



## Ricerca di Sistema elettrico

Prove sperimentali e modello numerico  
dello Spool Piece (costituito da Venturi e  
misuratore di grado di vuoto) in deflusso bifase

*M. De Salve, G. Monni, B. Panella*

PROVE SPERIMENTALI E MODELLO NUMERICO DELLO SPOOL PIECE (COSTITUITO DA VENTURI E MISURATORE DI GRADO DI VUOTO) IN DEFLUSSO BIFASE

M. De Salve, G. Monni, B. Panella (POLITO)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Felice De Rosa, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Felice De Rosa.

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi



**CIRTEN**

**Consorzio Interuniversitario per la Ricerca TEcnologica Nucleare**



**POLITECNICO DI TORINO**

**Prove sperimentali e modello numerico dello Spool Piece  
(costituito da Venturi e misuratore di grado di vuoto) in deflusso  
bifase**

**Autori**

M. De Salve

G. Monni

B. Panella

**CERSE-POLITO RL 1565/2013**

**TORINO Agosto 2013**

Lavoro svolto in esecuzione dell'Attività LP1-C2

## **ABSTRACT**

Nell’ambito dell’attività LP2 “Reattori evolutivi INTD”, con riferimento ai reattori di piccola e media taglia, il Dipartimento 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, da utilizzare nell’impianto SPES3.

L’impianto SPES3 (Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza) è un simulatore integrato di reattori di piccola taglia modulari (SMR), capace di verificare la risposta del reattore a fronte di transitori incidentali e fornire dati sperimentali per la validazione di codici di calcolo per le analisi di sicurezza.

Il circuito SPES-3, opera a elevate pressioni e temperature, e con elevate velocità dei fluidi. A causa delle condizioni di funzionamento, nella simulazione della rottura di una tubazione, si instaura un deflusso bifase nei condotti di collegamento tra il punto di rottura ed il componente di raccolta del fluido uscente. Pertanto, i punti di misura dei circuiti idraulici a monte ed a valle della valvola di rottura sono interessati dalla presenza di fluido bifase. Poiché un unico strumento non è in grado di fornire la portata delle due fasi all’interno del condotto, la messa a punto di uno “Spool Piece” (SP), inteso come un insieme di strumenti connessi in serie, è necessaria per la misura delle portate in presenza di deflusso bifase.

Nel presente lavoro vengono presentati i risultati della campagna sperimentale effettuata per caratterizzare lo SP costituito da un Venturi, tipo corto e sonda ECP installati in una *test section* verticale che opera con un deflusso bifase aria-acqua, ad elevati gradi di vuoto. La metodologia sviluppata per analizzare i segnali e modellizzare il funzionamento dello SP sono qui descritti e discussi.

## SOMMARIO

INDICE DELLE FIGURE .....	4
INDICE DELLE TABELLE .....	5
1 INTRODUZIONE .....	6
2 DEFLUSSO ANULARE DISPERSO .....	8
3 TEORIA E CARATTERISTICHE DEGLI STRUMENTI DELLO SPOOL PIECE .....	10
3.1 Venturi .....	10
3.2 Sonda ECP .....	18
4 CIRCUITO SPERIMENTALE E STRUMENTAZIONE.....	25
4.1 Sezione di prova verticale.....	25
4.2 Sistema acquisizione dati.....	25
5 MATRICE SPERIMENTALE E ANALISI DEI DATI.....	27
5.1 Analisi del comportamento del Venturi in deflusso bifase .....	29
5.2 Analisi del comportamento della sonda ECP in deflusso bifase.....	35
6 MODELLO DELLO SP .....	40
7 CONCLUSIONI .....	44
BIBLIOGRAFIA.....	45
ALLEGATO I.....	47
ALLEGATO II.....	48

## INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1: Taratura monofase aria del Venturi.....	12
Fig. 2: Coefficiente di scarico sperimentale monofase aria per il Venturi .....	12
Fig. 3: Bilancio di quantità di moto nell'elemento infinitesimo del volume di controllo .....	15
Fig. 4: Schema sonda Capacitiva SIET .....	19
Fig. 5: Sonda SIET. Disegno progettuale (a) e foto (b).....	19
Fig. 6: Modello numerico sonda ECP: (a) risposta monofase aria acqua, (b) rapporto tra capacità misurate in monofase, in funzione dell'angolo di misura .....	21
Fig. 7: Schematizzazione della geometria nel modello numerico bifase della sonda ECP .....	21
Fig. 8: Modello numerico sonda ECP: risposta per deflusso omogeneo aria-acqua. (a) Elettrodi esterni. (b) Elettrodo centrale.....	22
Fig. 9: Modello numerico sonda ECP: risposta deflusso anulare ideale aria acqua. (a) Elettrodi esterni. (b) Elettrodo centrale.....	22
Fig. 10: Modello numerico sonda ECP: risposta deflusso anulare-disperso aria acqua. (a) Elettrodi esterni. (b) Elettrodo centrale.....	23
Fig. 11 Segnale monofase relative agli elettrodi esterni per la sonda ECP .....	24
Fig. 12 Confronto tra valore sperimentale e numerico del rapporto dei segnali monofase per gli elettrodi esterni della sonda ECP .....	24
Fig. 13: Sezione di prova verticale .....	26
Fig. 14: Grado di vuoto sperimentale in funzione delle velocità superficiali della miscela bifase aria-acqua .....	27
Fig. 15: Grado di vuoto sperimentale in funzione del titolo fluidodinamico .....	27
Fig. 16: Entrainment calcolato con il modello di Ishii, in funzione del grado di vuoto sperimentale (QCV). .....	28
Fig. 17: Spessore del film liquido calcolato con il modello di Ishii, in funzione delle velocità superficiali delle fasi .....	28
Fig. 18: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione della portata totale.....	29
Fig. 19: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione delle velocità superficiali .....	29
Fig. 20: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione delle cadute di pressione monofase aria.....	30
Fig. 21: Cadute di pressione bifase nel Venturi normalizzate rispetto al monofase aria in funzione del titolo.....	30
Fig. 22: Moltiplicatore bifase: confronto tra correlazioni e dati sperimentali .....	31
Fig. 23: Cadute di pressione nel Venturi stimate e sperimentali (rombo) tramite moltiplicatore bifase.....	31
Fig. 24: Coefficiente di scarico del Venturi in deflusso bifase.....	32
Fig. 25: Confronto tra cadute di pressione nel Venturi nel tratto convergente e cadute di pressione irreversibili .....	33
Fig. 26: Cadute di pressione irreversibili nel Venturi in funzione delle velocità superficiali delle fasi.....	33
Fig. 27: Cadute di pressione irreversibili nel Venturi in funzione delle cadute di pressione irreversibili monofase aria.....	34
Fig. 28: Analisi della correlazione per la stima delle cadute di pressione irreversibili nel Venturi .....	35
Fig. 29: Confronto tra dati sperimentali e correlazione per le cadute di pressione irreversibili.....	35
Fig. 31: Segnale normalizzato associato alla misura tra elettrodi esterni in funzione del grado di vuoto e della velocità superficiale della fase aria.....	36
Fig. 32: Segnale normalizzato associato alla misura tra elettrodi esterni in funzione del grado di vuoto e della velocità superficiale della fase liquida.....	37
Fig. 33: Confronto tra segnale normalizzato e modelli numerici in funzione del grado di vuoto (a) e dello spessore di film liquido (b) per le coppie di misura a 22.5° e 180° .....	38
Fig. 34: Segnale normalizzato associato alla misura dell'elettrodo centrale in funzione delle velocità delle due fasi .....	38
Fig. 35: Segnale normalizzato associato alla misura dell'elettrodo centrale in funzione di (a) grado di vuoto e (b) spessore del film .....	39
Fig. 36: Confronto tra segnale normalizzato e modelli numerici in funzione del grado di vuoto per l'elettrodo centrale .....	39
Fig. 37: Confronto tra segnale normalizzato e modelli numerici in funzione dello spessore di film liquido per l'elettrodo centrale.....	40
Fig. 38: Confronto tra titolo sperimentale e titolo ottenuto dal modello del Venturi con moltiplicatore bifase .....	41

Fig. 39: Confronto portata aria sperimentale e ottenuta dal modello del Venturi con moltiplicatore bifase...	41
Fig. 40: Confronto portata acqua sperimentale e ottenuta dal modello del Venturi con moltiplicatore bifase	42
Fig. 41: Confronto tra titolo sperimentale e titolo ottenuto dal modello del Venturi con coefficiente scarico bifase .....	42
Fig. 42: Confronto portata aria sperimentale e ottenuta dal modello del Venturi con coefficiente scarico bifase .....	43
Fig. 43: Confronto portata acqua sperimentale e ottenuta dal modello del Venturi con coefficiente scarico bifase .....	43

## **INDICE DELLE TABELLE**

Tab. 1: Caratteristiche Venturi .....	11
---------------------------------------	----

# 1 INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'attività LP2 "Reattori evolutivi INTD", con riferimento ai reattori di piccola e media taglia, il Dipartimento 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, da utilizzare nell'impianto SPES3.

L'impianto SPES3 (Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza) è un simulatore integrato di reattori di piccola taglia modulari (SMR), capace di verificare la risposta del reattore a fronte di transitori incidentali e fornire dati sperimentali per la validazione di codici di calcolo per le analisi di sicurezza.

Il circuito SPES-3, opera a elevate pressioni e temperature, e con elevate velocità dei fluidi. A causa delle condizioni di funzionamento, nella simulazione della rottura di una tubazione, si instaura un deflusso bifase nei condotti di collegamento tra il punto di rottura ed il componente di raccolta del fluido uscente. Pertanto, i punti di misura dei circuiti idraulici a monte ed a valle della valvola di rottura sono interessati dalla presenza di fluido bifase.

Poiché un unico strumento non è in grado di fornire la portata delle due fasi all'interno del condotto, la messa a punto di uno "Spool Piece" (SP), inteso come un insieme di strumenti connessi in serie, è necessaria per la misura delle portate in presenza di deflusso bifase. 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  $\rho u^2$  (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 ( $\rho u$ ), la sonda a impedenza un segnale proporzionale al grado di vuoto  $\alpha$  ed infine il gamma-densitometro un segnale proporzionale alla densità della miscela  $\rho$ .

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 valutazione 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 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%. 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.

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][7][8] e di una sonda tomografica capacitiva (Electrical Capacitance Probe – ECP) sviluppata presso la SIET [9][10][11]. 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 uno SP composto da un Venturi e da un misuratore di grado di vuoto: WMS e sonda ECP 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 ECP o WMS dovrebbero consentire la ricostruzione della distribuzione delle fasi all'interno del condotto e di ottenere, oltre che il valore medio della frazione di vuoto di gas/vapore, altri importanti parametri fluidodinamici, utili per l'interpretazione del segnale del Venturi. In [12] è riportato il modello e l'analisi sperimentale effettuata per lo SP composto da Venturi, tipo classico, e WMS, installato in un circuito orizzontale. Nel presente lavoro vengono presentati i risultati della campagna sperimentale effettuata per caratterizzare lo SP costituito da un Venturi, tipo corto e sonda ECP installati in una *test section* verticale che opera con un deflusso bifase aria-acqua, ad elevati gradi di vuoto. La metodologia sviluppata per analizzare i segnali e modellizzare il funzionamento dello SP sono qui descritti e discussi.

## 2 DEFLUSSO ANULARE DISPERSO

Nel presente capitolo viene presentato un modello semplificato del deflusso anulare in condotti verticali.

Il deflusso anulare può essere schematizzato considerando la regione del film liquido alla parete e la regione centrale occupata dal *core* gassoso.

In un deflusso all'interno di un condotto oltre alla forza inerziale occorre considerare la forza gravitazionale. Nel caso di deflusso verticale la forza di gravità, agendo lungo l'asse della tubazione rende il deflusso molto vicino alle condizioni di perfetta simmetria. Nei condotti orizzontali invece la forza di gravità agisce perpendicolarmente alla direzione del deflusso, e questo tende a far depositare il liquido nella parte inferiore del condotto e il gas nella parte superiore, rendendo la distribuzione delle fasi fortemente asimmetrica rispetto all'asse del condotto. L'effetto della forza gravitazionale deve quindi essere tenuto in considerazione nella modellizzazione della distribuzione e dello spessore del film lungo la circonferenza. Considerando la simmetria del deflusso in un condotto verticale, il film liquido è caratterizzato tramite lo spessore medio, l'ampiezza e la frequenza delle onde all'interfaccia liquido-gas, mentre il *core* è caratterizzato tramite la quantità e il diametro delle gocce di liquido presenti.

A bassi valori relativi di portata d'acqua e aria si può trascurare il fenomeno di *entrainment* e la massa di liquido è concentrata nel film. All'aumentare della velocità dell'aria, il valore di *entrainment* aumenta a causa dello strappamento del film liquido. Un aumento della portata di liquido, produce invece un incremento di ampiezza delle onde con formazione di un film irregolare ondoso e conseguente maggiore *entrainment* di liquido verso il *core* gassoso.

Considerando l'analisi qualitativa sopra descritta il valore di grado di vuoto medio sulla sezione può essere scritto come

$$\alpha = \alpha_c \cdot (1 - \alpha_d) \quad (1)$$

dove

$$\alpha_d = \frac{A_d}{A_c} \quad (2)$$

$$\alpha_c = \frac{A_c}{A} = 1 - \alpha_f \quad (3)$$

$A_c$  l'area relativa alla regione del *core*,  $\alpha_d$  è la frazione dell'area occupata dalle gocce liquide rispetto all'area occupata dal *core* gassoso,  $\alpha_c$  è la frazione del condotto occupata dal *core* e  $\alpha_f$  è la frazione del condotto occupata dal film.

Per valutare questi parametri occorre definire la frazione di liquido contenuta nel *core* e la frazione di liquido contenuta nel film.

Ishii and Mishima [13] hanno sviluppato un modello del deflusso anulare in cui l'evoluzione del deflusso viene caratterizzata tramite un bilancio di forze che agiscono all'interfaccia liquido-gas. Nel modello viene derivato il valore critico di  $Re$  che produce *entrainment* nonché il valore di equilibrio della frazione di liquido contenuta nel *core* ( $E_\infty$ ):

$$E_\infty = \tanh(7.25 \cdot 10^{-7} \cdot We^{1.25} \cdot Re_f^{0.25}) \quad (4)$$

dove il numero di Weber, che esprime il rapporto tra forze di inerzia e forze dovute alla tensione superficiale, è definito come:

$$We = \frac{\rho_g \cdot J_g^2 \cdot D}{\sigma} \left( \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \quad (5)$$

e il numero di Reynolds è espresso da:

$$\text{Re}_f = \frac{\rho_l \cdot U_l \cdot \delta_f}{\mu_l} \quad (6)$$

$\rho_g$ ,  $\mu_g$ ,  $J_g$  e  $\rho_l$ ,  $\mu_l$ ,  $J_l$  sono rispettivamente la densità, la viscosità dinamica e la velocità superficiale di fase gassosa e  $\sigma$  è la tensione superficiale. La velocità  $U_f$  rappresenta invece la velocità media effettiva della fase liquida che scorre nel film, definita nell'equazione (12).

