità di visualizzare il deflusso e l'utilizzo della mappa richiede la conoscenza delle portate che si vogliono ricavare, occorre sviluppare un metodo obiettivo dipendente da parametri numerici per il riconoscimento del flow pattern. Per far ciò sono stati analizzati i profili cordali dei deflussi sperimentati insieme alle funzioni di densità e agli spettri in frequenza del grado di vuoto. In Fig. 31 (a) è riportato il profilo cordale medio temporale ottenuto sulla corda più prossima alla mezzeria del canale (j=8). Considerando trascurabili gli effetti della curvatura del canale sulla distribuzione delle fasi, come verificato dall'analisi dei profili cordali orizzontali, il profilo cordale sulla mezzeria può essere considerato rappresentativo della distribuzione delle fasi all'interno del canale.
Le curve di Fig. 31 (a) evidenziano le differenze, le unicità e le somiglianze sulla distribuzione delle fasi nei differenti flow pattern. Il deflusso *bubbly* (B) è caratterizzato da un profilo piatto, lievemente influenzato dall'effetto della gravità, mentre il profilo relativo al deflusso *stratified* (ST) può essere suddiviso in tre zone caratteristiche: una inferiore in cui si trova il film liquido (α=0), una superiore in cui si concentra la fase gassosa (α=1), e una zona di transizione tra le fasi; questa zona può essere più o

meno piatta a seconda dell'ondosità del deflusso. Il deflusso *annular* (AN), si distingue dal deflusso *stratified* perché tutta la zona centrale del condotto è caratterizzata da un grado di vuoto pari a uno, mentre nella zona inferiore e superiore il grado di vuoto assume un valore inferiore a causa della presenza del sottile film liquido. come si vede dal grafico il film liquido nella parte superiore non è facilmente individuabile poiché a causa della gravità può avere spessori molto sottili, mentre nella parte inferiore si nota anche la zona di transizione tra le fasi causata dai fenomeni di ondosità all'interfaccia. In tutte le curve si evidenzia la presenza di liquido nella zona superiore del condotto; questa percentuale di liquido potrebbe essere dovuta a fenomeni di bagnamento dei fili de WMS e soprattutto a fenomeni di bagnamento della parete superiore del condotto. In Fig. 31 (b) sono riportati i profili di *standard deviation* relativi alle curve di Fig. 31 (a).

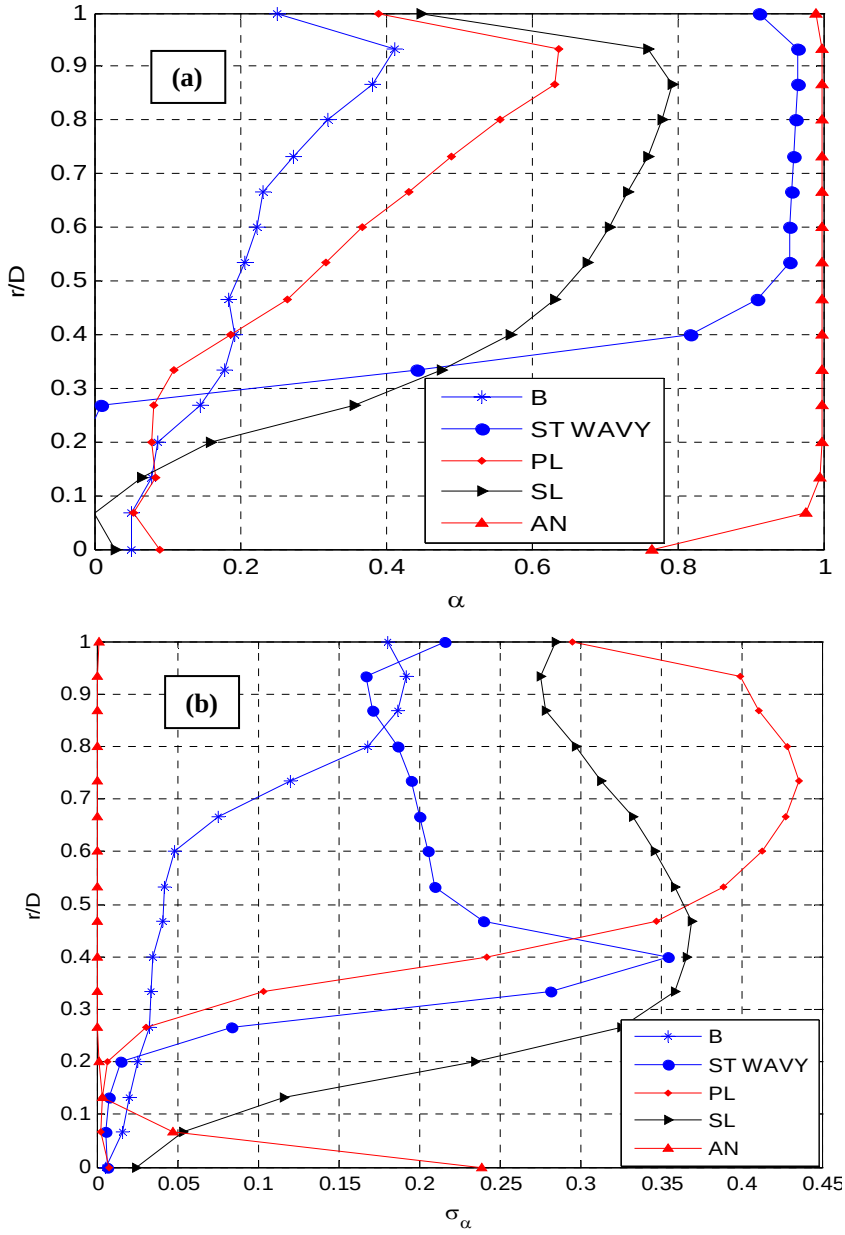


Fig. 31: Profilo verticale medio del grado di vuoto per i flow patterns sperimentati (a) e relativo profilo di standard deviation (b)

Dal profilo di *standard deviation* del grado di vuoto si possono estrarre importanti informazioni caratterizzanti il deflusso:

- il deflusso *annular* è caratterizzato dal un valore di σ_α circa nullo su tutta la sezione tranne che nella zona inferiore dove si concentra il film liquido e quindi l'interfaccia tra le fasi; il massimo valore di σ_α si ha in corrispondenza del punto di misura prossimo alla parete, poiché gli spessori del film, come detto, sono molto sottili;
- nel deflusso *stratified* è chiaramente evidenziata, dal profilo di σ_α, la zona di interfaccia e quindi indirettamente l'altezza del film liquido.

Dall'analisi dei profili di α e σ_α è possibile identificare chiaramente il deflusso stratificato e distinguere tra deflusso anulare e stratificato, mentre risulta più complesso trovare degli indicatori che consentano di distinguere tra deflusso *slug* e *plug* e deflusso *bubbly.*

Per questo motivo occorre introdurre ulteriori classificatori di deflusso. All'analisi dei profili cordali si è quindi associata un analisi temporale del grado di vuoto medio sulla sezione. Come riportato in Fig. 32 e Fig. 33, dal segnale temporale si sono estratte le curve relative alla distribuzione di densità di α e la relativa analisi in frequenza. Per quanto riguarda l'analisi in frequenza, si è utilizzata la Fast Fourier Transform (FFT) per estrarre il contenuto di energia del segnale alle varie frequenze; il valore dell'Ampiezza, riportato nei grafici di Fig. 33 e seguenti, è stato valutato come valore assoluto dell'output fornito dall'algoritmo *fft* di MATLAB®.

Dalle curve di distribuzione sono chiaramente identificabili il deflusso anulare e il deflusso a bolle, caratterizzati rispettivamente da un picco della distribuzione a elevati gradi di vuoto e a bassi gradi di vuoto. Il deflusso *stratified wavy* è caratterizzato da un picco che dipende dall'altezza raggiunta dal film liquido e da picchi secondari dovuti all'ondosità dell'interfaccia e alla presenza in taluni casi di precursori di *slugs*. I deflussi intermittenti, *slug* e *plug*, sono invece caratterizzati dalla presenza di due picchi, uno a bassi valori del grado di vuoto e uno a alti valori. La preponderanza di un picco rispetto all'altro dipende dalle condizioni di deflusso.

Dall'analisi in frequenza, Fig. 33, si evince inoltre che, mentre i deflussi *annular* e *bubbly* sono caratterizzati da uno spettro piatto, i deflussi *slug* e *plug* sono identificabili tramite una o più frequenza caratteristiche.

Utilizzando le informazioni ricavate dai profili cordali, dalle funzioni di densità di distribuzione e dall'analisi spettrale si possono distinguere 4 macro *flow patterns*:

- *bubbly*
- *annular*
- *stratified*
- *slug-plug*

Classificatori *bubbly flow*: picco di densità di distribuzione a $\alpha<0.5$ e spettro piatto.
Classificatori *annular flow*: picco di densità di distribuzione a $\alpha>0.8$ e spettro piatto. il profilo del grado di vuoto è suddivisibile in 3 zone (film-core-film) con la zona centrale caratterizzata da grado di vuoto unitario e *standard deviation* molto bassa.
Classificatori *stratified flow*: picco di densità di distribuzione a $\alpha>0.5$ con picchi minori se sono presenti ondosità, rilevate dall'analisi spettrale. Il profilo cordale è suddiviso in 3 zone caratteristiche (liquido-

interfaccia-gas) e la posizione dell'interfaccia è individuabile dall'analisi del profilo della *standard deviation*. I deflussi intermittenti *slug* e *plug* vengono identificati per esclusione dei precedenti casi (non verificano tutte le caratteristiche richieste per essere classificati come un altro tipo di deflusso). è inoltre possibile ottenere informazioni sulle caratteristiche del deflusso, quali frequenze e forma degli *slugs*.