In deflusso anulare puro, il valore di *entrainment* è nullo, quindi si realizza il massimo valore di spessore di film realizzabile  $\delta_{\max}$  che può essere calcolato a partire dalla conoscenza del grado di vuoto come:

$$\alpha = \frac{(D - 2 \cdot \delta_{\max})^2}{D^2} \quad (7)$$

In queste condizioni le velocità medie effettive delle due fasi  $U_l$  e  $U_g$  possono essere derivate come:

$$U_g = \frac{J_g}{\alpha} \quad (8)$$

$$U_l = \frac{J_l}{1 - \alpha} \quad (9)$$

Nel caso più realistico in cui viene considerato l'*entrainment*, le velocità medie effettive vengono ricavate come di seguito riportato, assumendo che le gocce si muovano alla stessa velocità del gas all'interno del *core*:

$$U_g = J_g / (\alpha_c - \alpha_d) \quad (10)$$

$$U_l = (1 - E_\infty) \cdot U_f + E_\infty \cdot U_g \quad (11)$$

$$U_f = (1 - E_\infty) \cdot J_l / (1 - \alpha_c) \quad (12)$$

e lo spessore del film liquido può essere riscritto come:

$$\delta = \frac{D}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \alpha_d}} \right) \quad (13)$$

Considerando quindi le velocità medie effettive delle fasi è possibile stimare il valore dello *slip ratio* definito come:

$$S = U_g / U_l \quad (14)$$

Lo *slip ratio*  $S$  definito come il rapporto tra la velocità media (su  $A_g$ ) della fase gas e la velocità media (su  $A_l$ ) della fase liquida, è un importante parametro che permette di mettere in relazione le principali grandezze del deflusso bifase:

$$\alpha = \left( 1 + \frac{1 - x}{x} \frac{\rho_v}{\rho_l} S \right)^{-1} \quad (15)$$

### 3 TEORIA E CARATTERISTICHE DEGLI STRUMENTI DELLO SPOOL PIECE

Nel presente capitolo vengono analizzate le caratteristiche del Venturi e viene modellizzata la risposta dello strumento in deflusso monofase e in deflusso bifase anulare.

Viene quindi descritta la sonda ECP, e viene analizzata tramite un software FEM la risposta dello strumento a un deflusso bifase anulare e anulare disperso.

#### 3.1 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.

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:

$$Q = CA_2 \left( \frac{2\Delta p}{\rho(1-\beta^4)} \right)^{0.5} \quad (16)$$

dove:

$Q$	Portata Volumetrica
$C$	Coefficiente di scarico (adimensionato e specifico del tipo di misuratore)
$A_2$	Area sezione ristretta
$\Delta p = p_1 - p_2$	Caduta di pressione nel misuratore (misurata tra ingresso e sezione contratta)
$p_1$	Pressione ingresso
$p_2$	Pressione nella sezione ristretta $A_2$
$\beta = D_2/D_1$	Rapporto tra diametri (diametro in $A_2$ / diametro del tubo)
$\rho$	Densità del fluido.

Se inoltre, si considerano gli effetti dovuti alla comprimibilità del fluido e all'espansione termica, l'equazione diventa:

$$Q = \left[ CA_2 \left( \frac{2\Delta p}{\rho(1-\beta^4)} \right)^{0.5} \right] \cdot F_a \cdot Y \quad (17)$$

dove:

$F_a$	Fattore di correzione di espansione termica
$Y$	Coefficiente di comprimibilità.

I valori numerici del coefficiente  $F_a$  sono forniti dalla norma ISO5167 [14] e si basano su dati sperimentali.

Per liquidi (fluidi incomprimibili)  $F_a = 1$

Per gas e vapore (fluidi comprimibili)  $F_a > 1$  e 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  $\beta$ . 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 tarature 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 taratura 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.

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 un deflusso monofase l'accuratezza della misura di  $\Delta p$  è pari a circa  $\pm 0.2\%$ . Questo significa che al 10% della portata di fondo scala l'incertezza relativamente bassa sulla misura della caduta di pressione si traduce in una 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 [15].

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

## Caratteristiche del Venturi e taratura monofase

Le caratteristiche geometriche e di funzionamento del Venturi utilizzato nel presente studio sono riportate in Tab. 1. In *ALLEGATO I* è riportato il disegno tecnico dello strumento.

Il Venturi corto, utilizzato nel presente studio, è stato progettato e fatto costruire in plexiglass secondo i criteri delle norme UNI, con un angolo divergente pari all'angolo del tratto convergente ( $\theta=21^\circ$ , Venturi simmetrico). Rispetto al Venturi classico il Venturi di tipo corto si distingue per la scelta di avere un angolo del tratto divergente superiore ai  $15^\circ$ ; questa scelta riduce i costi di fabbricazione ma comporta cadute di pressione irreversibili maggiori a causa dei fenomeni di distacco della vena fluida. La scelta di installare un misuratore simmetrico consente comunque la misura della caduta di pressione in entrambi i versi di deflusso e rappresenta una scelta obbligata nei casi in cui si possa presentare un reflusso o un inversione di portata.

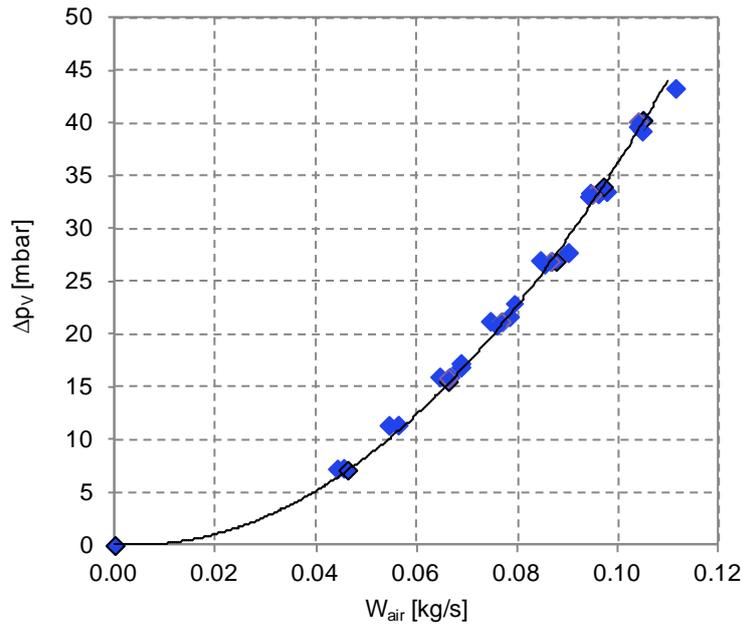
Caratteristiche Venturi		
$D_1$	80	mm
$D_2$	40	mm
$\beta$	0.5	-
$\theta_{convergente} = \theta_{divergente}$	21	°
$L_{tot\_Venturi}$	340	mm
$L_{upstream}$	628	mm
$L_{downstream}$	628	mm

**Tab. 1: Caratteristiche Venturi**

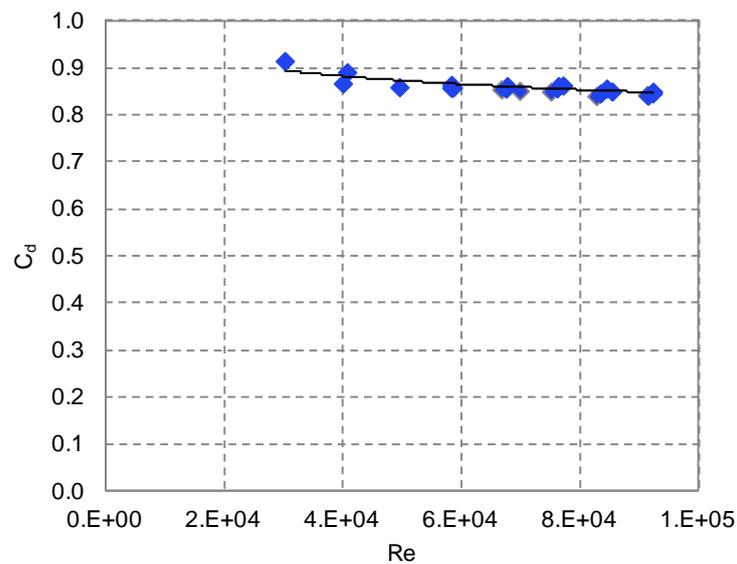
Il comportamento dello strumento in deflusso monofase aria è stato analizzato per ricavare il coefficiente di scarico ( $C$ ) dello strumento, come riportato in Fig. 1. Il coefficiente monofase aria è stato calcolato in base alle misure sperimentali di portata e pressione (Equazione (18)) considerando  $F_a$  e  $Y$  pari a uno:

$$C = \frac{Q}{F_a \cdot Y \cdot A_2} \cdot \left( \frac{\rho(1 - \beta^4)}{2\Delta p} \right)^{0.5} \quad (18)$$

La curva ricavata è riportata in Fig. 2 in funzione del numero di Reynolds.



**Fig. 1: Taratura monofase aria del Venturi**



**Fig. 2: Coefficiente di scarico sperimentale monofase aria per il Venturi**

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

$$C = a \cdot \text{Re}^b \quad (19)$$

dove i parametri  $a$  e  $b$  vengono ricavati da tarature sperimentali e  $C$  assume un valore costante, pari a 0.84 per numeri di Reynolds maggiori di  $7 \cdot 10^4$ .

Il numero di  $\text{Re}$  è stato calcolato come:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (20)$$

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.

### Modelli per il 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.

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 [16] 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  $\Delta p$  bifase con la  $\Delta p$  monofase liquida o gassosa.

In particolare, nel caso di deflusso bifase a elevati gradi di vuoto ( $\alpha > 95\%$ ) l'approccio classico consiste nel correggere la caduta di pressione misurata tramite un fattore moltiplicativo che tiene conto della presenza della fase liquida:

$$\Delta p_{TP} = \Delta p_g \cdot \phi_g^2 \quad (21)$$

Le correlazioni attualmente utilizzate sono 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 ( $\beta$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $L$ , 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.

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.

Nella modellizzazione dello SP composto da Venturi classico e WMS [12] si è scelto di utilizzare un modello basato sulla definizione di densità equivalente vista dal Venturi e di coefficiente di scarico bifase.

Il modello sviluppato consente di valutare le portate massiche di acqua e aria con un'incertezza massima del 10% e del 30% per acqua e aria rispettivamente in un range del titolo compreso tra 0 e 0.75.

Il modello, pur consentendo una stima delle portate in un ampio range di parametri fluidodinamici, non ha la pretesa di modellizzare il deflusso, e non è quindi adatto a cogliere e interpretare le piccole variazioni dei parametri.

Poiché nel caso in esame si lavora con valori di titolo compresi tra 0.78 e 1 e con variazioni del grado di vuoto comprese tra 0.95 e 1, sono possibili due approcci alternativi:

- Modello fluidodinamico dello strumento: prevede lo sviluppo di un modello del deflusso anulare per giungere a una corretta interpretazione dei segnali dello strumento.
- Modello classico: utilizzo di fattori correttivi basati su valutazioni teorico-sperimentali che consentano di correggere, rispetto al caso monofase, la caduta di pressione nello strumento per tenere conto della presenza della seconda fase (modello a scatola grigia).

### Modello fluidodinamico per il Venturi

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

$$\left( -\frac{dp}{dz} \right)_{TP} = \frac{4\tau}{D} + G_{TP}^2 \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{\rho_{TP}} \right) + \rho_{TP} g \sin \theta \quad (22)$$

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

$\tau$  è lo sforzo di taglio alla parete [ $N/m^2$ ],

$\rho_{TP}$  è la densità del fluido bifase [ $kg/m^3$ ],

$G$  è la portata areica [ $kg/(m^2s)$ ],

e  $\theta$  è l'angolo di inclinazione del condotto rispetto all'orizzontale.

Le cadute di pressione per attrito sono costituite dalla somma di perdite di carico distribuite e perdite di carico localizzate.

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

$$f_F = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \frac{G^2}{\rho}} \quad (23)$$

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

$$- \text{Deflusso Laminare (relazione analitica): } f = 64/Re \quad (24)$$

$$- \text{Deflusso turbolento (Blasius): } f = 4 \cdot 0.0079/Re^{1/4} \quad (25)$$

$$- \text{Deflusso turbolento (Colebrook-White): } \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon/D}{3.71} \right) \quad (26)$$

Le perdite di carico distribuite pertanto risultano essere pari a:

$$\left( \frac{dp}{dz} \right)_f = f \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{2} \frac{G^2}{\rho} \quad (27)$$

mentre le perdite localizzate vengono solitamente espresse come:

$$\Delta p_{loc} = K \cdot \frac{G^2}{\rho} \quad (28)$$

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

$$K = f \cdot \left( \frac{L}{D} \right)_{equ} \quad (29)$$

dove il coefficiente  $f$  viene calcolato tramite le correlazioni sopra riportate.

Nel caso di deflusso bifase all'interno del Venturi, occorre riscrivere le cadute di pressione, considerando i termini addizionali dovuti all'interazione tra le due fasi.

$$\left( -\frac{d p}{d z} \right)_{TP} = \frac{4\tau}{D} + G_{TP}^2 \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{\rho_{TP}} \right) + \rho_{TP} g \sin \theta + \left( \frac{d p}{d z} \right)_{int} \quad (30)$$

In particolare nel caso di deflusso anulare e anulare disperso occorre definire i termini relativi alle interazioni tra la regione del *core* e la regione del film, che si muovono a velocità differenti nelle varie sezioni del misuratore e tra le gocce e il gas all'interno del *core*.

Il film, caratterizzato da uno spessore medio e da un'ampiezza delle onde, rappresenta una superficie rugosa per il *core* gassoso che si muove a velocità maggiore; la presenza della superficie rugosa aumenta quindi il termine di cadute di pressione per attrito lungo il misuratore [17].

I fenomeni di *entrainment* e *deposition* e il conseguente scambio di quantità di moto, contribuiscono a loro volta a aumentare le cadute di pressione del sistema.

Considerando il volume di controllo riportato in Fig. 3 l'equazione di bilancio di quantità di moto risulta:

$$d(pA) + (W_g \cdot d(U_g) + W_d \cdot d(U_d) + W_f \cdot d(U_f))_{12} + d(pA)_{friction} + d(pA)_{elevation} = 0 \quad (31)$$

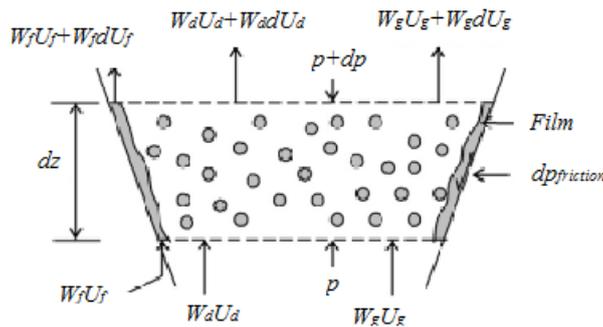


Fig. 3: Bilancio di quantità di moto nell'elemento infinitesimo del volume di controllo

La portata di liquido che defluisce nel film e le caratteristiche di fase liquida e gassosa che defluiscono nel *core* possono essere valutate in ogni sezione, lungo la direzione assiale del misuratore, tramite il modello fluidodinamico descritto nel capitolo 2. Per valutare il termine di elevazione e il termine di accelerazione occorre utilizzare la densità bifase definita come:

$$\rho_{TP} = \left[ \frac{x^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_l} \right]^{-1} \quad (32)$$

Per la stima delle cadute di pressione per attrito, in deflusso anulare Aziz [18] definisce un fattore di attrito  $f$  per il film  $f_f$  e per il core  $f_c$ , calcolato sulla base delle seguenti espressioni:

$$\begin{cases} f_f = \frac{24}{\text{Re}_f} & \text{Re}_f \leq 2100 \\ f_f = \frac{0.0913}{\text{Re}_f^{0.263}} & \text{Re}_f > 2100 \end{cases} \quad (33)$$

$$f_c = \left(0.0014 + 0.125 \cdot \text{Re}_c^{-0.32}\right) \left(1 + \frac{300 \cdot \delta_f}{D_H}\right) \quad (34)$$

dove  $\text{Re}_f = \frac{\rho_l U_f \delta_f}{\mu_l}$  è il numero di Reynolds relativo al film e  $\text{Re}_c = \frac{\rho_c U_c (D - 2\delta_f)}{\mu_c}$  è il numero di Reynolds relativo al core.

Alle perdite dovute all'attrito distribuito vanno sommate i termini di cadute localizzate dovuti a restringimento tra tratto convergente e sezione ristretta e allargamento tra sezione ristretta e sezione divergente.

In caso monofase a queste perdite vengono associati un coefficiente  $K$  pari a 0.4 e 1 per restringimento e allargamento rispettivamente. In deflussi bifase queste perdite vengono usualmente espresse tramite l'ausilio di moltiplicatori bifase.

Gli input del modello richiedono tra le altre grandezze, la conoscenza del valore di grado di vuoto.

L'ipotesi che il grado di vuoto si conservi al variare della sezione non è però realistica. Vari studi e osservazioni visive hanno mostrato che lo spessore del film liquido tende a crescere nella sezione ristretta, mentre nella sezione divergente hanno luogo fenomeni non trascurabili relativi a moti secondari e ricircoli. La conoscenza dell'evoluzione del grado di vuoto all'interno del Venturi è dunque necessaria per implementare il modello.

A tal proposito Hasan e Lucas [19] propongono l'utilizzo di sonde conduttive montate all'ingresso e nella sezione ristretta del misuratore in modo da supplire all'informazione richiesta.

### Modello per il Venturi con moltiplicatore bifase

Secondo un approccio classico [20]-[25] 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):

$$\frac{\left(-\frac{dp}{dz}\right)_{TP}}{\left(-\frac{dp}{dz}\right)_g} = \phi_g^2 \quad (35)$$

dove

$$\left(-\frac{dp}{dz}\right)_g$$

è il gradiente di pressione per attrito che si avrebbe in deflusso monofase gas, con la portata di gas pari alla sola frazione di portata gassosa del deflusso bifase ( $W_g$ ).

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) [23]-[24]. Tale procedura ricorre al parametro di similitudine

$$\chi^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_l}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_g} \quad (36)$$

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, con portate rispettivamente  $W_l$  e  $W_g$ .

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

$$\chi^2 = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.875} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.125} \quad (37)$$

In presenza di deflusso bifase in orifizi e Venturi il parametro di Martinelli viene solitamente definito come:

$$\chi_{\text{mod}}^2 = \left(\frac{1-x}{x}\right) \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \quad (38)$$

Le cadute di pressione dovute all'attrito possono essere così correlate ai moltiplicatori bifase tramite correlazioni empiriche o semi-empiriche funzione del parametro di Martinelli modificato e quindi del grado di vuoto  $\alpha$ .

Chisholm (1974) propone un'espressione per il calcolo del fattore moltiplicativo nella forma:

$$\phi_C^2 = 1 + C\chi_{\text{mod}} + \chi_{\text{mod}}^2 \quad (39)$$

dove ( $S$  è lo *slip ratio*)

$$C = \frac{1}{S} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.5} + S \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \quad (40)$$

Murdock (1962) propose un fattore moltiplicativo dato da:

$$\phi_M^2 = (1 + 1.26\chi_{\text{mod}})^2 \quad (41)$$

per orifizi e da

$$\phi_M^2 = (1 + 5\chi_{\text{mod}})^2 \quad (42)$$

per Venturi.

Altre correlazioni sono citate di seguito e riassunte in [2]:

- James, (1965)
- Bizon (1965)
- Lin (1982)

e più recentemente:

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

### Modello per il Venturi con coefficiente di scarico bifase

Come evidenziato in precedenza, uno dei possibili approcci nella modellizzazione del Venturi in deflusso bifase consiste nella correzione del coefficiente di scarico  $C$  monofase in modo da considerare la presenza della seconda fase. In questo caso le cadute di pressione nel misuratore vengono correlate alla portata totale bifase (vedi equazione 16):

$$W_{tot} = \frac{C_{TP} \cdot F_a \cdot Y \cdot A_2}{\sqrt{(1 - \beta^4)}} \cdot \sqrt{2\rho_{TP}\Delta p_{TP}} \quad (43)$$

dove  $\rho_{TP}$  è la densità bifase.

Sulla base dell'analisi effettuata in [12], 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), definita dalla relazione (32).

L'utilizzo del modello richiede dunque la conoscenza del grado di vuoto, in quanto necessario per il calcolo del valore di densità bifase.

Il coefficiente di scarico viene ricavato da tarature preliminari in funzione dei parametri sperimentali.

### 3.2 Sonda ECP

Come descritto nei paragrafi precedenti, per risolvere il modello fluidodinamico è necessario conoscere, la frazione del condotto occupata dalle due fasi all'interno del volume di controllo, ovvero il grado di vuoto.

Le principali tecniche di misura di questa grandezza (se si escludono le tecniche che utilizzano radiazioni o neutroni) prevedono l'utilizzo di: sonde ottiche (basate sulla variazione dell'indice di rifrazione), sonde elettriche (basate sulla variazione della resistenza e/o capacità elettrica), sonde termiche (basate sulle diverse caratteristiche di scambio termico) [2].

I diversi metodi proposti si basano sull'utilizzo di un sensore in grado di rilevare la presenza dell'una o dell'altra fase apprezzando la variazione di una particolare proprietà fisica nell'interazione con la miscela.

Il funzionamento delle sonde a impedenza capacitiva si basa sul principio che applicando una differenza di potenziale a qualsiasi coppia di conduttori (armature o piastre) separati da un isolante (dielettrico), le cariche elettriche si separano e si genera un campo elettrico all'interno di questo.

Dalla misura dell'impedenza elettrica del volume fluido compreso tra gli elettrodi si può ottenere il valore istantaneo volumetrico di frazione di vuoto.

Il più importante requisito per l'utilizzo di una sonda a impedenza elettrica è che le due fasi presentino proprietà elettriche sensibilmente diverse l'una dall'altra; in questo modo a una variazione della distribuzione delle fasi e del grado di vuoto corrisponde una diversa distribuzione di permittività elettrica e di conseguenza una diversa differenza di potenziale tra gli elettrodi.

Questi sensori presentano numerosi vantaggi in quanto sopportano elevate pressioni e temperature, hanno buona stabilità all'aggressione meccanica e chimica e buona precisione se il fluido e la sostanza hanno una composizione costante. Sono adatti per liquidi conduttivi e non.

Numerose configurazioni geometriche delle sonde sono state studiate da vari autori [2].

## Caratteristiche sonda ECP

La SIET di Piacenza ha sviluppato una sonda capacitiva (ECP) composta da una serie di elettrodi (9) disposti lungo le generatrici di un tubo cilindrico e da un elettrodo centrale [9]. La sonda è stata caratterizzata presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino [10]-[11] tramite uno studio sperimentale che ha permesso di evidenziare i vantaggi e svantaggi del misuratore in esame.

Nella sonda sviluppata dalla SIET gli elettrodi attivi sono disposti su metà circonferenza della tubazione; infatti, essendo destinato all'utilizzo su circuiti di taratura, opererà sempre su flussi assiali simmetrici tipici dei condotti verticali o su flussi simmetrici rispetto al piano di mezzeria per tubi inclinati od orizzontali.

La distanza angolare tra gli elettrodi esterni adiacenti è di  $22,5^\circ$  (Fig. 4) che corrisponde a una corda esterna e interna al condotto rispettivamente di 17.56 mm e 15.6 mm, essendo il diametro interno del condotto pari a 80 mm e il diametro esterno pari a 90 mm.

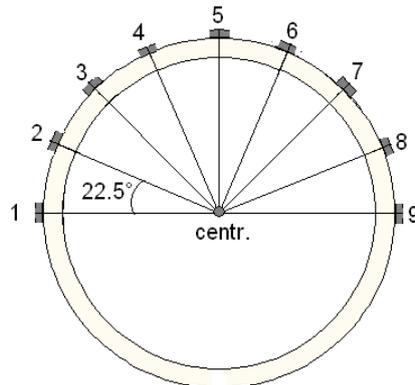


Fig. 4: Schema sonda Capacitiva SIET

Il diametro interno scelto per la cella è 80 mm, poiché la maggior parte delle linee di SPES3 su cui potranno essere installati questi strumenti è compresa tra  $2\frac{1}{2}$  e 3" con un diametro interno da circa 65 a circa 80 mm.

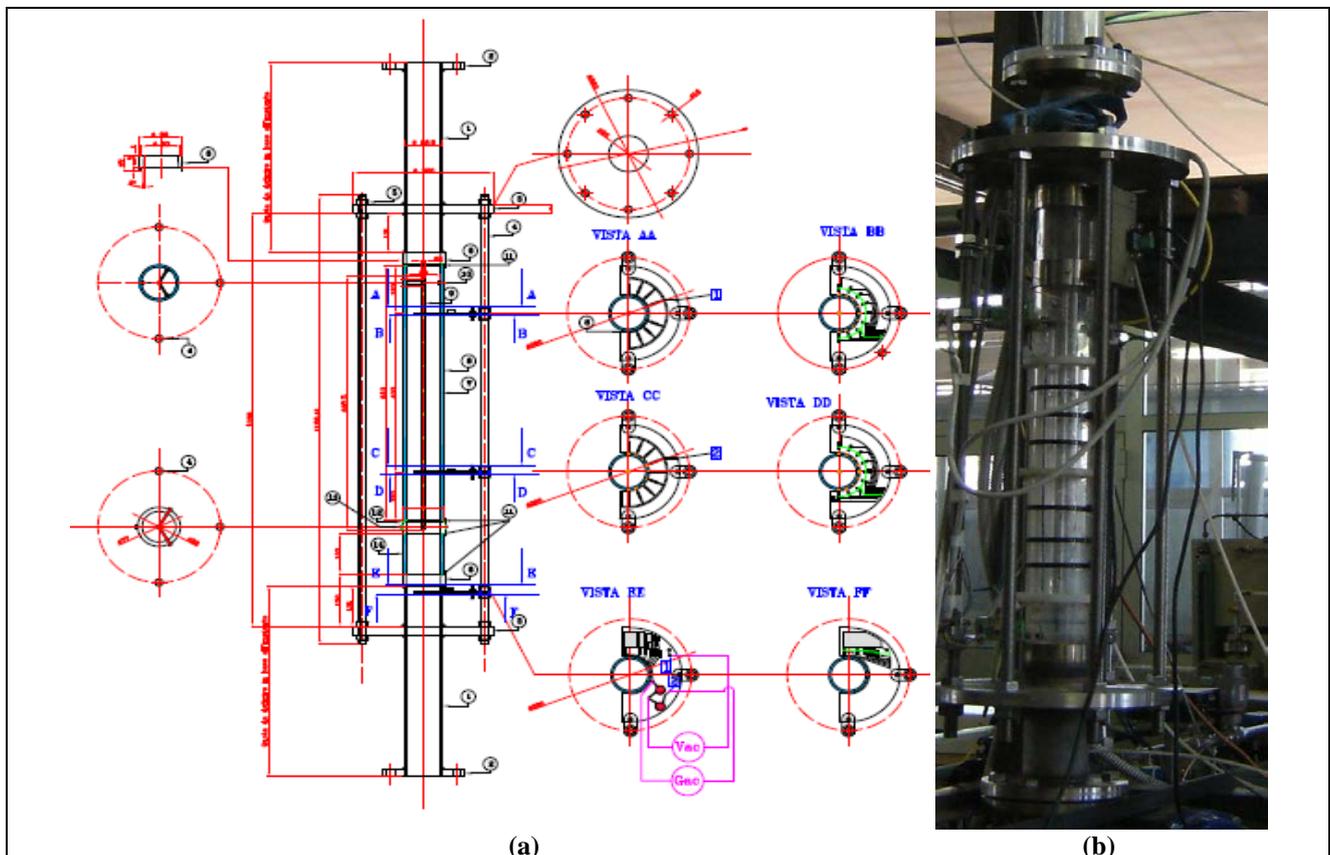


Fig. 5: Sonda SIET. Disegno progettuale (a) e foto (b)

La lunghezza del tubo in materiale isolante è pari a 60 cm per poter supportare gli elettrodi lunghi 40 cm mantenendo tra le estremità di questi e di tronchetti metallici uno spazio sufficiente per ridurre il transito parassita di correnti nel metallo dei tronchetti di collegamento.

Gli elettrodi periferici, costituiti da strisce di acciaio di 5 mm di larghezza, sono incollati sulla parete esterna e saldati alle estremità con i conduttori che consentono il collegamento con l'elettronica di misura.

Ogni elettrodo esterno è collegato elettricamente a entrambe le estremità, mentre quello centrale è connesso tramite dei supporti e collegato solo a un'estremità. I fili di collegamento sono saldati rispettivamente su due basette lineari dove si trovano i reed relè; 10 sulla basetta che contiene anche il collegamento dell'elettrodo centrale e 9 (relativi agli elettrodi esterni) in quella opposta. Per ogni basetta è installato un trasformatore di isolamento in ferrite che, connesso ai reed relè, consente di annullare i disturbi a radio frequenza e di isolare l'elettronica dagli eventuali disturbi di nodo comune (loop di terra).

La sonda è gestita tramite la Scheda NI USB-6259, che invia il segnale di chiusura dei relè (5V in corrente continua) e il segnale di eccitazione agli elettrodi (sinusoide con  $f_{ec} = 25\text{kHz}$  e ampiezza  $5V_{pp}$ ) e riceve il segnale in uscita.

### Studio numerico della sonda ECP in deflusso bifase anulare e anulare disperso

Per valutare la risposta della sonda in deflusso anulare e la sensibilità al variare del grado di vuoto è stato effettuato uno studio numerico tramite un software FEM, che consente di risolvere il campo elettromagnetico associato nelle condizioni in esame e di calcolare quindi il valore di capacità associato alle varie coppie di elettrodi nelle diverse configurazioni di distribuzione delle fasi.

La geometria della sonda è stata costruita in 2D conservando le dimensioni effettive di diametro esterno, interno e di larghezza degli elettrodi. Una volta creata la *mesh* della geometria, viene calcolata la distribuzione di campo elettrico elettrostatico risolvendo l'equazione di Laplace

$$\nabla^2 V = 0 \quad (44)$$

per tutti gli elementi.

Vengono utilizzate le condizioni al contorno di Dirichlet, imponendo i valori di potenziale tra gli elettrodi di misura ( $V=0$  per l'elettrodo "grounding" e  $V=5$  per l'elettrodo eccitato).

La risoluzione dell'equazione permette di valutare i valori del potenziale nei nodi della *mesh*, dai quali si può calcolare la capacità relativa alle varie copie di elettrodi sulla base della seguente relazione:

$$Q = C\Delta V \quad (45)$$

dove Q è la carica accumulata sugli elettrodi.