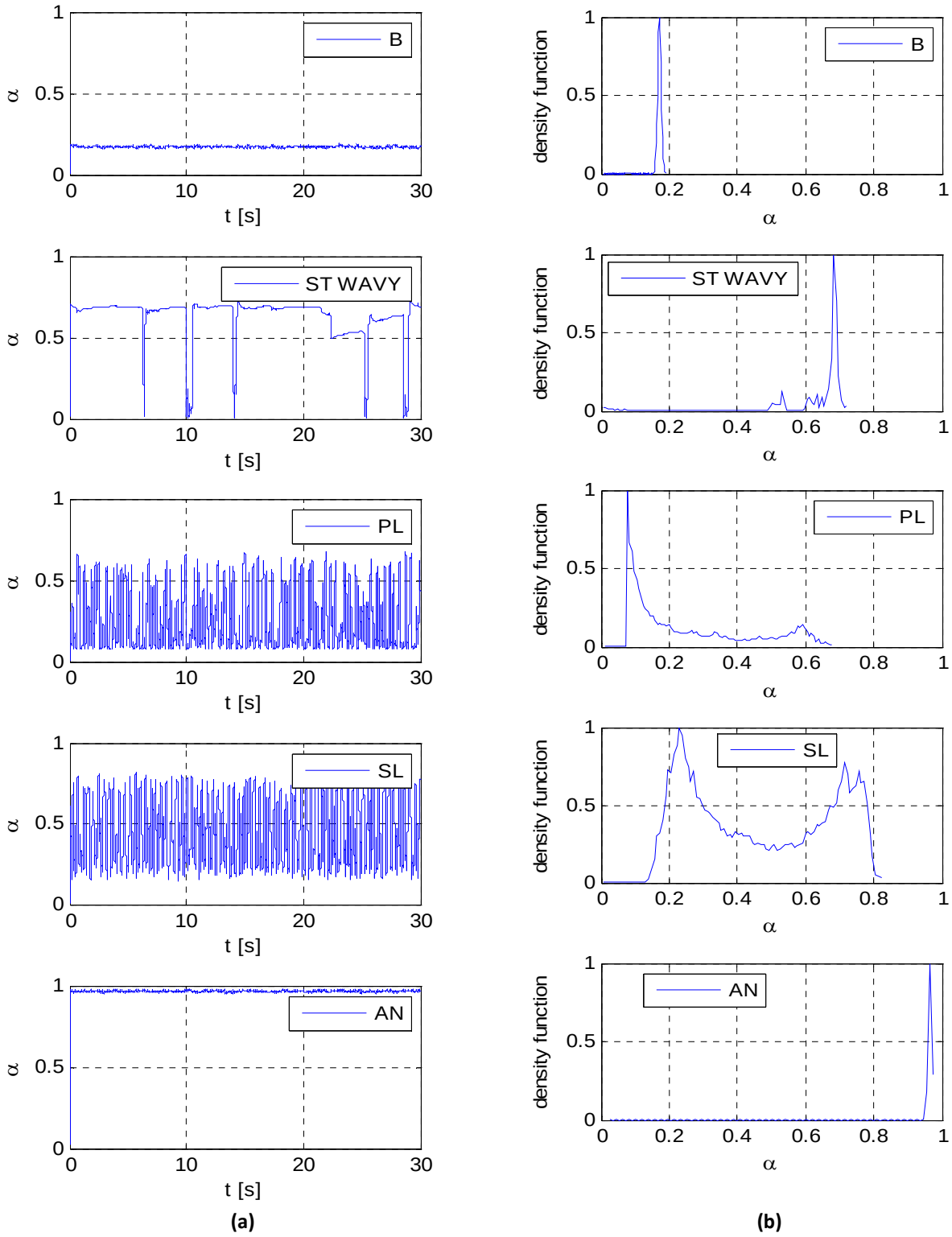


Fig. 32: Andamento temporale della frazione di vuoto (a) e curva di distribuzione (b)

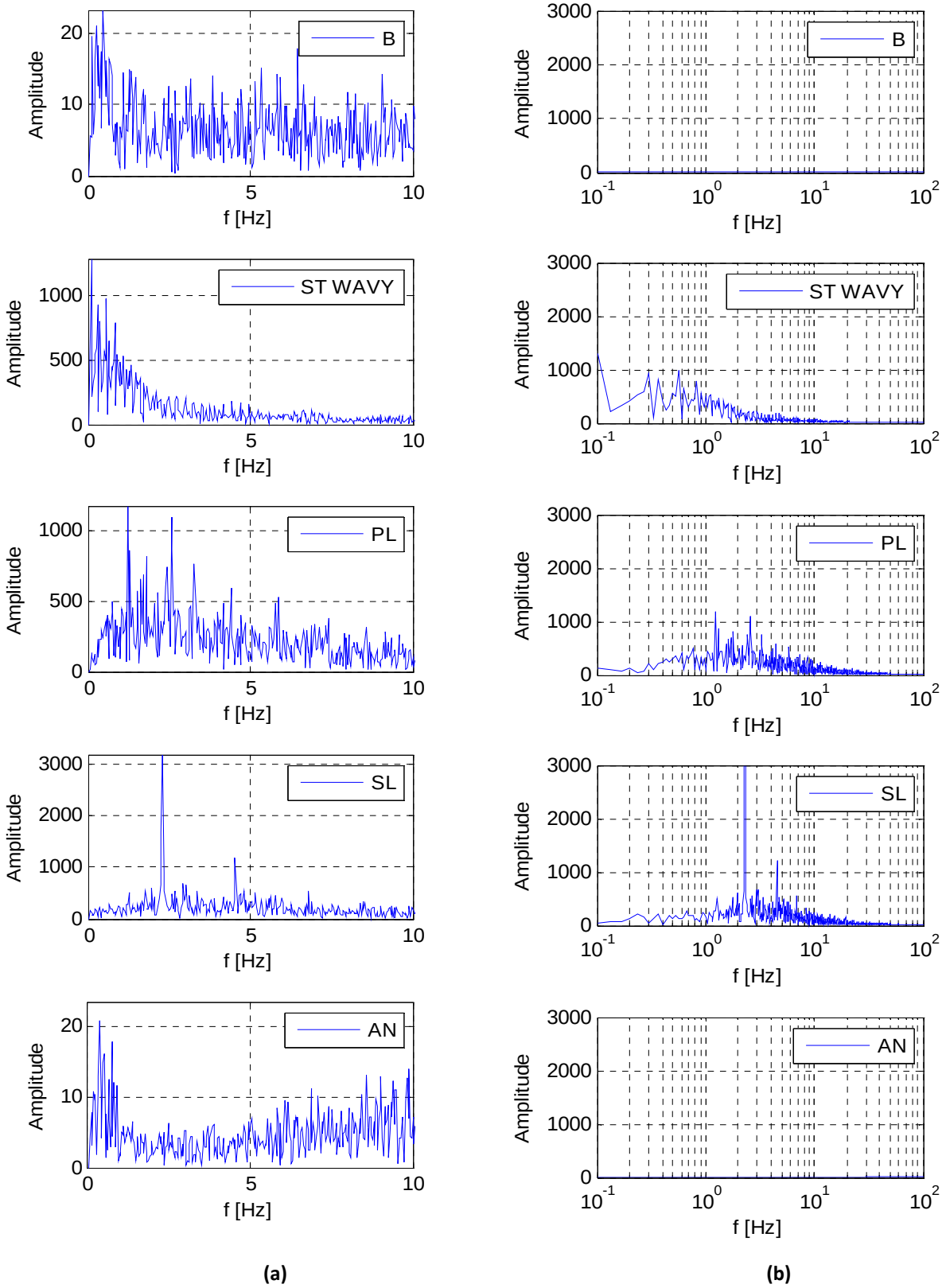


Fig. 33: Analisi in frequenza. Scala lineare (a) e scala logaritmica (b)

Un ulteriore approfondimento va invece effettuato per i deflussi che si trovano nelle zone di transizione. Questi deflussi oltre che difficilmente classificabili, sono fortemente instabili e producono quindi risposte dello SP difficilmente modellizzabili.

Analisi deflussi intermittenti

Per quel che concerne la classificazione dei flow patterns dei deflussi bifase, il deflusso intermittente può essere ulteriormente suddiviso in *plug* e *slug flow*, e questi a loro volta possono essere suddivisi in un numero arbitrario di sottoregimi. Se il flusso è relativamente lento ed i tappi (slugs) di liquido sono privi di bolle, il moto è denominato a *plug* (o "*elongated bubble*"). Quando nel tappo liquido è presente una fase aeriforme di entità significativa, il moto intermittente è detto a *slug* e le portate delle fasi sono relativamente più elevate.

Nel presente paragrafo viene descritta la metodologia utilizzata per identificare i deflussi intermittenti e calcolarne i parametri caratteristici. Una volta definito che il deflusso in esame è intermittente, si procede con l'analisi della funzione di distribuzione che consente di identificare 3 principali sottoregimi.

Nei grafici di Fig. 34 sono mostrati tre esempi di deflusso intermittente caratterizzati da tre differenti funzioni di distribuzione.

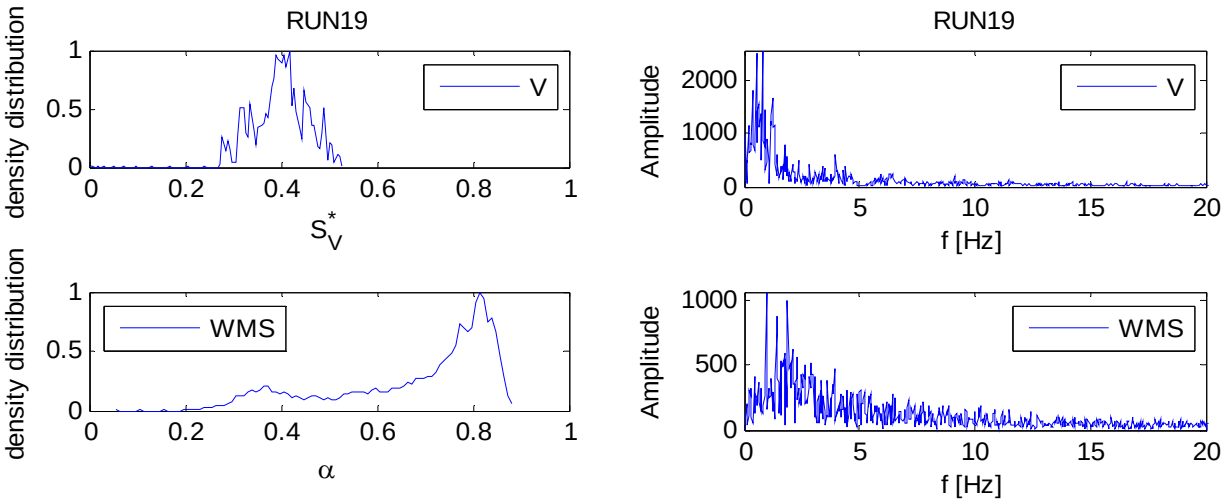
Sono riportati, a sinistra, la distribuzione dei valori del segnale del venturi, normalizzato rispetto al segnale in Volt di fondo scala, e del grado di vuoto sui 30 s di acquisizione e, a destra, lo spettro delle frequenze relativo al venturi e al WMS.

Occorre notare che il venturi, avendo una risposta sensibilmente più lenta del WMS, non riesce a seguire adeguatamente i fenomeni fluidodinamici, e non può quindi essere utilizzato per identificare il flow pattern. Analizzando le curve ricavate dai segnali del WMS si possono estrarre interessanti informazioni. le curve di distribuzione dei deflussi intermittenti sono per rappresentate da funzioni bimodali; i picchi della funzione dipendono dalle velocità superficiali delle due fasi.

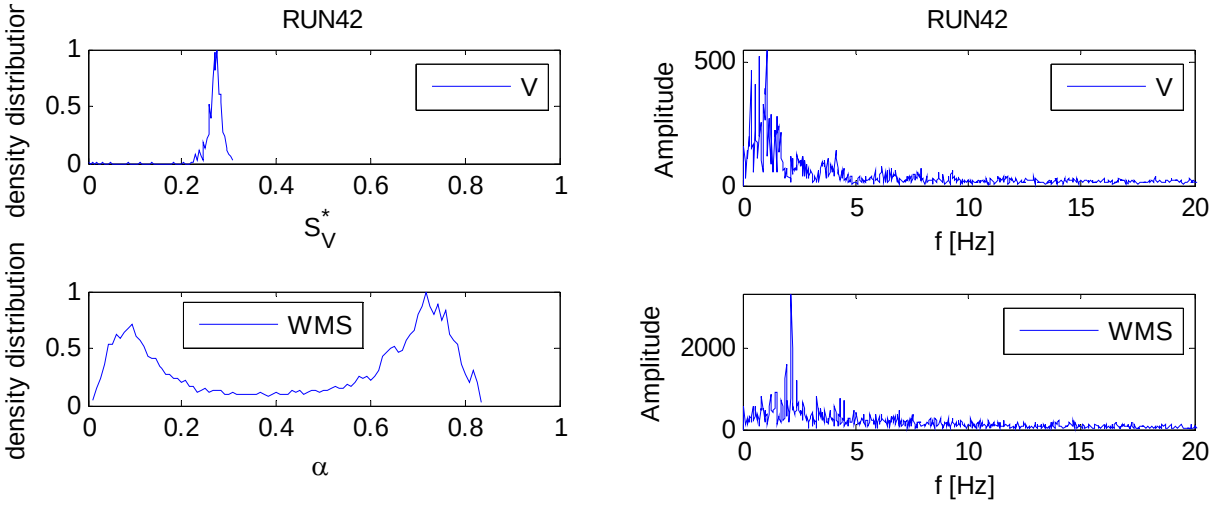
Il deflusso riportato in Fig. 34 (a), ottenuto per J_l=1.13 m/s e J_g =6.66 m/s, è caratterizzato da un picco principale ad elevati gradi di vuoto (α=0.8) e un picco secondario a bassi gradi di vuoto (α=0.3). Lo spettro delle frequenze, evidenzia più frequente caratteristiche e appare relativamente rumoroso.

Il deflusso riportato in Fig. 34 (b), ottenuto per J_l=0.93 m/s e J_g =1.14 m/s, è caratterizzato da due picchi aventi all'incirca la stessa percentuale di accadimento posizionati a α=0.1 e α=0.7. Lo spettro delle frequenze, mostra chiaramente la frequenza caratteristica del deflusso.

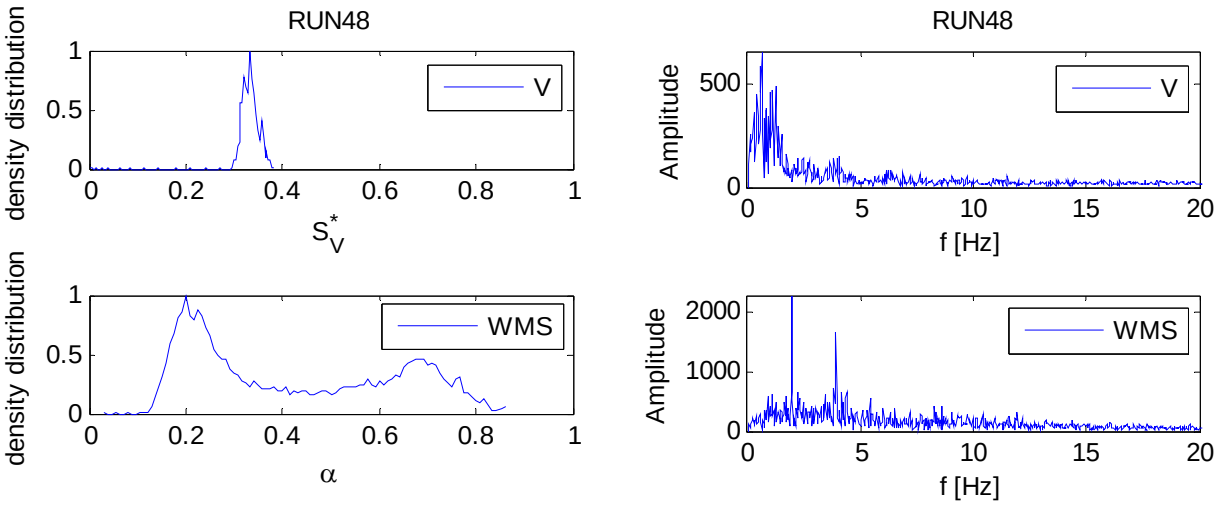
Il deflusso riportato in Fig. 34 (c), ottenuto per J_l=1.4 m/s e J_g =1.14 m/s, è caratterizzato da un picco principale a bassi gradi di vuoto (α=0.2) e un picco secondario ad elevati gradi di vuoto (α=0.7). Lo spettro delle frequenze, mostra chiaramente due frequenze caratteristiche.



(a) Jl=1.13 m/s – Jg =6.66 m/s



(b) Jl=0.93 m/s – Jg=1.14 m/s



(c) Jl=1.4 m/s – Jg=1.14 m/s

Fig. 34: Classificazione deflussi intermittenti

In Fig. 35 sono riportati sulla mappa di Baker i deflussi identificati come intermittenti e classificati secondo la forma della curva di distribuzione come sopra descritto. Come si evince dal grafico la forma assunta dalla curva di distribuzione bimodale è strettamente connessa alla coppia di velocità superficiali delle fasi.

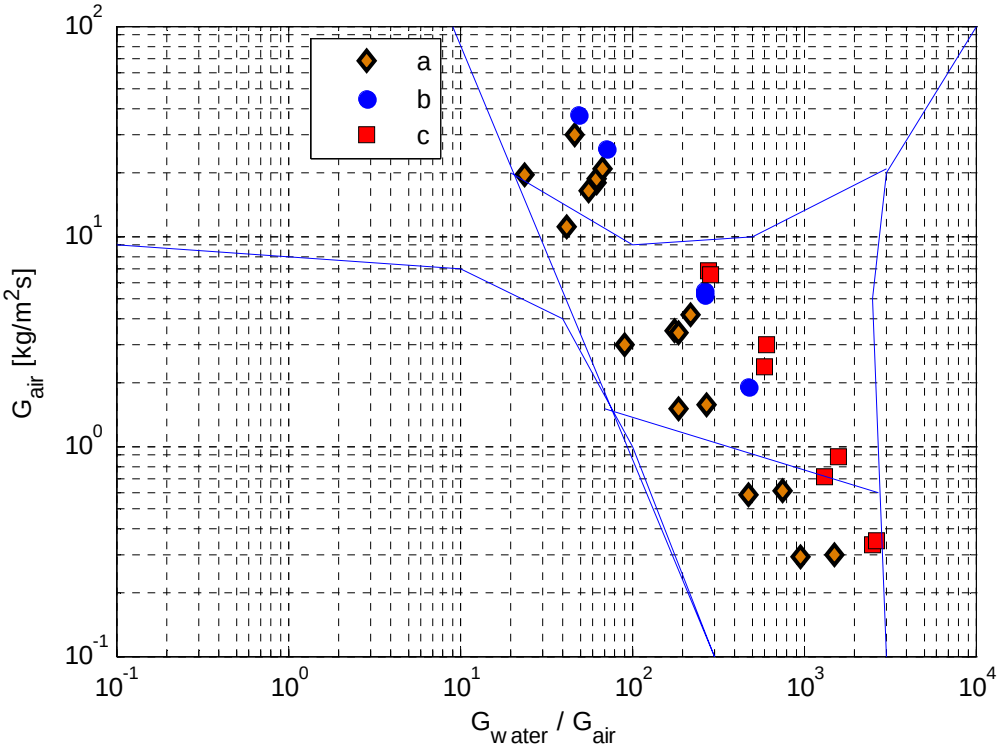


Fig. 35: Classificazione deflussi intermittenti

In Fig. 36, le frequenze caratteristiche (frequenze caratteristiche massime nel caso più picchi di frequenza siano presenti) sono rappresentate in funzione della velocità superficiale di liquido. La frequenza identificativa del deflusso aumenta linearmente con la portata di liquido e può essere correlata tramite il numero di Strouhal, St, alla frazione volumetrica di liquido, β_{water}:

$$St = \frac{f \cdot D_{pipe}}{J_{air}} \qquad \textbf{(24)}$$

$$\beta_{water} = \frac{J_{water}}{J_{tot}} \qquad \textbf{(25)}$$

In Fig. 37 è riportato il grafico St-β_{water}. Nella figura sono evidenziati, con marcatori differenti i deflussi appartenenti ai tre differenti gruppi. Anche in questo caso si evidenzia una dipendenza dalle velocità delle fasi: il gruppo c ottenuto con le velocità maggiori è caratterizzato da frequenze più elevate; mentre il gruppo b che si manifesta al crescere della velocità della fase gassosa, rispetto ai punti del gruppo a, è caratterizzato da frequenze comparabili a quelle del gruppo a e b.