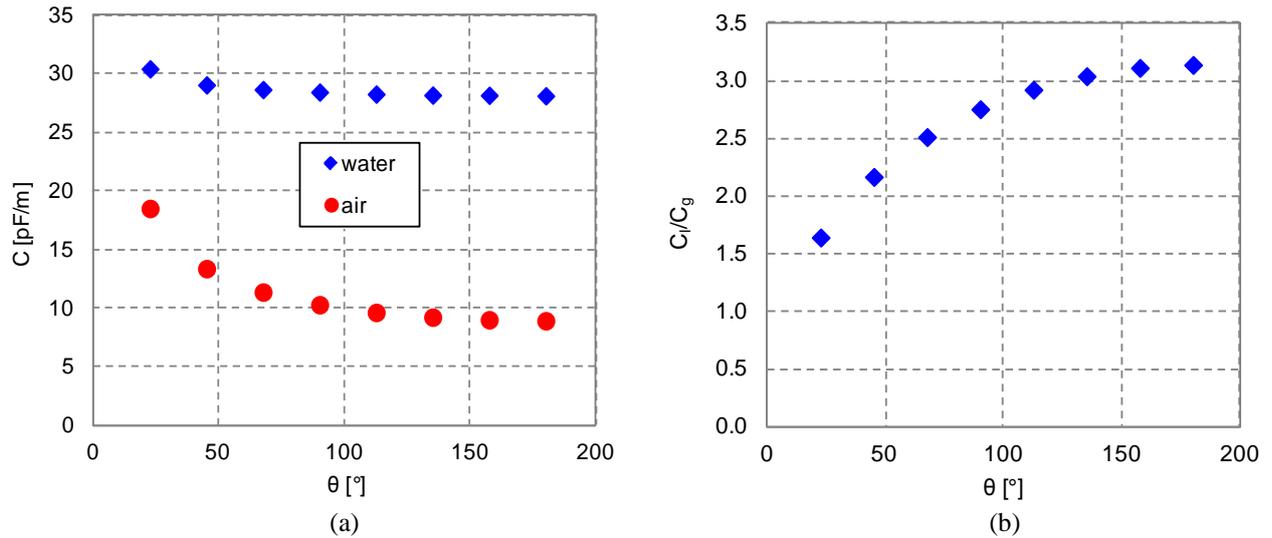
Come fluidi di riferimento vengono considerati acqua demineralizzata e aria, mentre la parete viene modellizzata utilizzando le proprietà elettriche del Plexiglass. I calcoli preliminari, in presenza di mezzo omogeneo, corrispondente a deflusso monofase aria/acqua, hanno permesso di valutare l'attenuazione del segnale causata dalla presenza delle pareti del condotto. Nel caso reale a queste attenuazioni si andranno a sommare gli effetti causati da capacità parassite, quali cavi di collegamento e circuiteria ma anche proprietà effettive dei fluidi e correnti parassite a essi collegate.

Il calcolo monofase ha permesso di definire la sensibilità degli elettrodi e la dipendenza del valore di capacità dall'angolo di misura (nel caso di misura con elettrodi esterni).

Nelle figure seguenti sono riportati i grafici relativi alla calibrazione numerica monofase.

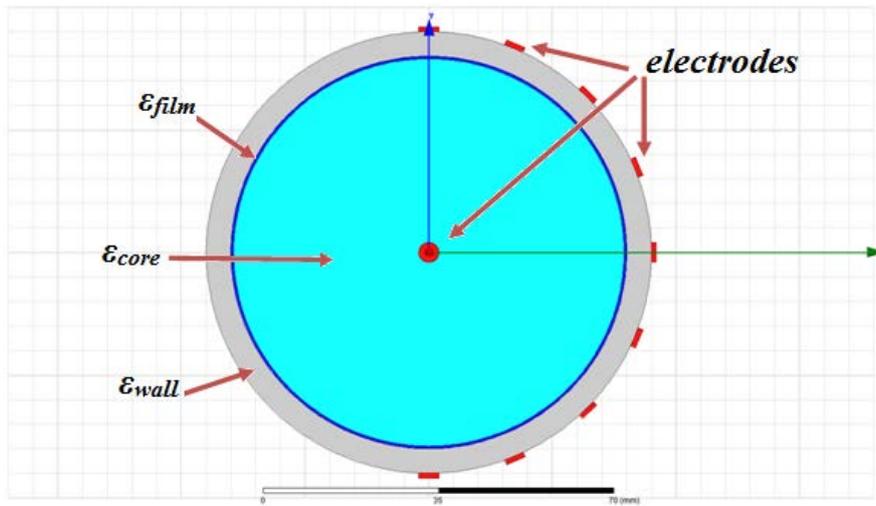
Come si evince dai grafici di Fig. 6 il rapporto teorico  $C/C_g$ , si riduce dal valore limite di 80 ( $\epsilon_{water}/\epsilon_{air} \sim 80$ ) a un valore compreso tra 1.64 e 3.14 in funzione dell'angolo  $\theta$ .

Per quanto riguarda la misura tra elettrodo centrale, a diretto contatto con il fluido, e uno degli elettrodi esterni, questo rapporto è risultato pari a 5.41.



**Fig. 6: Modello numerico sonda ECP: (a) risposta monofase aria acqua, (b) rapporto tra capacit  misurate in monofase, in funzione dell'angolo di misura**

Per quanto riguarda lo studio della risposta del sensore a un deflusso aria-acqua anulare, si   considerato un deflusso anulare ideale (film liscio e assenza di *entrainment*), un deflusso omogeneo e un deflusso anulare ideale con *core* omogeneo (corrispondente a un deflusso anulare con *entrainment*).



**Fig. 7: Schematizzazione della geometria nel modello numerico bifase della sonda ECP**

Per rendere pi  agevole il confronto con i dati sperimentali, i valori ottenuti dalle simulazioni sono stati normalizzati come:

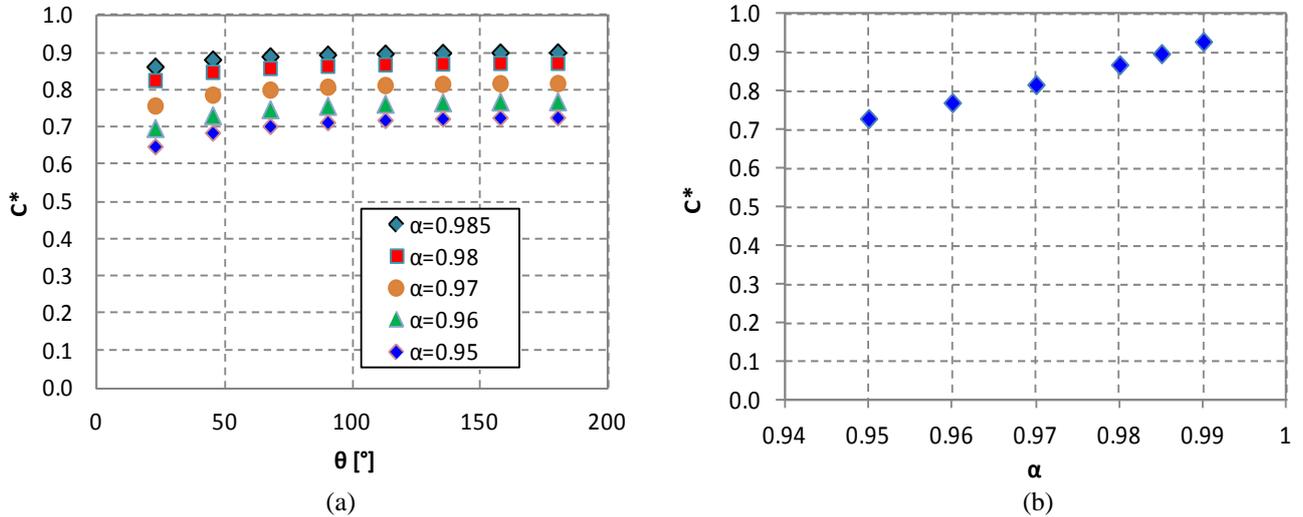
$$C_{ij}^* = \frac{C_{l,ij} - C_{TP,ij}}{C_{l,ij} - C_{g,ij}} \quad (46)$$

Dove  $C_{l,ij}$  e  $C_{g,ij}$  rappresentano le misure monofase ottenute al variare della coppia di elettrodi ( $ij$ ), e  $C_{TP,ij}$    la misura di capacit  ottenuta in presenza delle due fasi, nelle diverse configurazioni per la stessa coppia di elettrodi.

Il deflusso omogeneo aria-acqua   stato simulato considerando una costante dielettrica equivalente  $\epsilon_{TP}$ , valutata utilizzando l'equazione di Maxwell, al variare del grado di vuoto  $\alpha$  (equazione (47)).

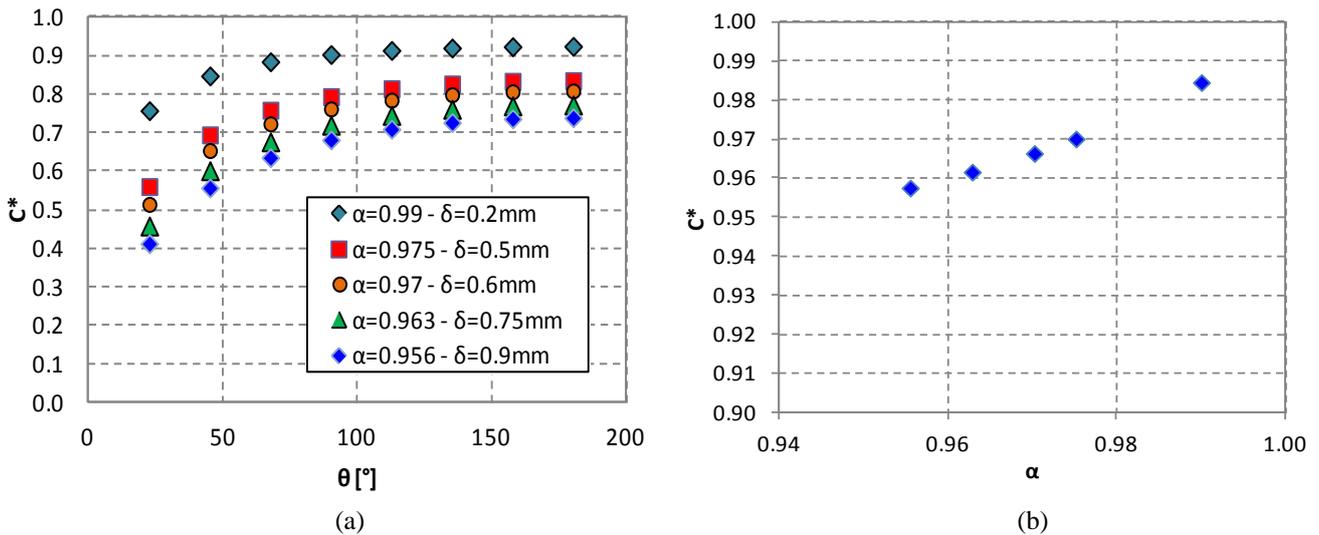
$$\frac{\varepsilon_{TP}}{\varepsilon_l} = 1 - \frac{3\alpha}{\left(\frac{2\varepsilon_l + \varepsilon_g}{\varepsilon_l - \varepsilon_g}\right) + \alpha} \quad (47)$$

La risposta degli elettrodi esterni e dell'elettrodo centrale nel caso di deflusso omogeneo aria-acqua è riportata nella Fig. 8:



**Fig. 8: Modello numerico sonda ECP: risposta per deflusso omogeneo aria-acqua. (a) Elettrodi esterni. (b) Elettrodo centrale**

Nel caso di deflusso anulare ideale (senza *entrainment* di gocce) il deflusso è stato modellizzato considerando uno spessore di film avente la costante dielettrica dell'acqua e un *core* avente la costante dielettrica dell'aria. Il grado di vuoto viene modificato variando lo spessore del film liquido. Le risposte al variare del grado di vuoto sono riportate nella Fig. 9.

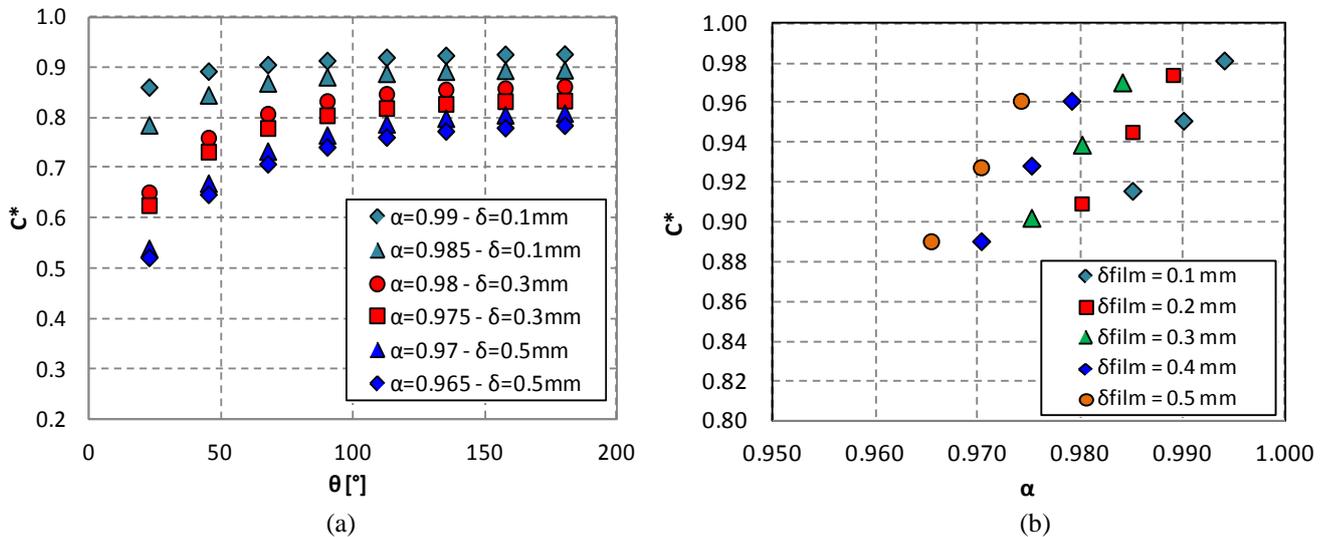


**Fig. 9: Modello numerico sonda ECP: risposta deflusso anulare ideale aria acqua. (a) Elettrodi esterni. (b) Elettrodo centrale**

Nel caso di deflusso anulare-disperso il deflusso è stato modellizzato considerando uno spessore di film avente la costante dielettrica dell'acqua e un *core* avente la costante dielettrica equivalente bifase valutata come nel caso precedente tramite l'equazione di Maxwell. Il grado di vuoto viene modificato variando lo

spessore del film liquido e la costante dielettrica del *core*. Il grado di vuoto sulla sezione è quindi ricavato dall'equazione (1).

Le risposte al variare del grado di vuoto sono di seguito riportate.