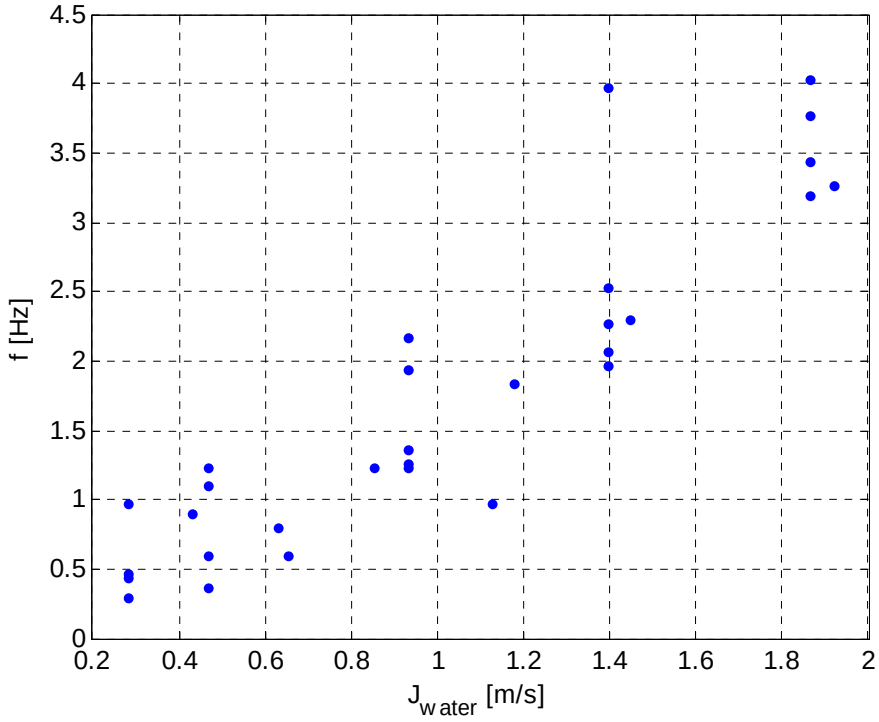


Fig. 36: Frequenze caratteristiche deflussi intermittenti

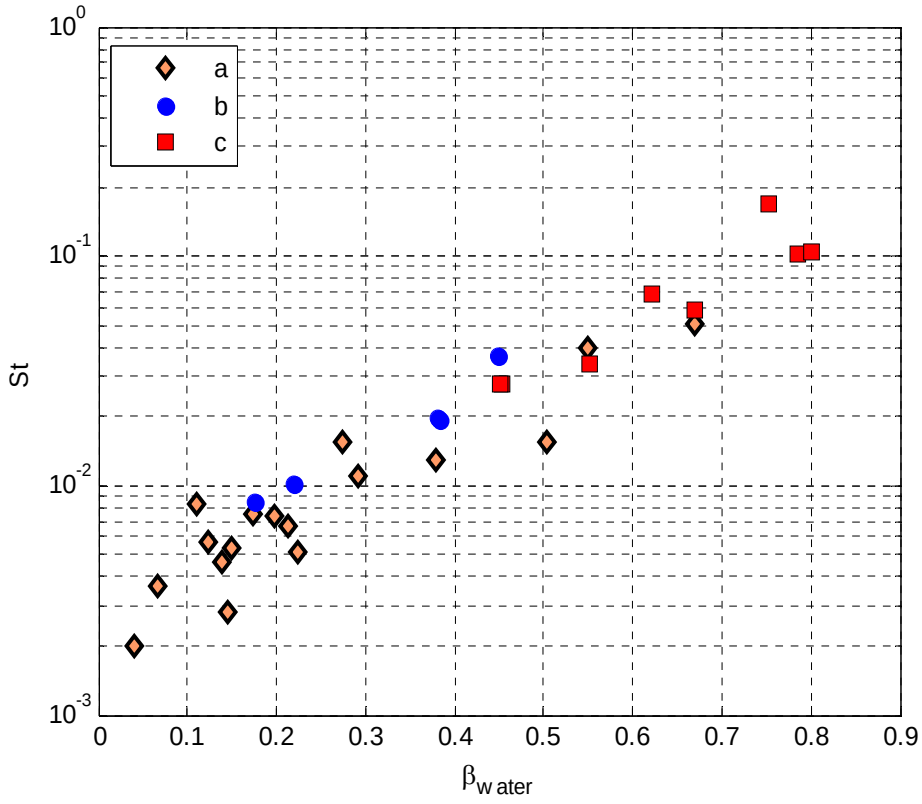


Fig. 37: Frequenze caratteristiche deflussi intermittenti: numero di Strouhal- frazione volumetrica di liquido

Perdite di carico nello Spool Piece e Moltiplicatori bifase

Un ulteriore informazione che può essere utile per l'interpretazione dei segnali dello SP è la caduta di pressione nello SP, misurata sulla lunghezza totale di 2690 mm.

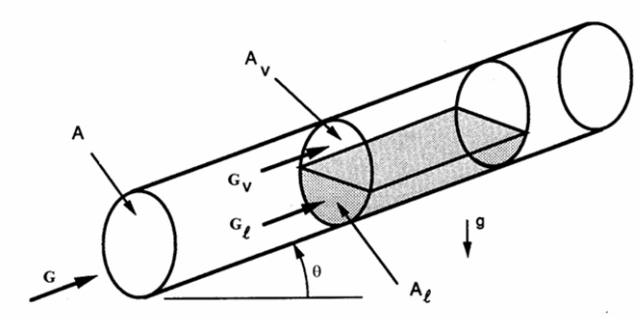


Fig. 38: Geometria e parametri di riferimento per le cadute di pressione in un condotto circolare

L'equazione generalizzata di Bernoulli per un flusso bifase monodimensionale in regime stazionario all'interno di un canale a sezione costante è dato dalla somma di tre contributi:

$$\left(-\frac{d\,p}{d\,s}\right)_{TP} = \frac{4\tau}{D} + G_{TP}^2 \frac{d}{ds}\left(\frac{1}{\rho_{TP}}\right) + \rho_{TP}\, g \sin\theta \qquad \textbf{(26)}$$

dove *dp/ds* è la variazione di pressione lungo il canale, data dalla somma del termine di attrito, accelerazione e gravitazionale rispettivamente

τ è lo sforzo di taglio alla parete [N/m^2]

ρ_{TP} è la densità del fluido bifase [kg/m^3]

G è la portata areica [kg/(m^{2}s)]

e ϑ è l'angolo di inclinazione del condotto rispetto all'orizzontale.

Nel tratto relativo allo SP in esame non si ha cambiamento di fase e il condotto ha giacitura orizzontale. I termini di accelerazione e il termine gravitazione sono nulli, pertanto occorre valutare solo il termine di caduta di pressione per attrito.

Poiché si sta misurando la caduta di pressione nel tratto in cui è installato lo SP, le cadute di pressione per attrito sono costituite dalla somma di perdite di carico distribuite e perdite di carico localizzate. Come primo step occorre pertanto identificare le perdite localizzate e stimare il loro contributo rispetto alla caduta di pressione totale nel tratto in esame: le perdite localizzate sono da imputare alle cadute di

pressione in corrispondenza delle flange, nella maglia del WMS e alle cadute di pressione permanenti del venturi.

Analizzando il caso monofase, si possono stimare le cadute di pressione distribuite utilizzando le correlazioni di letteratura per stimare il coefficiente di attrito *f*.

Nel caso monofase τ è correlato ai parametri del deflusso tramite il fattore di attrito f definito come (Fanning):

$$f_F = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\frac{G^2}{\rho}} \quad \textbf{(27)}$$

o (Darcy)

$$f_D = 4 \cdot \frac{\tau}{\frac{1}{2}\frac{G^2}{\rho}} \quad \textbf{(28)}$$

nel seguito si farà riferimento al fattore d'attrito di Fanning: $f=f_F$.

Il fattore di attrito, nel caso di deflussi monofase in condotti diritti, è una funzione del numero di Re; tra le numerose correlazioni, che sono state sviluppate nel corso degli anni le più utilizzate sono:

- Deflusso Laminare (relazione analitica): $f = 64/\mathrm{Re}$ **(29)**
- Deflusso turbolento Blasius: $f = 4 \cdot 0.0079/\mathrm{Re}^{1/4}$ **(30)**
- Deflusso turbolento Colebrook-White: $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{f}} + \frac{\varepsilon/D}{3.71}\right)$ **(31)**

Le perdite di carico distribuite pertanto risultano essere pari a:

$$\Delta p_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2}\frac{G^2}{\rho} \quad \textbf{(32)}$$

mentre le perdite localizzate vengono solitamente espresse come:

$$\Delta p_{loc} = K \cdot \frac{G^2}{\rho} \quad \textbf{(33)}$$

solitamente le perdite localizzate vengono espresse tramite un coefficiente di attrito f e un valore di L/D equivalente:

$$K = f \cdot \left(\frac{L}{D}\right)_{equivalene} \quad \textbf{(34)}$$

dove il coefficiente f viene calcolato tramite le correlazioni riportate nell'equazione (29), (30) e (31) o equivalenti.

Secondo un approccio classico [20] [26] il gradiente di pressione per attrito nel caso bifase viene correlato ad un opportuno gradiente di pressione per attrito monofase attraverso un fattore moltiplicatore (moltiplicatore bifase):

$$\left(-\frac{dp}{ds}\right)_{att.}^{TP} = \left(-\frac{dp}{ds}\right)_{att.}^{lo} \phi_{lo}^2 = \frac{f_{lo}}{2} \cdot \frac{1}{D} \frac{G^2}{\rho_l} \phi_{lo}^2 \qquad \textbf{(35)}$$

dove

$$\left(-\frac{dp}{ds}\right)_{att.}^{lo}$$

è il gradiente di pressione per attrito che si avrebbe se tutta la portata bifase scorresse nel tubo con le proprietà fisiche del liquido, e f_{lo} è il fattore di attrito corrispondente. Il parametro ϕ_{lo}^2 è detto moltiplicatore bifase.

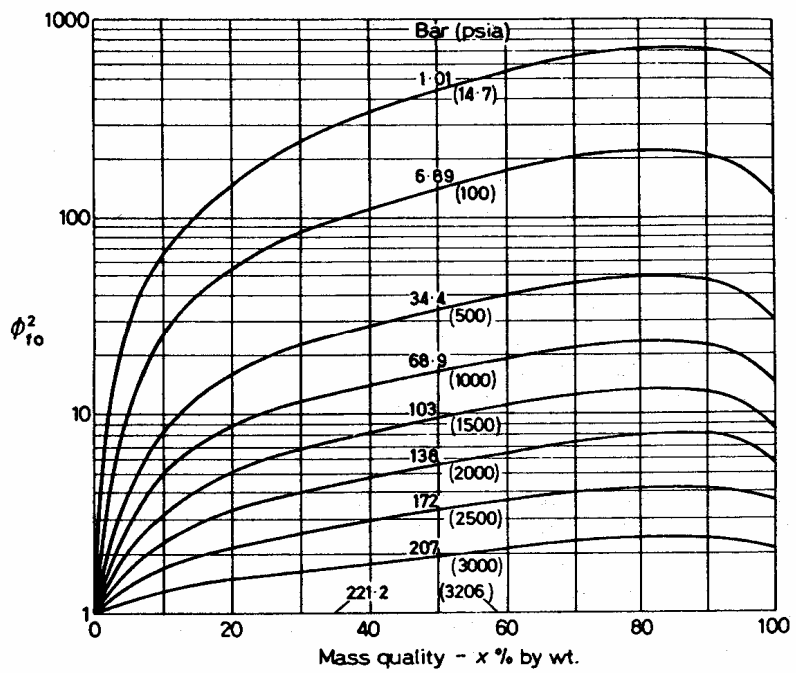


Fig. 39: Moltiplicatore bifase di Martinelli-Nelson (valido per acqua)

E nel caso in cui ci si riferisse a un deflusso avente le proprietà fisiche della fase gassosa:

$$\left(-\frac{dp}{ds}\right)_{att.}^{TP} = \left(-\frac{dp}{ds}\right)_{att.}^{go} \phi_{go}^2 = \frac{f_{go}}{2} \cdot \frac{1}{D} \frac{G^2}{\rho_g} \phi_{go}^2 \qquad \textbf{(36)}$$

dove

$$\left(-\frac{dp}{ds}\right)_{att.}^{go}$$

è il gradiente di pressione per attrito che si avrebbe se il flusso bifase scorresse nel tubo con le proprietà fisiche del liquido, e f_{go} è il fattore di attrito corrispondente.