**Fig. 10: Modello numerico sonda ECP: risposta deflusso anulare-disperso aria acqua. (a) Elettrodi esterni. (b) Elettrodo centrale**

Dall'analisi numerica effettuata si evince che la risposta degli elettrodi, dipende fortemente dalla distribuzione interna delle fasi, e a parità di grado di vuoto la capacità equivalente "vista" dai vari elettrodi, risulta sensibilmente diversa. Questo effetto, per quanto riguarda gli elettrodi esterni, è tanto più pronunciato per le coppie di misura poste a distanze inferiori a  $90^\circ$ , mentre è trascurabile a distanze maggiori. Inoltre dal grafico di Fig. 10 (a) si evince che la risposta degli elettrodi posti a  $22.5^\circ$  (coppia che mostra la maggiore sensibilità al variare dello spessore di film) dipende dalla distribuzione all'interno del *core* per spessori di film molto sottili ( $\delta < 0.3\text{mm}$ ), mentre per valori superiori le curve calcolate a parità di spessore di film, ma con distribuzione del *core* differente, si sovrappongono, mostrando l'insensibilità della misura alla distribuzione interna.

L'analisi della risposta dell'elettrodo centrale, Fig. 10 (b), ha mostrato una buona sensibilità alla variazione di grado di vuoto all'interno del *core*, e alla variazione dello spessore del film, mostrando un incremento lineare del segnale al crescere del grado di vuoto a parità di spessore.

Il segnale tende però ad appiattirsi per spessori del film  $\delta > 0.3\text{mm}$ , mostrando una variazione della misura associata alla sola variazione della distribuzione del *core*.

L'analisi numerica effettuata consente di evidenziare i parametri da cui dipende il segnale della sonda e la sensibilità dello strumento a queste variazioni.

L'analisi ha altresì evidenziato che la sola conoscenza del grado di vuoto non è sufficiente a interpretare i segnali, il modello fluidodinamico deve essere quindi parte integrante del modello dello strumento.

### Calibrazione statica monofase

La risposta della sonda in condizioni statiche monofase aria e acqua (demineralizzata) viene eseguita preliminarmente per stabilire il range di variazione delle misure e la sensibilità dello strumento. I risultati sperimentali vengono confrontati con i valori ottenuti dal modello numerico.

In Fig. 11 è riportato il valore di RMS misurato tra gli elettrodi a  $i=1$  e  $j=2:9$ , in funzione della distanza angolare  $\theta$ , per aria e acqua, nonché la variazione angolare del loro rapporto  $\text{RMS}_i/\text{RMS}_g$ . Il valore di RMS misurato dipende oltre che dalla capacità dei fluidi anche dal valore di resistenza elettrica in funzione della frequenza di eccitazione, anche in presenza di acqua demineralizzata. I grafici riportati in Fig. 11 mostrano una buona ripetibilità del segnale (test eseguiti a cadenza di 5 giorni) ma sottolineano la ridotta variazione del segnale.

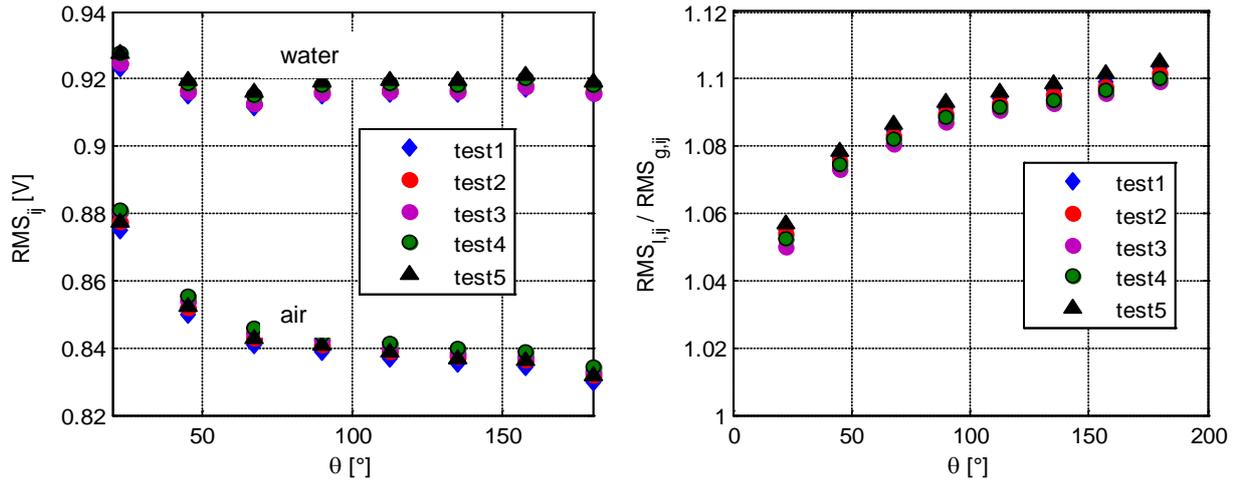


Fig. 11 Segnale monofase relative agli elettrodi esterni per la sonda ECP

Il rapporto teorico tra segnale acqua e aria, si reduce nel caso pratico a un valore compreso tra 1.05 e 1.1 in funzione dell'angolo di misura. La dipendenza angolare è maggiore nei segnali misurati in presenza di sola aria, mentre risulta limitata nel caso monofase acqua.

Per quanto riguarda l'elettrodo centrale, il segnale relativo a ogni prova è calcolato come la media aritmetica dei 9 segnali delle misure relative gli elettrodi esterni.

L'analisi del segnale ha messo in evidenza una maggiore sensibilità dell'elettrodo alle proprietà del fluido (l'elettrodo centrale a diretto contatto con il fluido, subisce l'attenuazione di un solo spessore di plexiglass) e una maggiore dispersione del segnale. In questo caso il rapporto  $RMS_l/RMS_g$  risulta pari a  $1.6 \pm 0.1$ .

Il confronto tra il rapporto  $C_l/C_g$  ottenuto con il modello numerico (rombi di colore blu sulla scala sinistra) e il rapporto sperimentale  $RMS_l/RMS_g$  (cerchi di colore verde sulla scala destra) è riportato in Fig. 12 (a). In Fig. 12 (b) è riportato il rapporto tra valore di capacità calcolata con il modello numerico e segnale di RMS misurato in Volts. Questo rapporto permette di stimare i coefficienti del modello che permettono di ottenere i valori di capacità a partire dalla misura sperimentale.

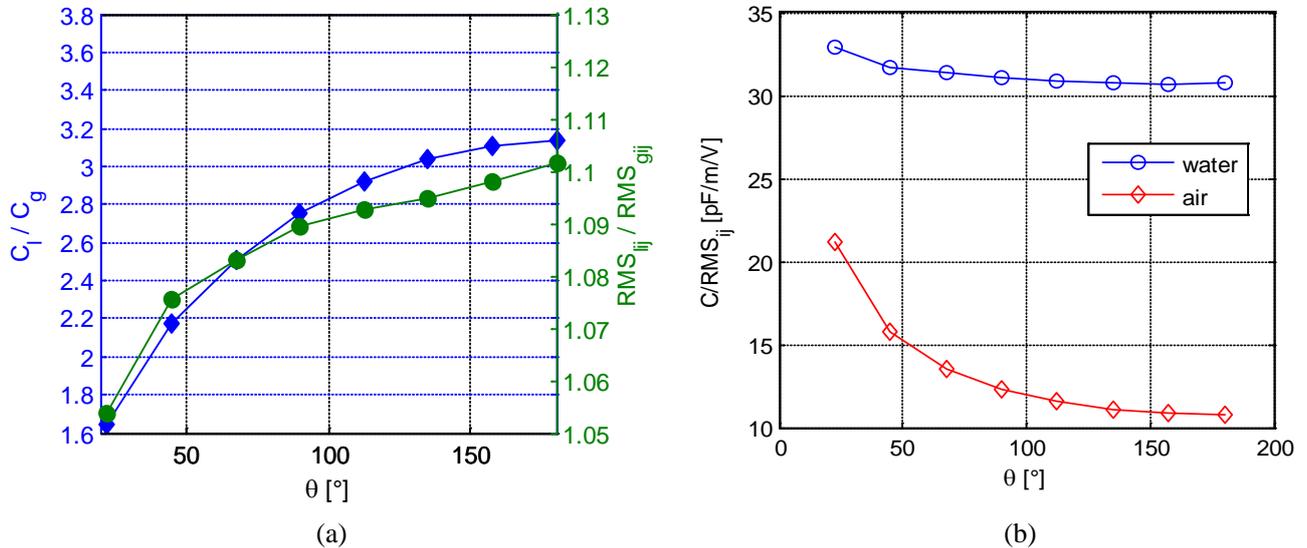


Fig. 12 Confronto tra valore sperimentale e numerico del rapporto dei segnali monofase per gli elettrodi esterni della sonda ECP

La misura del segnale monofase aria e acqua, viene eseguita prima di ogni set di prove bifase, e il segnale bifase viene normalizzato in modo tale da considerare le variazioni del segnale monofase e rendere quindi le diverse prove confrontabili:

$$V_{ij}^* = \frac{RMS_{TP-ij} - RMS_{l-ij}}{RMS_{g-ij} - RMS_{l-ij}} \quad (48)$$

## 4 CIRCUITO SPERIMENTALE E STRUMENTAZIONE

L'impianto sperimentale su cui è montata la sezione di prova dello SP 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 da una soffiante (UNIJET500) che fornisce alte portate di fluido a bassa pressione. La portata d'aria, regolata tramite un inverter, è misurata, in uscita dalla soffiante, tramite un orifizio calibrato, avente un'incertezza dichiarata del 2% v.f.s.. Viene inoltre misurata la temperatura del fluido, in modo da correggere il valore di densità in funzione di questa grandezza.

L'alimentazione dell'acqua è assicurata dal circuito 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 banco di rotometri aventi i seguenti range di misura:

- 0-100 l/h;
- 100-400 l/h

La configurazione del circuito consente l'utilizzo di acqua di rete, o di acqua demineralizzata.

### 4.1 Sezione di prova verticale

La sezione di prova costituita da un condotto verticale in Plexiglass, avente lunghezza totale di circa 4000 mm, è composta da una sezione d'ingresso ( $L = 400$  mm e  $D_i = 80$  mm) in cui vengono miscelate le due portate (l'aria entra assialmente nel condotto principale, mentre l'acqua è iniettata in direzione radiale, mediante un bronzo poroso installato coassialmente al condotto verticale), dallo SP (Venturi+ECP) e dal tratto d'uscita. Lo SP, installato a valle del miscelatore, è composto dalla sonda ( $L = 1210$  mm e  $D_i = 80$  mm), e dal Venturi con i suoi tratti di calma (lunghezza totale pari a 1290 mm).

La *test section* ha una lunghezza totale di 2500 mm ed è compresa tra due valvole di intercettazione, a chiusura rapida, che consentono la misura del grado di vuoto volumetrico.

Il circuito è dotato di prese di pressione che consentono di misurare la pressione assoluta e la pressione differenziale in vari punti tra le due valvole di intercettazione.

Le cadute di pressione nel Venturi vengono misurate tramite due trasduttori di pressione collegati alle prese relative alla sezione di monte, ristretta e di valle. Vengono quindi misurate oltre che le cadute di pressione tra ingresso e sezione ristretta, anche le cadute di pressione tra ingresso e uscita, in modo da ricavare le cadute di pressione irreversibili dello strumento. Oltre che i segnali degli strumenti dello SP, vengono misurate la pressione assoluta in ingresso alla *test section* e la temperatura del fluido in corrispondenza dello SP.

A valle della valvola superiore, è installato un ulteriore tratto di 400 mm e una vasca che consente di separare le due fasi.

### 4.2 Sistema acquisizione dati

I segnali degli strumenti per la misura:

- delle portate monofase a monte della miscelazione;
- di pressione assoluta e temperatura nella *test section*;
- di pressione differenziale nel Venturi (*inlet-throat*) e
- delle cadute di pressione irreversibili del Venturi (*inlet-outlet*)

vengono acquisiti, tramite scheda DAQ, in ambiente LabView® per 30 s utilizzando una frequenza di acquisizione di 1250 Hz.

Per quanto riguarda la sonda ECP, i segnali inviati e ricevuti dalla scheda di acquisizione sono gestiti tramite un programma indipendente, in ambiente LabView®, sincronizzato però con le misure degli altri segnali.

Tramite il programma viene definita la sequenza delle varie combinazioni di elettrodi (81), il numero di campioni di lettura per ogni coppia di elettrodi (2000) e la frequenza di campionamento (250 kHz).

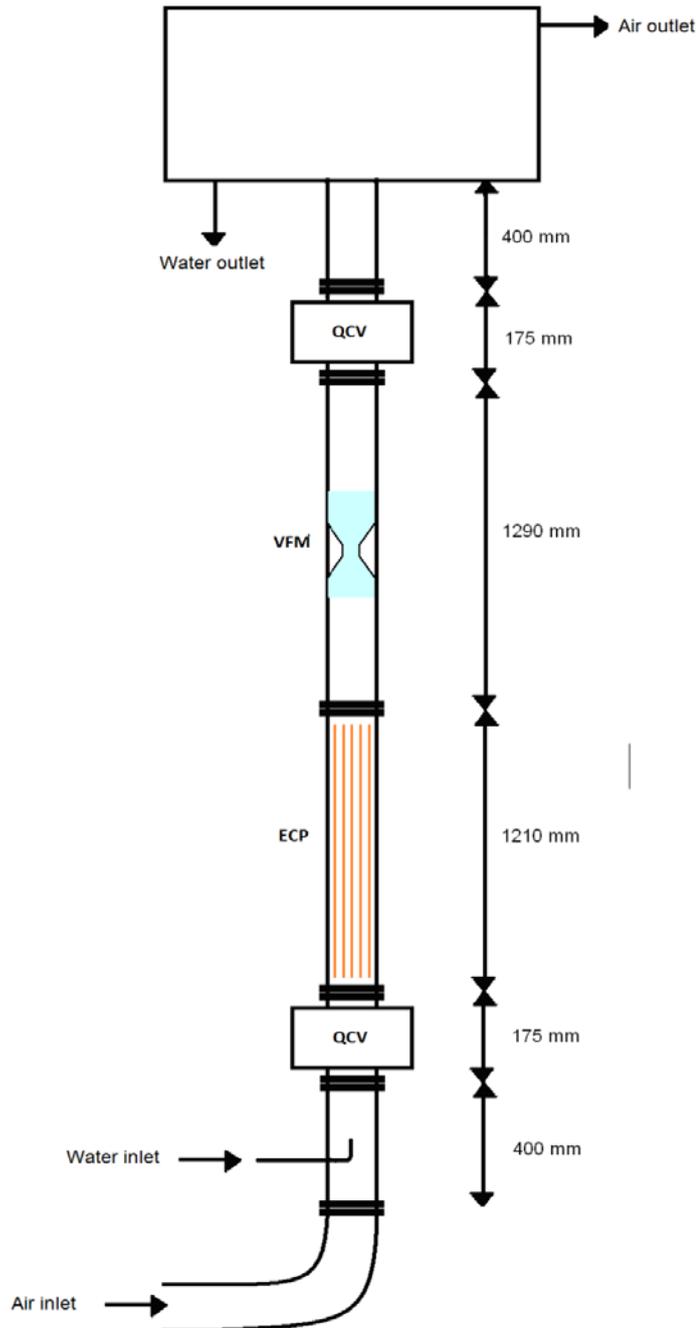
Viene registrato in uscita il valore medio RMS relativo ai 2000 *samples* letti per ogni combinazione.

Vengono eccitati in sequenza gli elettrodi 1-9 (esterni) e per ogni elettrodo eccitato vengono letti gli output degli elettrodi riceventi esterni. Finita la scansione di lettura dei 9 elettrodi, si passa alla lettura dei 9 segnali relativi alle misure tra elettrodi esterni e elettrodo centrale.

La scansione di ogni coppia di elettrodi richiede un tempo di misura di 33 ms, così che il tempo totale della scansione risulta pari a circa 2.7 s.

Per ogni prova sono stati effettuati 10 cicli di misura in modo da valutare l'andamento medio del segnale delle varie combinazioni e la relativa deviazione standard.

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 determinare le deviazioni standard dei segnali e la loro variazione rispetto al caso monofase.



**Fig. 13: Sezione di prova verticale**

## 5 MATRICE SPERIMENTALE E ANALISI DEI DATI

Le prove sperimentali effettuate per valutare la fattibilità dell'impiego dello SP per la misura dei parametri di un deflusso aria-acqua in regime anulare vengono qui riportate e analizzate.

Nella procedura di prova adottata vengono misurati, in primo luogo, i valori di riferimento monofase acqua e aria, utilizzati per normalizzare i segnali della sonda; si procede quindi con le misure in deflusso bifase.

Sono imposte le portate in massa dell'aria e dell'acqua. Il grado di vuoto è misurato utilizzando il metodo della pesata intercettata tra le valvole a chiusura rapida (QCV). Le prove in deflusso bifase sono state eseguite in un range di velocità superficiali compreso tra 14 e 18 m/s e tra 0.0008 e 0.0050 m/s per aria e acqua rispettivamente, con un titolo fluidodinamico corrispondente compreso tra 0.78 e 0.96. In *ALLEGATO II* è riportata la matrice sperimentale delle prove bifase.

Nel range di prove sperimentato la variazione del grado di vuoto in funzione delle portate della miscela è riportato in Fig. 14. In Fig. 15 è riportata la variazione del grado di vuoto in funzione del titolo.

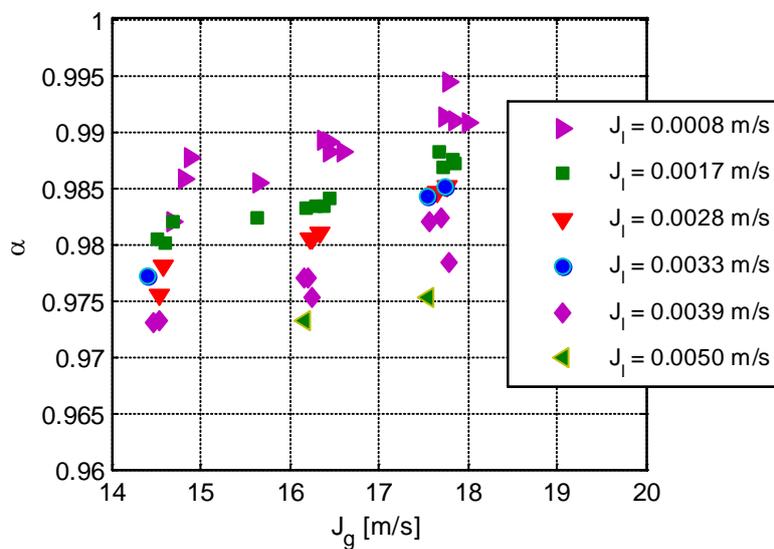


Fig. 14: Grado di vuoto sperimentale in funzione delle velocità superficiali della miscela bifase aria-acqua

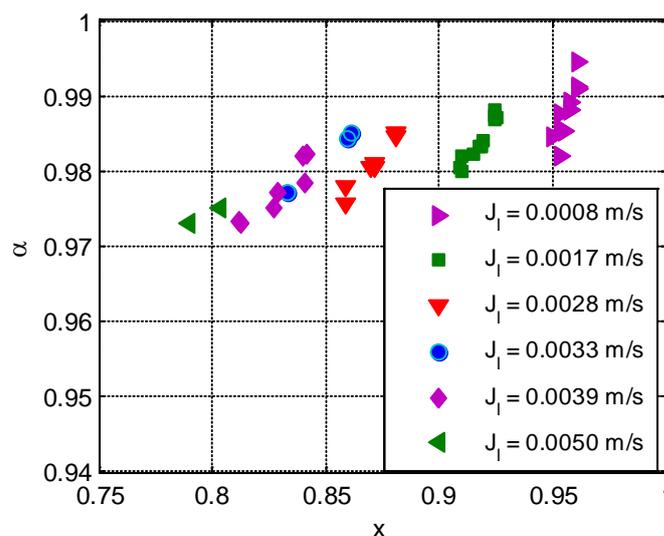


Fig. 15: Grado di vuoto sperimentale in funzione del titolo fluidodinamico

Le curve riportate in Fig. 15 mostrano che la relazione  $x$ - $\alpha$ , nelle condizioni in esame, non è bene rappresentata da una curva univoca. Il legame tra le due grandezze può essere quindi esplicitato solo

considerando il terzo parametro in gioco: lo *slip ratio*, che esprime lo scorrimento tra le fasi (modello di drift).

Gli altri parametri del deflusso, calcolati tramite il predetto modello vengono riportati nei grafici seguenti.

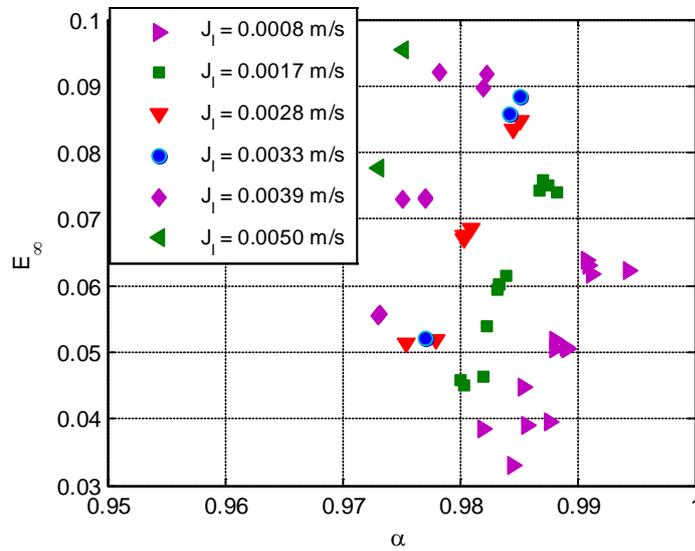


Fig. 16: Entrainment calcolato con il modello di Ishii, in funzione del grado di vuoto sperimentale (QC)

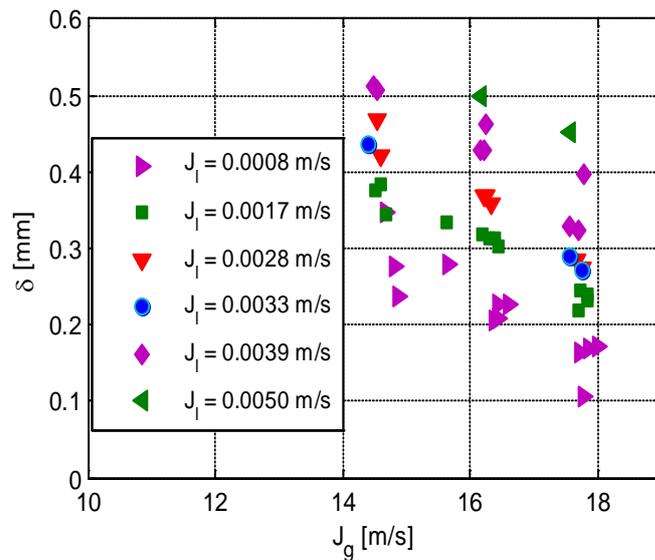


Fig. 17: Spessore del film liquido calcolato con il modello di Ishii, in funzione delle velocità superficiali delle fasi

## 5.1 Analisi del comportamento del Venturi in deflusso bifase

In Fig. 18 e Fig. 19 sono riportate le cadute di pressione misurate nel Venturi per le condizioni bifase testate. Nel grafico di Fig. 18 le cadute di pressione vengono rappresentate in funzione della portata totale, e in Fig. 19 in funzione delle velocità superficiali delle due fasi. Come si evince, i valori delle cadute di pressione bifase sono molto vicini al valore monofase aria; per apprezzare le differenze occorre normalizzare i valori rispetto alla caduta di pressione monofase come riportato in Fig. 21, in funzione del titolo fluidodinamico.

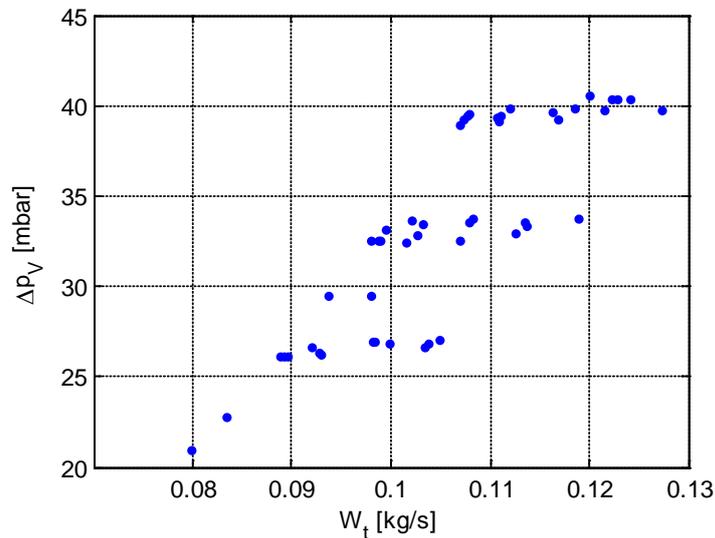


Fig. 18: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione della portata totale

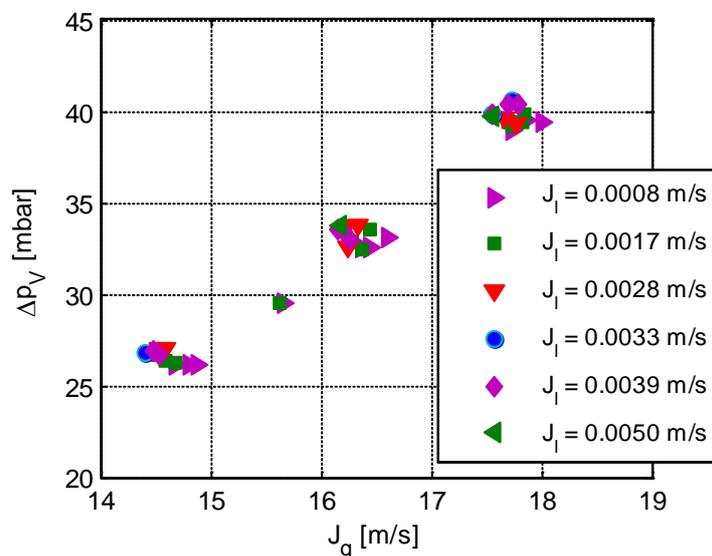
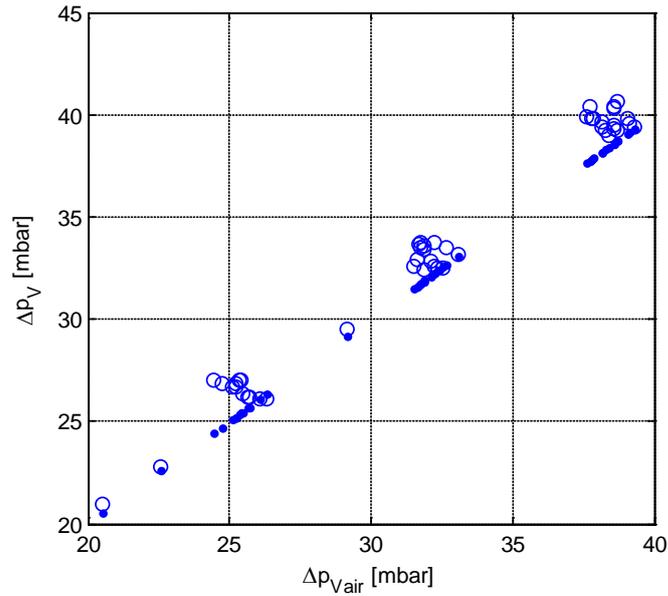
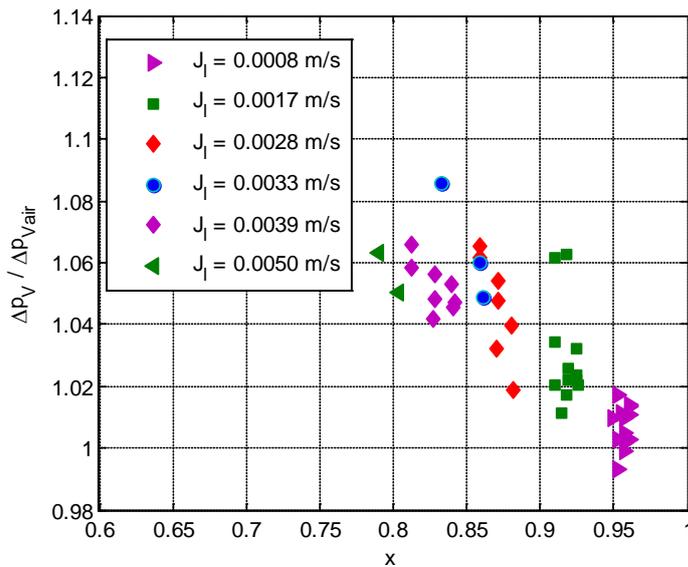


Fig. 19: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione delle velocità superficiali

Il grafico di Fig. 20 mostra la variazione di caduta di pressione in deflusso bifase rispetto al caso monofase aria. Le curve di Fig. 21 evidenziano chiaramente la stretta dipendenza del segnale del Venturi dal titolo della miscela, sebbene i dati risultino relativamente dispersi.



**Fig. 20: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione delle cadute di pressione monofase aria**



**Fig. 21: Cadute di pressione bifase nel Venturi normalizzate rispetto al monofase aria in funzione del titolo**

Considerando la variazione delle cadute di pressione nel Venturi in funzione delle grandezze fluidodinamiche, si può esprimere la caduta di pressione bifase in funzione della caduta di pressione monofase tramite un fattore moltiplicativo apposito.

Nell'analisi dei dati sono stati escluse le prove caratterizzate da un deflusso instabile, tipico delle basse velocità dell'aria, in cui comparivano fenomeni di "reverse flow" del film liquido.

Per le prove analizzate il moltiplicatore bifase è dato da:

$$\phi_{g,\text{mod}}^2 = 7.8 \cdot \chi + 1 \quad (49)$$

Il confronto tra i moltiplicatori bifase ottenuti dalle correlazioni di Murdock, Chisholm e dell'attuale modello, rispetto ai dati sperimentali è riportato in Fig. 22. In Fig. 23 è riportato il confronto tra le cadute di pressione stimate e quelle sperimentali.