Per la valutazione delle perdite di carico in deflusso bifase, il metodo di calcolo impiegato nella maggior parte delle procedure in uso è basato sulle correlazioni di Lockhart-Martinelli (modello a fasi separate) [27-28]. Tale procedura ricorre al parametro di similitudine

$$\chi^2 = \frac{\left(\frac{dp}{ds}\right)_l}{\left(\frac{dp}{ds}\right)_g} \quad \textbf{(37)}$$

definito come il rapporto tra i gradienti di pressione del liquido e del gas che si stabilirebbero se le due fasi fluissero separatamente da sole nel condotto.

Assumendo che il regime di deflusso sia turbolento per entrambe le fasi e utilizzando l'equazione di Blasius per il calcolo dei fattori di attrito gas e liquido il parametro può essere riscritto come:

$$\chi_{tt}^2 = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.875} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.125} \quad \textbf{(38)}$$

Le cadute di pressione dovute all'attrito possono essere così correlate ai moltiplicatori bifase ϕ_l^2 e ϕ_g^2 sulla base del modello Lockhart-Martinelli tramite le seguenti relazioni:

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2} \quad \textbf{(39)}$$

$$\phi_g^2 = 1 + C\chi + \chi^2 \quad \textbf{(40)}$$

dove il valore di C è riportato in Tab. 5.

I moltiplicatori vengono riportati senza il pedice "*o*" in quanto si riferiscono alla caduta di pressione per attrito che si avrebbe nel caso in cui solo la frazione monofase (liquida o gas) scorresse nel condotto. In questo caso la caduta di pressione può essere riscritta come:

$$\left(-\frac{dp}{ds}\right)_{att.}^{TP} = \left(-\frac{dp}{ds}\right)_{att.}^{l} \phi_l^2 = \frac{f_l}{2}\frac{(1-x)G^2}{D\,\rho_l}\,\phi_l^2 \quad \textbf{(41)}$$

o nel caso si riferisca alla fase gassosa:

$$\left(-\frac{dp}{ds}\right)_{att.}^{TP} = \left(-\frac{dp}{ds}\right)_{att.}^{g} \phi_g^2 = \frac{f_g}{2}\frac{xG^2}{D\;\rho_g}\,\phi_g^2 \quad \textbf{(42)}$$

Liquido	Gas	C
turbolento	turbolento	20
laminare	turbolento	12
turbolento	laminare	10
laminare	laminare	5

Tab. 5: Valori del parametro C in funzione delle condizioni di deflusso

La correlazione di Lockhart-Martinelli, puramente empirica, è stata sviluppata per deflussi bifase in condotti orizzontali a pressione vicina a quella atmosferica, pertanto l'applicazione al di fuori di questo range non è raccomandata.

La correlazione di Lockhart-Martinelli sviluppata, per deflussi adiabatici aria-acqua è stata estesa a deflussi acqua–vapore in sistemi a circolazione forzata da Martinelli e Nelson [25]. Il deflusso bifase viene considerato sempre "turbolento-turbolento". La correlazione, riportata in Fig. 40, è espressa in termini di ϕ_{lo}^2 che funziona meglio del parametro ϕ_l^2 nel deflusso acqua-vapore.

Dalla correlazione proposta si evince che il moltiplicatore ϕ^2 è una funzione del parametro di Martinelli χ^2 e quindi del grado di vuoto α. La correlazione χ^2-α individuata da Martinelli e Nelson è indipendente dal tipo di deflusso ed è riportata in Fig. 41.

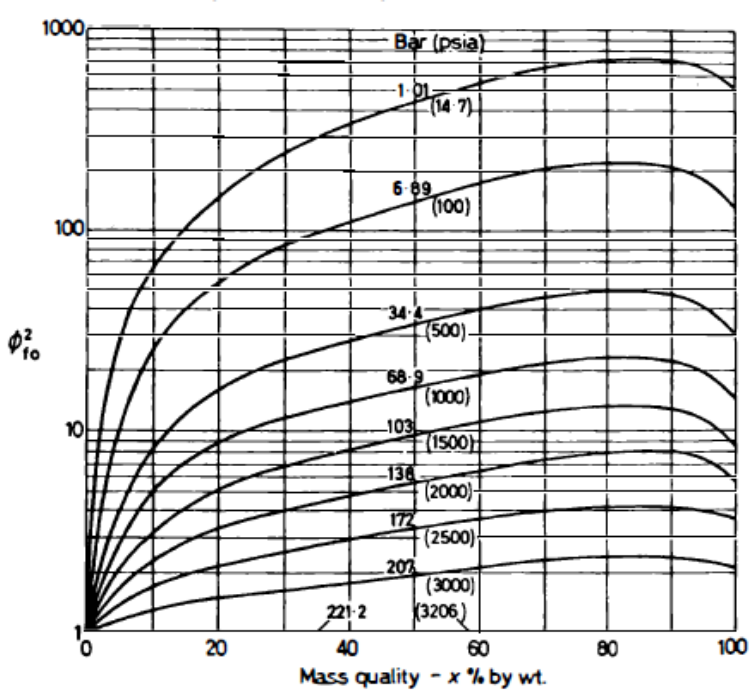


Fig. 40: Valori del moltiplicatore bifase Φ^2_{lo} in funzione di pressione e titolo per deflusso acqua-vapore [25]

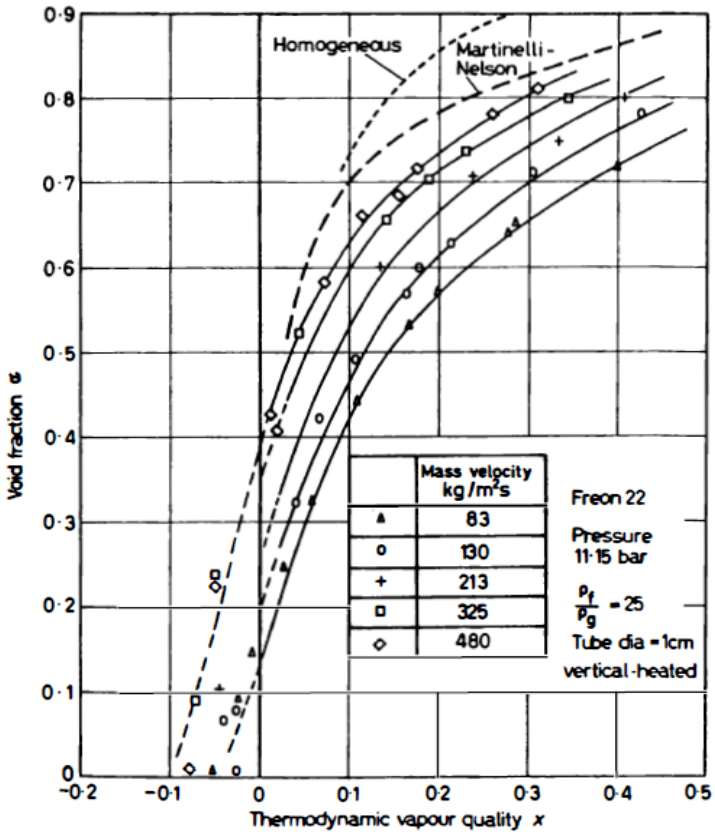


Fig. 41: Relazione tra frazione di vuoto e titolo nella correlazione di Martinelli-Nelson [25]

Numerose altre correlazioni sono state sviluppate da altri ricercatori [20], per correlare il moltiplicatore bifase con altre grandezze del deflusso. Lavori a riguardo sono stati pubblicati da Baroczy [21] che ha proposto un metodo grafico per la stima del moltiplicatore ϕ_{lo}^2, da Chisholm [22] e da Friedel [23].

Chisholm in varie pubblicazioni ha proposto diverse correlazioni per il calcolo delle cadute di pressione per attrito; la forma più generale è espressa come:

$$\phi_{lo}^2 = 1 + \left(\Gamma^2 - 1\right) \cdot \left\{B \cdot \left[x \cdot \left(1 - x\right)\right]^{0.875} + x^{1.75}\right\} \qquad \textbf{(43)}$$

dove

$$\Gamma = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{0.125} \qquad \textbf{(44)}$$

Una delle correlazioni più accurate, per il calcolo delle cadute di pressione in bifase, è quella proposta da Friedel [23]. Un equazione per ϕ_{lo}^2, basata su dati sperimentali, è definita in funzione del numero di Weber e del numero di Friedel:

$$\phi_{lo}^2 = A_1 + \frac{3.24 \cdot A_2 \cdot A_3}{Fr^{0.045} \cdot We^{0.035}} \qquad \textbf{(45)}$$

dove

$$A_1 = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_l f_{lo}}{\rho_g f_{go}} \quad \textbf{(46)}$$

$$A_1 = (1-x)^{0.224} \cdot x^{0.78} \quad \textbf{(47)}$$

$$A_3 = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.91} \cdot \left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{0.19} \cdot \left(1-\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{0.7} \quad \textbf{(48)}$$

$$Fr = \frac{G^2}{g \cdot D \cdot \rho_{TP}^2} \quad \textbf{(49)}$$

$$We = \frac{G^2 \cdot D}{\rho_{TP} \cdot \sigma} \quad \textbf{(50)}$$

dove

f_{lo} e f_{go} sono i fattori di attrito che si avrebbero se tutta la portata bifase scorresse nel tubo con le proprietà fisiche del liquido e del gas rispettivamente

G portata areica totale [kg/m^{2}s]

D diametro del condotto [m]

σ tensione superficiale [N/m]

ρ_{TP} è la densità bifase calcolata utilizzando il modello omogeneo (Equazione (6)).

Whalley [26] ha analizzato il comportamento dei modelli a fasi separate sopra riportati utilizzando una grande quantità di dati sperimentali, e ha proposto le raccomandazioni seguenti:

- per μ_l/μ_g < 1000: Correlazione di Friedel;
- per μ_l/μ_g > 1000 e G > 100 kg/m^{2}s : Correlazione di Chisholm;
- per μ_l/μ_g > 1000 e G < 100 kg/m^{2}s : Correlazione di Lockhart-Martinelli o Martinelli-Nelson.

Nei casi di maggiore interesse pratico la correlazione consigliata è quindi quella di Friedel.

Occorre sottolineare che sebbene questa correlazione sia la più accurata tra le correlazioni generali sviluppate, fornisce una standard deviation di circa il 40-50%.