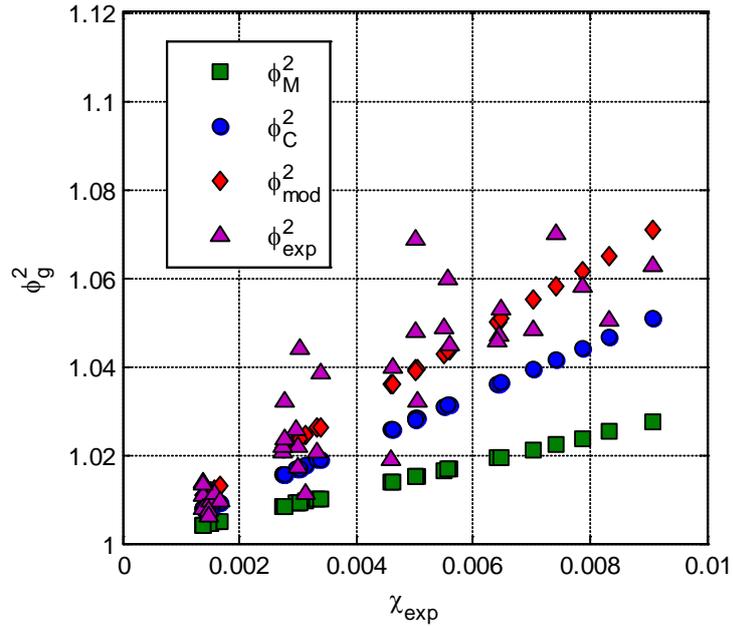


Fig. 22: Moltiplicatore bifase: confronto tra correlazioni e dati sperimentali

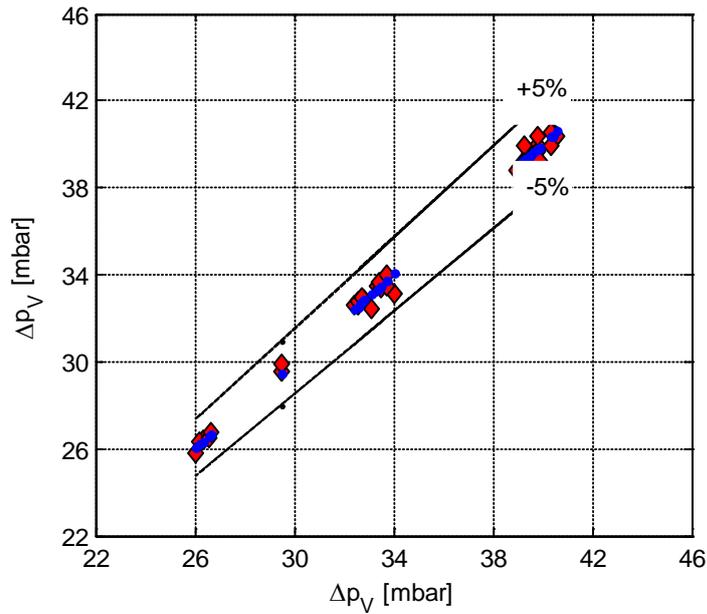


Fig. 23: Cadute di pressione nel Venturi stimate e sperimentali (rombo) tramite moltiplicatore bifase

Come visto nel capitolo 3, un altro possibile approccio nell'analisi delle cadute di pressione nel Venturi riguarda il calcolo del coefficiente di efflusso del misuratore in regime bifase.

Utilizzando lo stesso approccio descritto in [12] il coefficiente di scarico  $C_{TP}$  è ottenuto come

$$C_{TP} = \frac{W_{tot}}{F_a \cdot Y \cdot A_2} \cdot \left( \frac{(1 - \beta^4)}{2\rho_{TP}\Delta p_{TP}} \right)^{0.5} \quad (50)$$

dove  $\rho_{TP}$  è la densità bifase definita dalla relazione (32).

Il numero di Re bifase è stato calcolato come

$$\text{Re} = \frac{\rho_{TP} J_{tot} D}{\mu_{TP}} \quad (51)$$

con un valore di viscosità  $\mu_{TP}$  calcolato con la seguente relazione:

$$\mu_{TP} = \left( \frac{x^2}{\alpha \cdot \mu_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \cdot \mu_l} \right)^{-1} \quad (52)$$

La dipendenza dal numero di Reynolds può essere approssimata, come nel caso monofase da una legge del tipo:

$$C_{TP} = a \cdot \text{Re}_{TP}^b \quad (53)$$

dove i parametri  $a$  e  $b$  vengono ricavati da sperimentalmente:  $a = 1.1938$ ,  $b = -0.032$ .

In Fig. 24 è riportato il grafico del coefficiente di scarico bifase in funzione del numero di Reynolds.

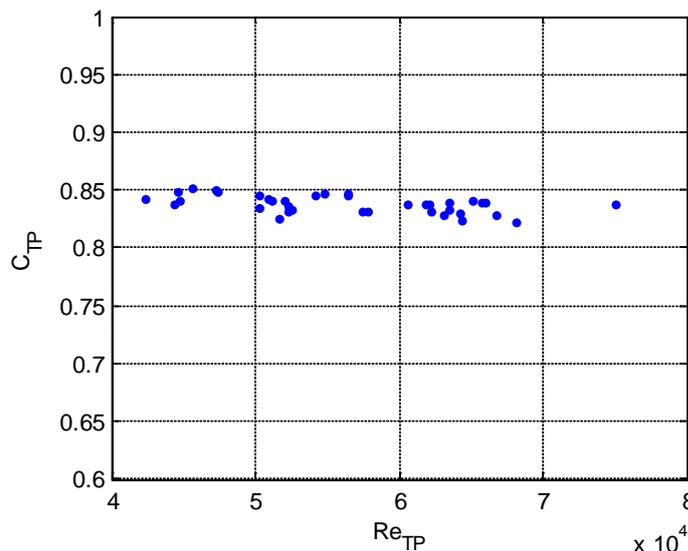
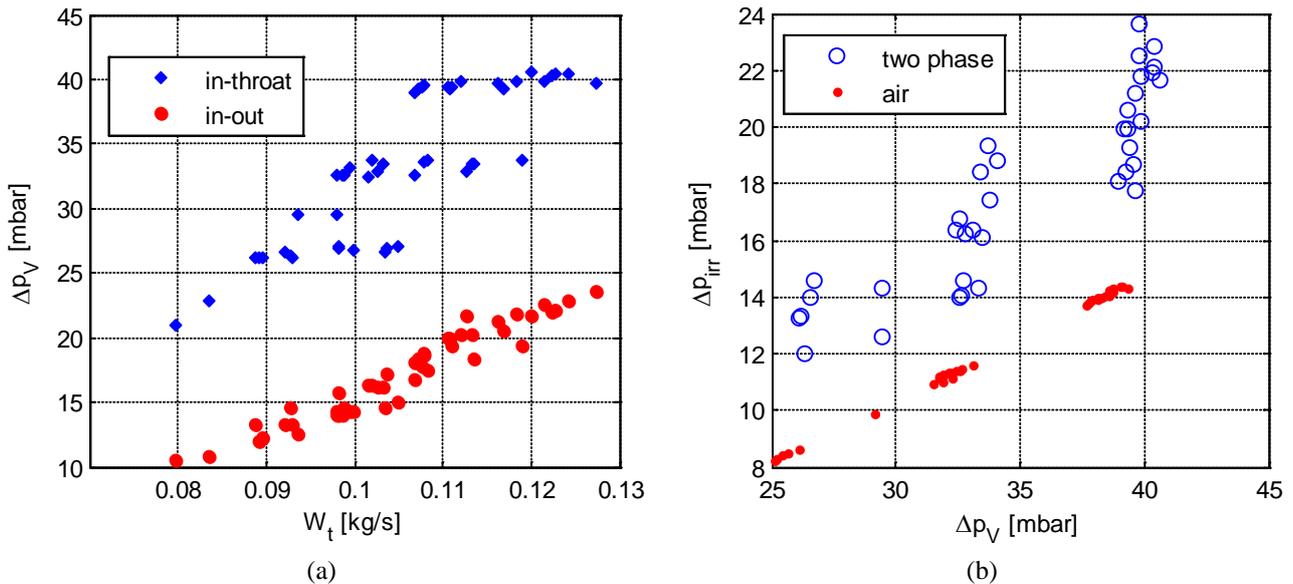


Fig. 24: Coefficiente di scarico del Venturi in deflusso bifase

La possibilità di predire accuratamente lo spessore del film e la quantità di liquido nel *core*, lungo la coordinata assiale del Venturi, consentirebbe di utilizzare un modello più accurato per la stima delle portate nel misuratore. L'utilizzo di sonde locali per la misura del grado di vuoto, dovrebbe migliorare la modellizzazione dello strumento.

Nelle figure seguenti vengono riportati i grafici relativi alle cadute di pressione irreversibili misurate nel Venturi nelle condizioni testate.

L'analisi di queste curve consente di aggiungere importanti informazioni riguardanti il deflusso; infatti la misura delle cadute di pressione irreversibili mostra una maggiore sensibilità di questo parametro alle variazioni di portata di liquido all'interno della miscela, rispetto alla classica misura di caduta di pressione tra ingresso e sezione ristretta.

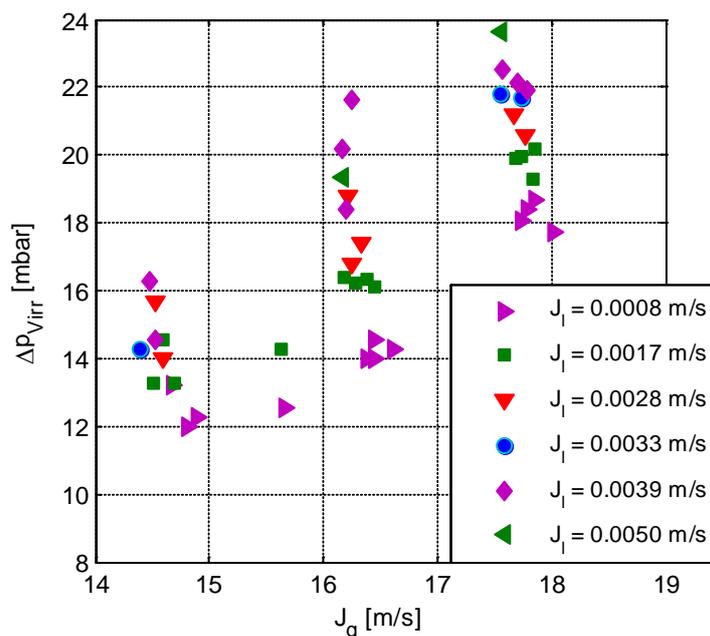


**Fig. 25: Confronto tra cadute di pressione nei Venturi nel tratto convergente e cadute di pressione irreversibili**

Nel grafico di Fig. 25 (a) è riportato l'andamento delle cadute di pressione nei Venturi misurate tra ingresso e sezione ristretta e tra ingresso e uscita, in funzione della portata. Il grafico di Fig. 25 (b) riporta invece le cadute di pressione misurate tra ingresso e uscita (cadute di pressione irreversibili) in funzione delle cadute di pressione misurate tra ingresso e sezione ristretta.

I cerchi pieni (rossi) riportano la corrispondenza lineare esistente tra le due misure in caso di deflusso monofase aria; i cerchi vuoti (blu) rappresentano le corrispondenze in deflusso bifase. Lo scostamento del valore di caduta di pressione rispetto alla curva monofase è evidentemente da attribuire alla portata di liquido immessa. Dal grafico si vede che dalla misura delle due cadute di pressione è possibile ricavare le portate delle due fasi in maniera univoca.

Nelle Figg. 27 e 28 vengono riportati i valori che mostrano la dipendenza delle cadute di pressione irreversibili dalle velocità superficiali delle due fasi e dal titolo. Nella Fig. 29 è mostrata la caduta di pressione irreversibile nei Venturi al variare delle cadute di pressione irreversibili con sola aria.



**Fig. 26: Cadute di pressione irreversibili nei Venturi in funzione delle velocità superficiali delle fasi**

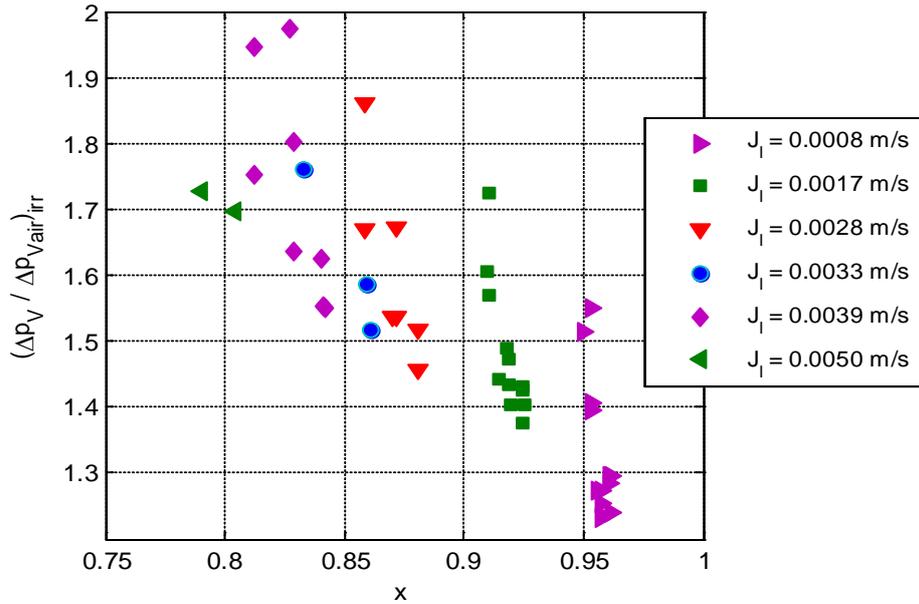


Fig. 28: Cadute di pressione irreversibili nel Venturi normalizzate rispetto al monofase aria in funzione del titolo

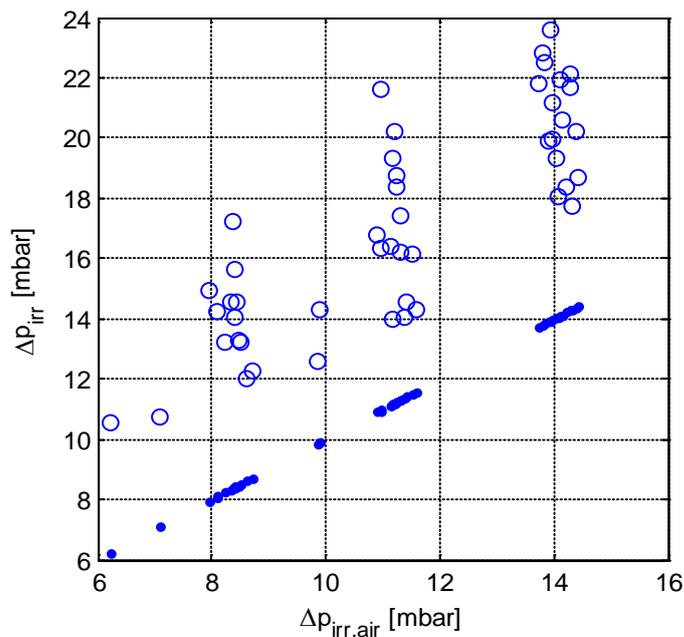


Fig. 279: Cadute di pressione irreversibili nel Venturi in funzione delle cadute di pressione irreversibili monofase aria

Dall'analisi delle curve sopra riportate si evince che le cadute di pressione irreversibili possono essere espresse in funzione delle due velocità superficiali oltre che del titolo fluidodinamico.

$$\Delta p_{irr} = k_1 \cdot (\rho_g J_g^{k_2}) \cdot (J_l / J_g)^{k_3} + k_4 \quad (54)$$

dove  $J_g$  e  $J_l$  sono le velocità superficiali di aria e acqua rispettivamente. Le costanti sono state ricavate da best-fit dei dati sperimentali:

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.2096 \\ k_2 &= 2 \\ k_3 &= 0.13 \\ k_4 &= -2.9786 \end{aligned}$$

Il confronto tra i valori sperimentali e la correlazione proposta sono riportati in Fig. 28 e in Fig. 29.