Analizzando le cadute di pressione, misurate in deflusso monofase (Fig. 42), si nota che anche in questo caso le curve W-Δp formano una regione di spazio (compresa tra le due parabole) che contiene al suo interno tutti i punti relativi alle cadute di pressione in deflusso bifase (Fig. 43)

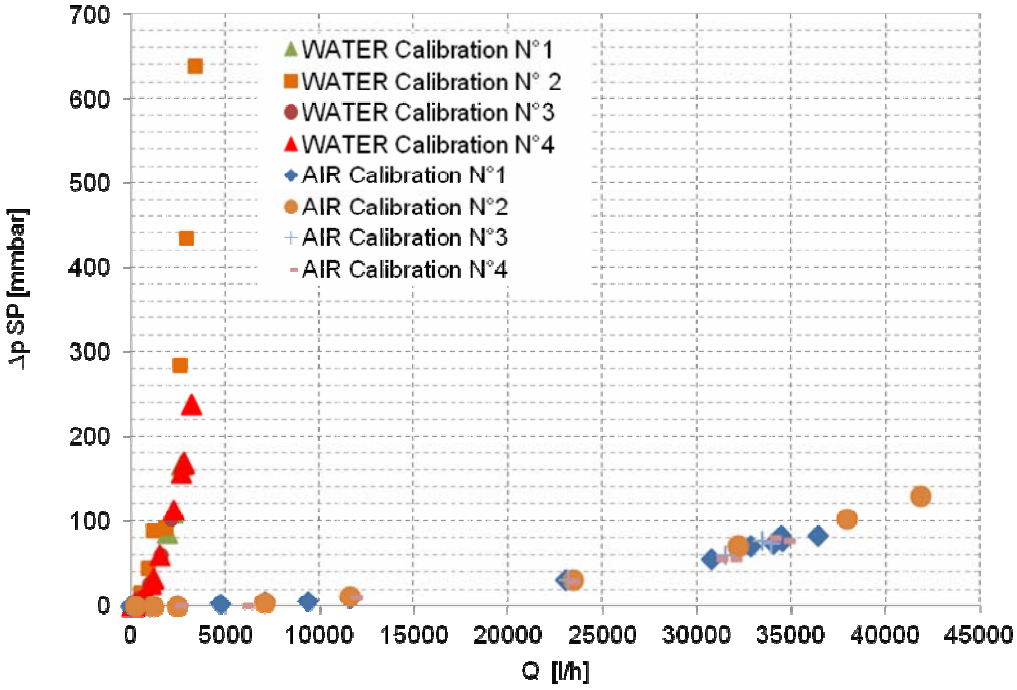


Fig. 42: Cadute di pressione monofase nello SP (L=2690 mm)

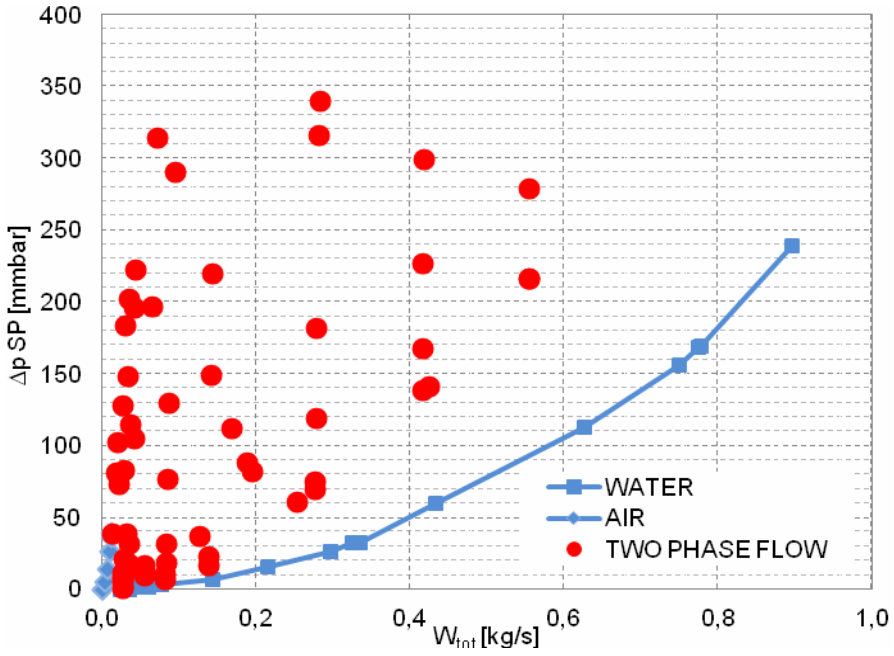


Fig. 43: Cadute di pressione bifase nello SP (L=2690 mm)

Utilizzando i dati sperimentali e nell'ipotesi che le cadute di pressione localizzate possano essere considerate cadute di pressione per attrito equivalenti, si sono valutati i moltiplicatori bifase e il coefficiente di Lockhart-Martinelli sperimentale. Nei grafici di Fig. 44 e Fig. 45 i valori sperimentali sono confrontati con i valori ricavati dalle correlazioni di letteratura.

In Fig. 44 i moltiplicatori bifase aria ϕ_g^2 e acqua ϕ_l^2 sono stati confrontati i valori ottenuti con la correlazione di Lockhart-Martinelli (LM) sulla base delle equazioni 38-40. Sebbene le correlazioni rappresentano bene gli andamenti sperimentali $\phi^2 - \chi_{tt}$, gli scarti tra i valori sono maggiori del 50% .

In Fig. 45 sono invece riportati i confronti tra moltiplicatore bifase sperimentale, riferito al deflusso di acqua, e moltiplicatori di Friedel, Chisholm e Lockhart-Martinelli.

Dal confronto emerge che il moltiplicatore di LM, calcolato con riferimento alla sola portata di liquido che circola che attraversa lo SP, consente di stimare la caduta di pressione bifase con un errore dell'ordine del 50% o superiore, così come la correlazione di Friedel calcolata considerando la portata di liquido pari al totale della portata bifase. Nel caso in esame la correlazione che fornisce scarti minori è quella di Chisholm, ottenuta considerando una portata di liquido pari alla portata totale bifase; la correlazione consente di stimare la caduta di pressione con uno scarto inferiore al 50% nell'82% dei casi.

La correlazione di Chisholm, utilizzata in modo inverso, può fornire quindi importanti indicazioni sul valore della portata di liquido e integrata nel modello dello SP potrebbe essere utilizzata come ulteriore parametro nella stima delle portate bifase. Ulteriori studi sono necessari per approfondire l'argomento e sviluppare un modello interpretativo.

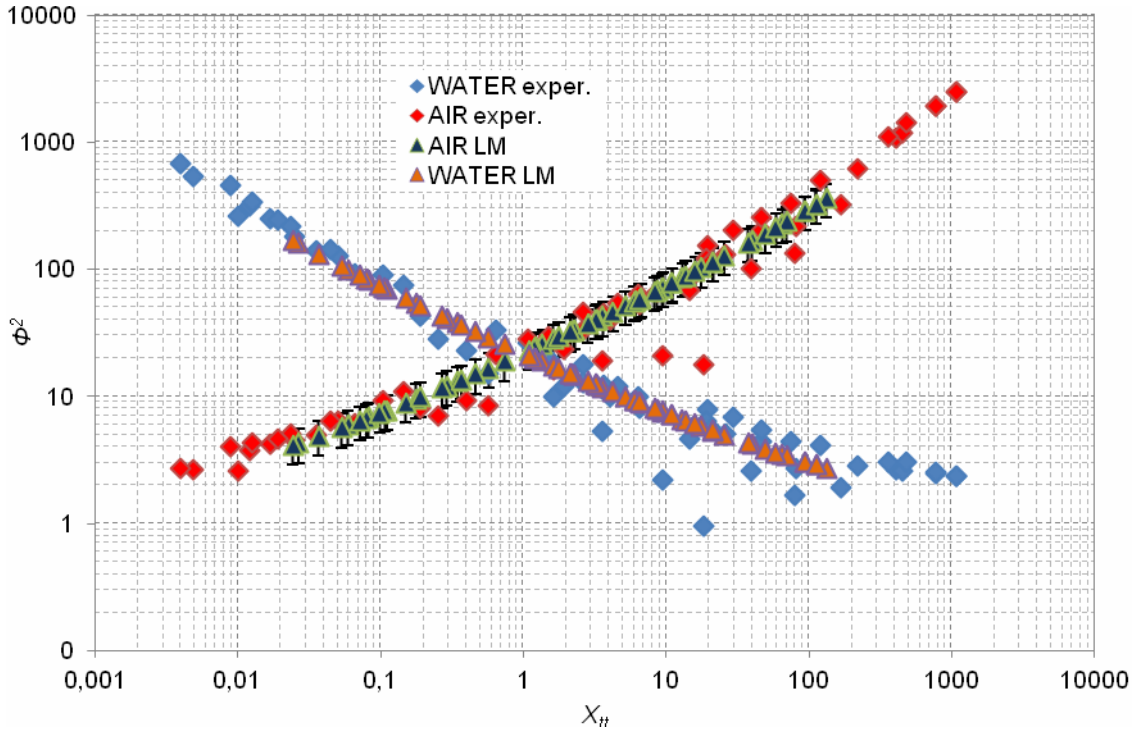


Fig. 44: Confronto Moltiplicatori bifase sperimentali e da correlazione Lockhart-Martinelli

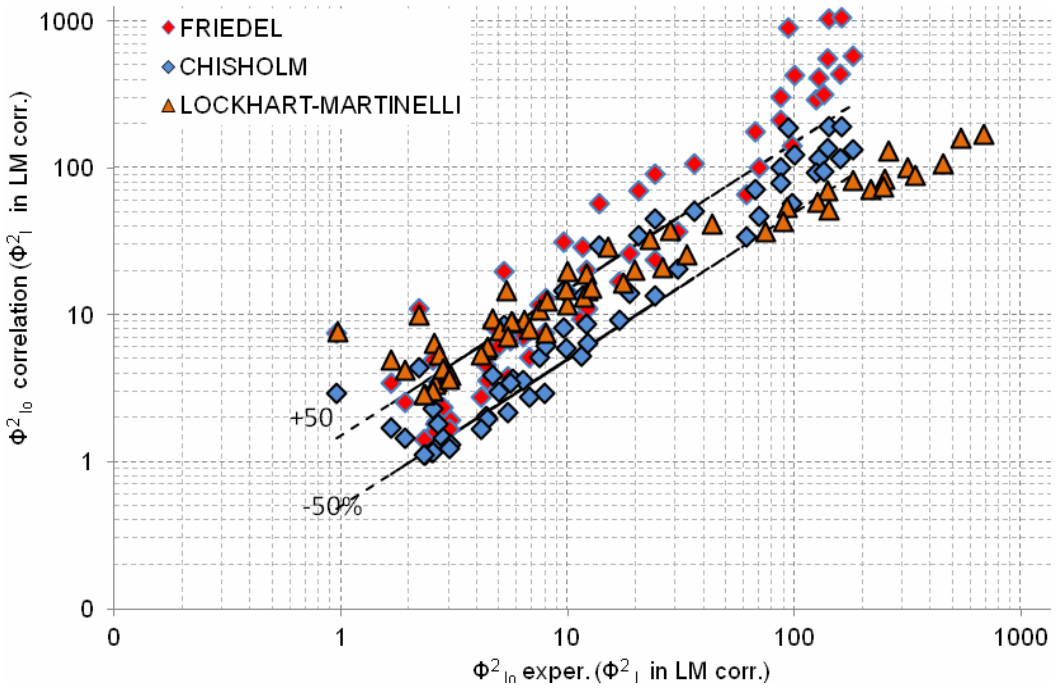


Fig. 45: Cadute di pressione bifase nello SP: Moltiplicatori bifase riferiti alla fase liquida

Conclusioni

Nel presente documento è descritta la caratterizzazione di uno Spool Piece costituito da un venturi classico e da un Wire Mesh Sensor, installati in un condotto orizzontale interessato da una miscela aria-acqua. I modelli interpretativi dei segnali dei singoli strumenti sono stati descritti e analizzati al fine di sviluppare una metodologia di analisi dei segnali che possa caratterizzare il deflusso bifase in termini di portate delle singole fasi; identificare il flow pattern e le sue caratteristiche.

Lo studio consente di approfondire i lavori effettuati dal Politecnico di Torino nell'ambito dell'attività LP2 "Reattori evolutivi INTD", e in particolare nell'ambito della scelta degli strumenti da installare nelle linee di rottura di SPES3 con l'obiettivo di misurare la portata massica bifase che transita nelle linee durante i transitori incidentali.

L'analisi dei segnali elettrici, relativi agli strumenti dello SP installato nel circuito di prova, ha permesso di caratterizzare il deflusso bifase in termini di flow pattern e portate delle singole fasi. Il modello sviluppato permette di stimare la portata totale della miscela bifase con un errore che nell'84% dei casi è inferiore al 20% e nel 73.3% dei casi è inferiore al 10%. Le incertezze maggiori concernenti la stima della portata massica di aria, risultano comunque inferiore al 30% nel 73.3% dei casi e inferiore al 20% nel 53.5% dei casi testati. Gli errori maggiori sulla stima delle grandezze fluidodinamiche si hanno in corrispondenza dei regimi di deflusso intermittenti, per i quali l'utilizzo di un valore medio delle grandezze può non essere adeguato a descrivere la fluidodinamica nella sua complessità.

Il modello di analisi sviluppato consente, oltre che di stimare le portate delle due fasi, di ottenere importanti informazioni sulle caratteristiche fluidodinamiche della miscela. Nel presente documento una metodologia per l'identificazione del flow pattern è stata sviluppata e analizzata. Dall'analisi della variazione temporale dei segnali e dall'analisi in frequenza, per ogni tipologia di deflusso, vengono estratti i parametri fluidodinamici di riferimento, quali le frequenze caratteristiche i profili cordali del grado di vuoto e le funzioni di distribuzione.

La metodologia proposta consente di ridurre ulteriormente l'incertezza sui risultati, grazie alla possibilità di implementare all'interno del modello dello SP, correlazioni e modelli fluidodinamici sviluppati per specifiche topologie di deflusso.

Ai fini dell'installazione dello SP nello SPES3 si può concludere che, in relazione ai range di velocità e ai deflussi di riferimento dell'impianto sperimentale SIET, il modello sviluppato consente di ottenere incertezze sulla stima dei parametri fluidodinamici inferiori al 10%. Ulteriori analisi sono necessarie per definire l'adeguatezza del venturi a seguire i transitori incidentali e verificare la possibilità di sostituire il WMS con la sonda tomografica sviluppata da SIET.

Bibliografia

[1] M. Greco, R. Ferri et al., *Two-Phase Flow Measurement Studies for the SPES3 Integral Test Facility for IRIS Reactor Simulation,* in 18th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE18) May 17–21, 2010 , Xi'an, China

[2] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, *State of art and Selection of techniques in Multiphase Flow Measurement*, Report RdS/2010/67, ENEA

[3] C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, G. Monni, B. Panella, A. Mosetto, *SPES-3 Facility Analysis, reference data for postulated Accident Simulation, Criteria for general and special instrumentation selection*. Report RdS/2010/68 ENEA

[4] De Salve M., G. Monni, B. Panella*, Experimental Study of Horizontal air-water Two-Phase Flow with a Spool Piece,* Report ENEA Settembre 2011

[5] De Salve M., Monni G., Panella B. *, Turbine Flow Meter and Drag-Disk in Horizontal Air Water Flow.* In: UIT2011, Torino (Italia), 20-22 June 2011. pp. 107-112

[6] M. De Salve, G. Monni, B. Panella , *Caratterizzazione di un deflusso bifase orizzontale aria-acqua mediante Wire Mesh Sensor,* Report RdS/2011/121

[7] M. De Salve, G. Monni, B. Panella , *Horizontal Air-Water Flow Characterization with Wire Mesh Sensor,* UIT2012, Bologna (Italia), 25-27 June 2012

[8] M. De Salve, G. Monni, B. Panella , *Horizontal Air-Water Flow Analysis with Wire Mesh Sensor,* in 6th European Thermal Sciences Conference, Eurotherm 2012 September 04 – 07, Poitiers - Futuroscope France

[9] A. Achilli, M. Greco, *Progettazione di una sonda capacitiva per misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscele bifase acqua-vapore.* Report RdS/2010/x ENEA

[10] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, *Caratterizzazione di una Sonda capacitiva in deflusso verticale ascendente aria-acqua* Report RdS/2011/121

[11] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, C. Randaccio, *Electrical Capacitance Probe Characterization for Vertical Annular air-water Flow*, in 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, July 2012 Malta

[12] Norma ISO 5167-1:4 :2003 (E)

[13] W. Jitschin , *Gas flow measurement by the thin orifice and the classical Venturi tube*, Vacuum (2004) 76

[14] OMEGA, *Complete Flow and Level Measurement Handbook and Encyclopedia®*, OMEGA Press (2005)

[15] R. Steven, *Horizontally installed differential pressure meter wet gas flow performance review*, In: North sea flow measurement workshop (2006).

[16] ZH. Lin, *Gas-liquid two-phase flow and boiling heat transfer*, Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press (2003)

[17] C. R. Baker, *Flow measurement handbook*, Cambridge University Press (2000).

[18] L. Friedel, *SHORT COMUNICATION Are the so called two-phase flow densities physical and real fluid-dynamic design variables in one-dimensional critical flow?* , J. of Loss Prevention in the Process Industries 11 (1998) 431-435

[19] H.M. Prasser, A. Bottger, J. Zschau, *A new electrode-mesh tomography for gas –liquid flows,* Flow Measurement and Instrumentation 9 (1998) 111-119

[20] J. G. Collier and J. R. Thome, *Convective Boiling and Condensation* 3th edition, Oxford Science Publications

[21] C. J. Baroczy, *A systematic correlation for two-phase pressure drop*, AIChE reprint 37 presented at 8th National Heat Transfer Conference, Los Angeles, August

[22] D. Chisholm, *The influence of mass velocity on friction pressure gradients during steam-water flow*, Paper 35 presented at Thermodynamics and Fluid Mechanics Convention, Institute of Mechanical Engineers (Bristol), March 1968.

[23] L. Friedel, *Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow*, Presented at the European Two-phase Flow Group Meeting, Ispra, Italy, Paper E2, June 1979

[24] R. W. Lockhart and R.C. Martinelli, *Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes*, Chern. Eng. Prog., 45, 39 (1949).

[25] R. C. Martinelli and D. B. Nelson, *Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water* , Trans. ASME, 70, 695 (1948).

[26] P. B. Whalley, *Boiling, Condensation, and Gas-Liquid Flow.*

[27] Hewitt (1982) , *Flow Regimes. Handbook of multiphase systems*

Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Il gruppo di lavoro impegnato nell'attività è costituito da due professori ordinari di Impianti nucleari del Politecnico di Torino (Dipartimento Energia), Mario De Salve e Bruno Panella e da una Dottoranda iscritta al II anno di Dottorato in Energetica, Grazia Monni.

De Salve e Panella lavorano da più di 35 anni al Politecnico nel campo della Ingegneria nucleare, con particolare riferimento alla termoidraulica e alla sicurezza e hanno portato avanti molte ricerche sperimentali nel laboratorio di termoidraulica del Dipartimento di Energetica (ora Dipartimento Energia) del Politecnico di Torino, pubblicando i risultati su rivista o in atti di Congresso nazionali e internazionali. Sono anche autori di diversi rapporti nell'ambito dei PAR trascorsi.

Monni, laureata con una tesi di termo - fluidodinamica computazionale sul combustibile dei reattori veloci a gas, svolta a Cadarache, sotto la loro guida ha portato avanti ricerche sperimentali nel campo della strumentazione bifase, ed è coautrice di alcune pubblicazioni apparse in Atti di Congressi anche internazionali.

Maggiori dettagli e l'elenco delle pubblicazioni più recenti si possono trovare nella rubrica del sito Web del Politecnico di Torino (http://www.polito.it).

APPENDICE I : Matrice Prove Monofase

N°1	W_{water} [kg/s]	p_{inlet} [bar]	V [m/s]	Re	Δp venturi [mmbar]	Δp SP [mmbar]
	0.094	1.089	0.317	6167	18.8	5.1
	0.186	1.130	0.624	12152	36.4	9.9
	0.300	1.303	1.006	19588	77.5	33.3
	0.544	1.713	1.825	35549	228.4	86.3
	0.608	1.907	2.039	39721	290.0	109.7
	0.747	2.306	2.505	48789	306.5	166.2
N°2	W_{water} [kg/s]	p_{inlet} [bar]	V [m/s]	Re	Δp venturi [mmbar]	Δp SP [mmbar]
	0.156	1.080	0.521	10157	18.4	8.4
	0.253	1.190	0.847	16505	45.9	22.4
	0.340	1.275	1.141	22218	86.3	34.0
	0.528	1.600	1.769	34461	215.8	87.2
	0.717	2.075	2.402	46794	415.6	142.1
	0.814	2.475	2.728	53142	559.5	190.3
	0.958	3.025	3.212	62574	757.7	319.4
N°3	W_{water} [kg/s]	p_{inlet} [bar]	V [m/s]	Re	Δp venturi [mmbar]	Δp SP [mmbar]
	0.122	1.080	0.409	7980	12.5	9.3
	0.275	1.290	0.921	17956	60.9	26.4
	0.439	1.555	1.470	28657	165.6	60.5
	0.594	1.605	1.990	38814	290.6	102.3
N°4	W_{water} [kg/s]	p_{inlet} [bar]	V [m/s]	Re	Δp venturi [mmbar]	Δp SP [mmbar]
	0.025	1.010	0.084	1632	1.6	0.0
	0.036	1.030	0.121	2358	2.0	0.0
	0.044	1.040	0.149	2902	2.2	1.6
	0.050	1.050	0.167	3265	2.5	1.6
	0.056	1.055	0.186	3627	2.9	1.6
	0.061	1.060	0.205	3990	3.5	1.6
	0.078	1.070	0.260	5078	6.7	3.1
	0.144	1.082	0.484	9431	16.7	7.0
	0.217	1.275	0.725	14147	36.8	15.7
	0.297	1.305	0.995	19407	69.4	26.6
	0.325	1.275	1.088	21221	82.1	32.9
	0.336	1.280	1.125	21946	86.8	32.9
	0.433	1.555	1.451	28294	154.7	59.5
	0.626	1.800	2.097	40900	317.2	112.7
	0.750	2.105	2.511	48971	441.9	156.6
	0.775	2.110	2.595	50603	471.9	168.3
	0.778	2.120	2.604	50784	478.2	169.1
	0.897	2.650	3.004	58584	683.4	239.5

Tab. 6: Matrice risultati sperimentali prove monofase acqua

N°1	W_{air} [kg/s]	p_{inlet} [bar]	ρ_{air} [kg/m^3]	V [m/s]	Re	Δp venturi [mmbar]	Δp SP [mmbar]
	0.00078	0.95	1.13	2.30	2768	2.2	1.5
	0.00150	0.95	1.13	4.44	5352	4.0	3.1
	0.00229	0.98	1.16	6.60	8166	4.4	6.2
	0.00302	0.98	1.16	8.73	10791	5.4	6.2
	0.00374	0.98	1.16	10.81	13365	8.3	9.2
	0.00779	1.03	1.22	21.41	27840	32.1	30.8
	0.01117	1.10	1.31	28.59	39895	66.1	55.5
	0.01276	1.18	1.40	30.57	45557	75.5	70.9
	0.01394	1.23	1.46	32.05	49803	88.5	82.4
	0.01442	1.20	1.43	33.82	51486	92.5	83.2
	0.01339	1.18	1.40	32.10	47835	85.2	77.0
	0.01322	1.18	1.40	31.68	47214	85.3	73.9
N°2	W_{air} [kg/s]	p_{inlet} [bar]	ρ_{air} [kg/m^3]	V [m/s]	Re	Δp venturi [mmbar]	Δp SP [mmbar]
	0.00008	0.98	1.16	0.24	293	1.1	0.0
	0.00039	0.98	1.16	1.12	1385	1.3	0.0
	0.00079	0.98	1.16	2.28	2818	1.5	0.0
	0.00235	1.00	1.19	6.61	8376	4.9	3.9
	0.00384	1.00	1.19	10.82	13708	10.5	11.8
	0.00813	1.05	1.25	21.84	29052	34.9	31.5
	0.01196	1.13	1.34	29.95	42700	74.0	70.8
	0.01196	1.13	1.34	29.95	42700	74.2	70.8
	0.01504	1.20	1.43	35.33	53724	99.7	102.3
	0.01727	1.25	1.49	38.95	61693	131.2	129.9
N°3	W_{air} [kg/s]	p_{inlet} [bar]	ρ_{air} [kg/m^3]	V [m/s]	Re	Δp venturi [mmbar]	Δp SP [mmbar]
	0.00821	1.08	1.28	21.51	29306	45.3	30.5
	0.01195	1.15	1.37	29.27	42647	82.8	59.5
	0.01299	1.18	1.40	31.13	46347	98.4	77.2
	0.01345	1.20	1.43	31.57	48004	101.6	73.4
N°4	W_{air} [kg/s]	p_{inlet} [bar]	ρ_{air} [kg/m^3]	V [m/s]	Re	Δp venturi [mmbar]	Δp SP [mmbar]
	0.00080	1.00	1.19	2.26	2863	0.8	0.0
	0.00197	1.00	1.19	5.55	7035	3.0	0.0
	0.00397	1.03	1.22	10.91	14166	10.7	10.7
	0.00825	1.08	1.28	21.61	29443	37.6	29.1
	0.01156	1.13	1.34	28.93	41243	78.6	55.6
	0.01182	1.13	1.34	29.60	42191	78.7	55.6
	0.01330	1.16	1.38	32.22	47463	80.5	76.0
	0.01317	1.18	1.40	31.57	47004	82.1	79.1

Tab. 7: Matrice risultati sperimentali prove monofase aria

APPENDICE II : Matrice Risultati Sperimentali Bifase

	Flow pattern osservato	J_{tot} [m/s]	x [-]	α_{WMS} [-]	Δp venturi [mmbar]	Δp SP [mmbar]
RUN 1	slug/plug	0.42	0.00154	0.25	5.8	9.7
RUN 2	stratified wavy /slug	0.33	0.00303	0.29	0.3	7.2
RUN 3	slug	0.79	0.00882	0.48	1.8	9.0
RUN 4	slug	0.88	0.00450	0.51	6.4	12.7
RUN 5	slug lento/ startified wavy	1.25	0.01468	0.63	4.8	11.1
RUN 6	slug	1.33	0.00748	0.62	10.4	16.6
RUN 7	plug	1.09	0.00040	0.25	68.7	60.9
RUN 8	plug/bolle	1.66	0.00030	0.21	184.4	141.3
RUN 9	bubbly	2.10	0.00027	0.20	307.1	216.6
RUN 10	bubbly	2.85	0.00028	0.17	587.4	343.9
RUN 11	stratified wavy/ slug	2.38	0.02581	0.73	7.6	12.6
RUN 12	stratified wavy/ slug	6.72	0.06537	0.81	11.9	17.8
RUN 13	stratified/annular	10.92	0.11077	0.90	22.4	31.3
RUN 14	annular	21.73	0.22188	0.95	76.6	104.6
RUN 15	slug	2.96	0.00559	0.60	80.2	87.8
RUN 16	slug	3.76	0.00374	0.46	282.6	305.7
RUN 17	stratified/bubbly	4.23	0.00354	0.39	452.6	343.9
RUN 18	slug	7.22	0.01766	0.76	68.0	112.0
RUN 19	slug	7.79	0.01555	0.68	331.0	334.9
RUN 20	slug	7.84	0.01574	0.66	373.6	343.4
RUN 21	slug	11.64	0.03192	0.75	282.7	338.0
RUN 22	stratified wavy/ slug	0.33	0.00316	0.29	3.1	0.9
RUN 23	stratified wavy/ slug	0.55	0.00606	0.47	5.3	2.0
RUN 24	stratified wavy/ slug	1.22	0.01498	0.64	6.5	4.9
RUN 25	stratified wavy/ slug	2.35	0.02964	0.62	3.8	9.0
RUN 26	stratified wavy/ annular	6.70	0.08408	0.83	12.9	20.8
RUN 27	stratified wavy/ annular	10.90	0.13448	0.87	26.8	39.0
RUN 28	slug/plug	0.51	0.00105	0.26	10.7	6.5
RUN 29	slug/plug	0.73	0.00209	0.45	14.5	10.0
RUN 30	slug	1.42	0.00530	0.62	13.9	18.2
RUN 31	slug	2.54	0.01074	0.66	13.8	31.8
RUN 32	slug/annular	6.88	0.03295	0.79	27.2	77.1
RUN 33	slug/annular	11.09	0.05687	0.82	40.6	129.9
RUN 34	plug/slug	0.70	0.00065	0.26	22.1	16.2
RUN 35	plug/slug	0.92	0.00132	0.36	25.0	22.8
RUN 36	slug	1.57	0.00366	0.57	23.2	37.3
RUN 37	slug	2.91	0.00529	0.64	71.1	81.9
RUN 38	slug/annular	7.07	0.02318	0.78	90.7	148.9
RUN 39	slug/annular	11.27	0.04065	0.80	122.1	220.1
RUN 40	plug/bubbly	1.16	0.00038	0.20	84.6	69.8
RUN 41	plug/slug	1.39	0.00076	0.28	90.0	75.1
RUN 42	slug	2.07	0.00207	0.47	123.1	118.8
RUN 43	slug	3.19	0.00453	0.57	153.0	181.7
RUN 44	slug/annular	7.53	0.01729	0.72	285.9	316.3
RUN 45	slug/annular	9.66	0.02454	0.74	317.5	340.2
RUN 46	bubbly in the upper part of pipe	1.63	0.00030	0.23	177.9	138.4
RUN 47	plug/bubbly	1.86	0.00063	0.29	185.3	167.4
RUN 48	stratified intermittent	2.54	0.00170	0.42	224.1	226.7

RUN 49	stratified intermittent	3.66	0.00372	0.53	269.2	299.2
RUN 50	slug/annular	8.00	0.01457	0.68	445.0	343.8
RUN 51	slug/annular	10.12	0.02103	0.69	510.6	344.2
RUN 52	bubbly in the upper part of pipe	2.09	0.00027	0.22	306.4	216.3
RUN 53	bubbly in the upper part of pipe	2.32	0.00059	0.27	346.8	278.9
RUN 54	stratified intermittent	3.00	0.00162	0.37	374.7	343.4
RUN 55	stratified intermittent	4.12	0.00351	0.47	435.6	344.2
RUN 56	annular intermittent	8.47	0.01383	0.61	678.2	344.2
RUN 57	annular intermittent	10.59	0.02003	0.63	764.0	344.2
RUN 58	stratified	21.23	0.61184	0.95	48.3	39.0
RUN 59	annular	21.26	0.39863	0.93	66.5	72.9
RUN 60	annular	21.28	0.32387	0.92	71.7	82.7
RUN 61	annular	21.30	0.25928	0.91	86.1	114.4
RUN 62	annular/ intermittent	21.40	0.16251	0.88	122.1	196.6
RUN 63	annular/ intermittent	21.49	0.12850	0.86	167.3	290.7
RUN 64	annular	29.28	0.70552	0.97	95.9	81.1
RUN 65	annular	29.31	0.50212	0.94	109.7	127.5
RUN 66	annular	29.33	0.42417	0.94	113.9	148.5
RUN 67	annular	29.36	0.35296	0.93	143.1	196.3
RUN 68	annular/ intermittent	29.45	0.23803	0.89	199.0	314.4
RUN 69	annular/ intermittent	29.54	0.19438	0.88	267.5	344.2
RUN 70	annular/mist	31.70	0.72882	0.97	116.3	101.9
RUN 71	annular	31.73	0.54436	0.95	154.7	183.5
RUN 72	annular	31.74	0.46443	0.94	154.6	201.7
RUN 73	annular	31.77	0.38029	0.93	160.6	222.7
RUN 74	annular/ intermittent	31.86	0.27240	0.90	255.0	344.2
RUN 75	annular/ intermittent	31.94	0.22448	0.88	293.8	344.2

Tab. 8: Matrice risultati sperimentali prove bifase aria-acqua