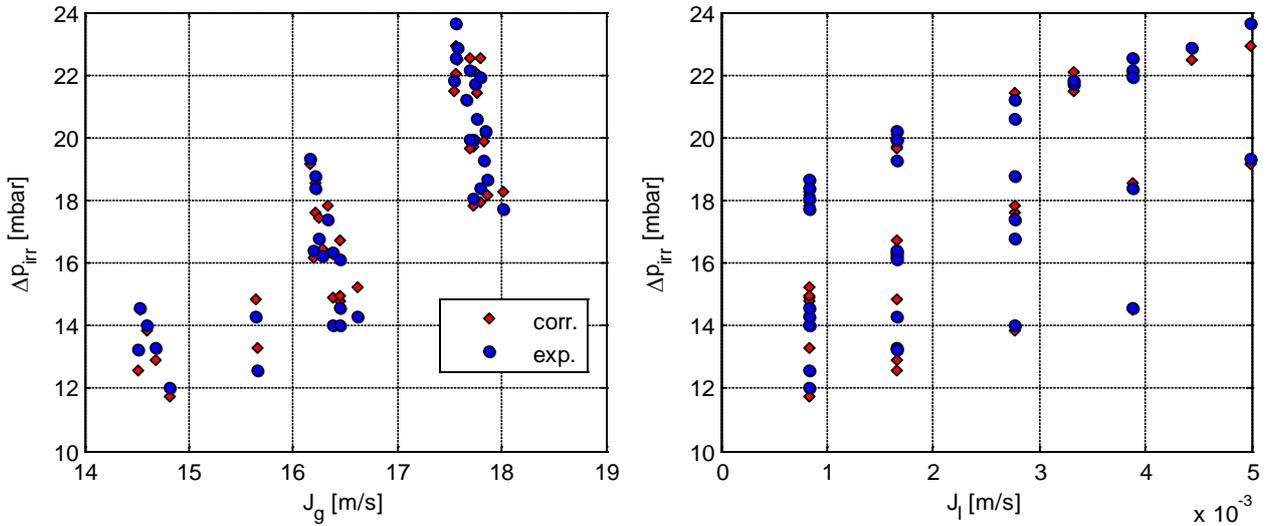


Fig. 28: Analisi della correlazione per la stima delle cadute di pressione irreversibili nel Venturi

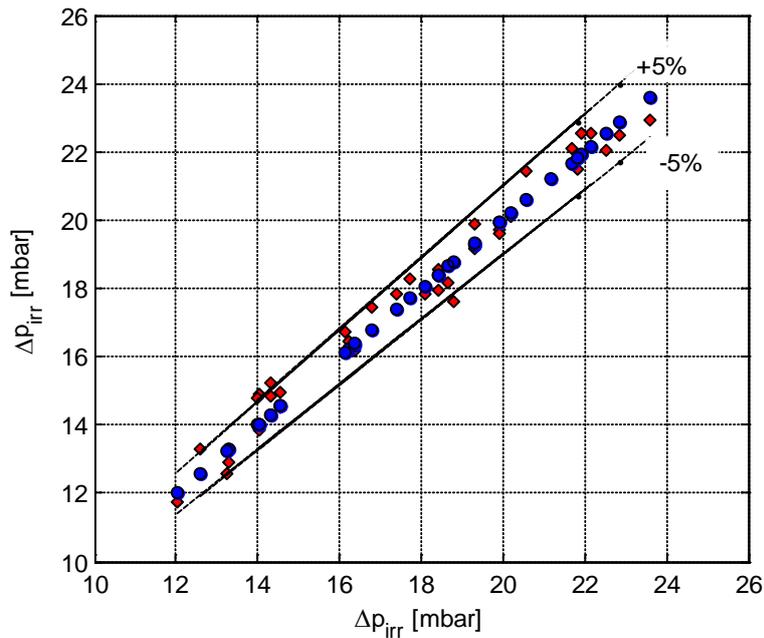


Fig. 29: Confronto tra dati sperimentali e correlazione per le cadute di pressione irreversibili

## 5.2 Analisi del comportamento della sonda ECP in deflusso bifase

Nelle figure seguenti vengono analizzati i segnali degli elettrodi della sonda ECP, al variare dei parametri fluidodinamici misurati (velocità superficiali e grado di vuoto volumetrico) e calcolati tramite il modello fluidodinamico descritto nel capitolo 2.

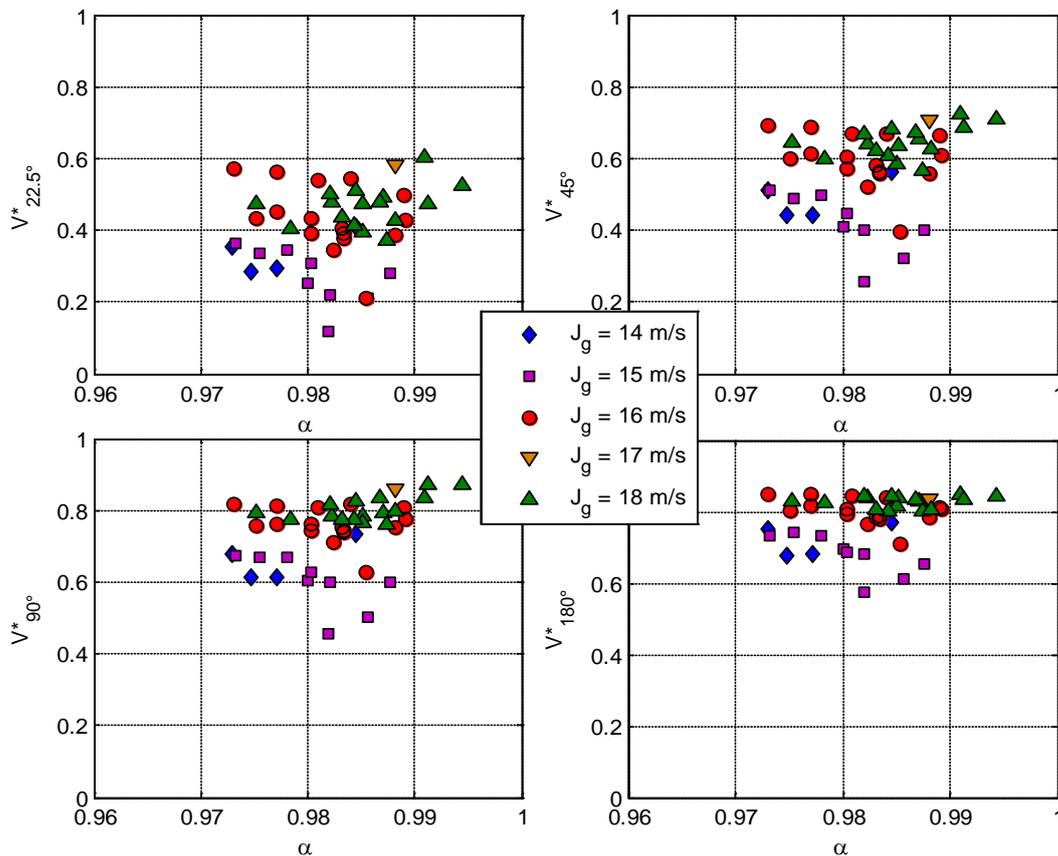
Nell'analisi dei segnali della sonda vengono riportate tutte le prove, compresi i runs in cui si è osservata l'inversione della direzione di deflusso del film; ciò consente di mettere in luce alcune importanti caratteristiche del sensore e della modellizzazione dello SP.

## Elettrodi esterni

In Fig. 31 e Fig. 32 sono riportati gli andamenti dei segnali normalizzati  $V_{ij}^*$  in funzione del grado di vuoto sperimentale, per gli elettrodi posti a  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$ . Le curve sono parametrizzate tramite le velocità superficiali delle fasi.

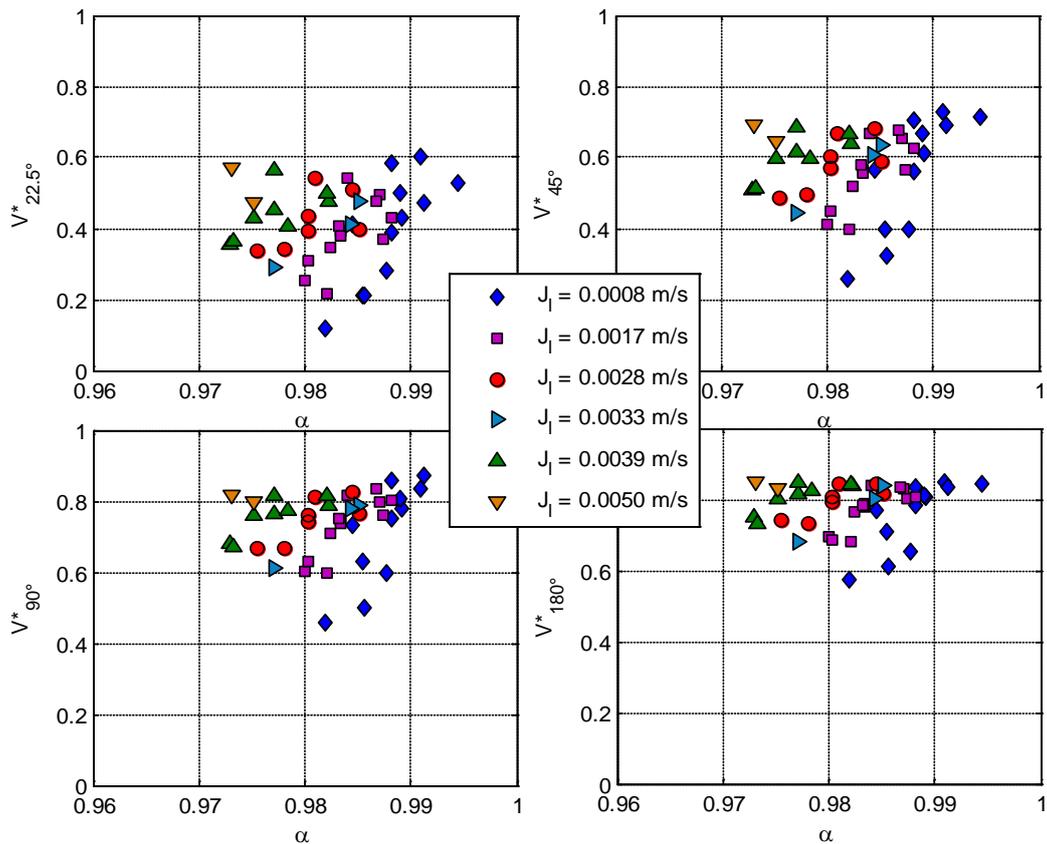
L'apparente dispersione del segnale può essere compresa analizzando la procedura di prova e i deflussi realizzati. Nelle prove sperimentali il deflusso viene creato imponendo le portate delle due fasi all'ingresso della *test section*; nelle prove in cui è presente inversione di direzione del deflusso di film, lo spessore tende ad essere maggiore nella parte inferiore del condotto dove è situata la sonda, mentre è più sottile nella parte superiore. Il grado di vuoto misurato non rappresenta quindi la distribuzione delle fasi nel tratto relativo alla sonda ECP (in quanto lo sovrastima), né nel Venturi (dove il grado di vuoto è sottostimato).

In Fig. 31 è evidenziata la dipendenza del segnale della sonda dalla velocità superficiale della fase gassosa, al variare dell'angolo di misura. Per velocità dell'aria inferiori ai 15 m/s il segnale  $V_{ij}^*$  decresce al crescere del grado di vuoto misurato: questo indica la non corrispondenza tra il grado di vuoto volumetrico misurato e il grado di vuoto nella regione della sonda, e evidenzia la necessità di misurare il grado di vuoto locale nelle varie posizioni assiali della *test section*. Nei grafici viene inoltre mostrata la dipendenza del segnale dall'angolo di misura: escludendo dall'analisi i segnali relativi a velocità dell'aria inferiori ai 16 m/s, che richiedono altre considerazioni, il segnale cresce al crescere dell'angolo, e tende ad essere meno influenzato dal valore di velocità superficiale dell'aria per angoli di misura superiori a  $90^\circ$ .



**Fig. 30: Segnale normalizzato associato alla misura tra elettrodi esterni in funzione del grado di vuoto e della velocità superficiale della fase aria**

In Fig. 32 è evidenziata la dipendenza del segnale della sonda dalla velocità superficiale della fase liquida, al variare dell'angolo di misura. Per tutti gli angoli di misura si nota che il segnale normalizzato  $V_{ij}^*$  cresce al crescere del grado di vuoto secondo delle curve ben parametrizzate dal valore di velocità superficiale del liquido. Ovviamente l'incremento di portata d'acqua tende a modificare i valori di *entrainment* e spessore del film e quindi a parità di grado di vuoto volumetrico si avranno differenti segnali della sonda. La corretta interpretazione di questi segnali richiede la conoscenza sia del modello fluidodinamico sia del modello elettrico dello strumento.



**Fig. 31: Segnale normalizzato associato alla misura tra elettrodi esterni in funzione del grado di vuoto e della velocità superficiale della fase liquida**

Nei grafici di Fig. 33 i valori normalizzati dei segnali della sonda vengono confrontati con i risultati del modello numerico (presentato nel paragrafo 3.2) che simula un deflusso omogeneo (triangoli) e un deflusso anulare ideale (rombi), al variare del grado di vuoto (Fig. 33 (a)) e dello spessore del film (Fig. 33 (b)), per le prove caratterizzate da velocità dell'aria maggiore di 16 m/s e angoli di misura pari a 22.5° e 180°.

Le due scale utilizzate per rappresentare i dati evidenziano che il segnale della sonda è influenzato da capacità/impedenze parassite aggiuntive che devono essere eliminate o tenute in debita considerazione nello sviluppo di un modello dello strumento.

Considerando l'incertezza associata alle componenti sopra descritte, il confronto tra i dati sperimentali e il modello numerico, mostra un andamento del segnale in funzione del grado di vuoto relativamente buono.

Il confronto permette inoltre di evidenziare che gli elettrodi posti a 22.5° sono molto sensibili alle condizioni fluidodinamiche all'interno del condotto e mostrano un andamento in accordo con il modello numerico relativo al deflusso anulare. Gli elettrodi posti a 180° mostrano, invece, un andamento lineare in funzione del grado di vuoto medio e una dispersione molto ridotta, in accordo con il modello numerico che mostra solo piccole differenza tra deflusso anulare e deflusso omogeneo.

La misura tra elettrodi a 180° è dunque sufficiente a valutare il grado di vuoto medio del deflusso, mentre se si vogliono valutare altri parametri, legati alla topologia del deflusso, quali spessore del film e quantità di gocce nel *core*, è necessario analizzare il sistema costituito dai segnali delle varie copie di elettrodi della sonda, ognuna delle quali sensibile in maniera differente ai parametri del deflusso.

Sebbene il modello numerico, associato al modello fluidodinamico del deflusso anulare, consenta di interpretare i segnali sperimentali, ulteriori approfondimenti sono necessari per sviluppare un modello della sonda che possa essere utilizzato all'interno di uno SP per ricavare il grado di vuoto e gli altri parametri del deflusso di interesse pratico.

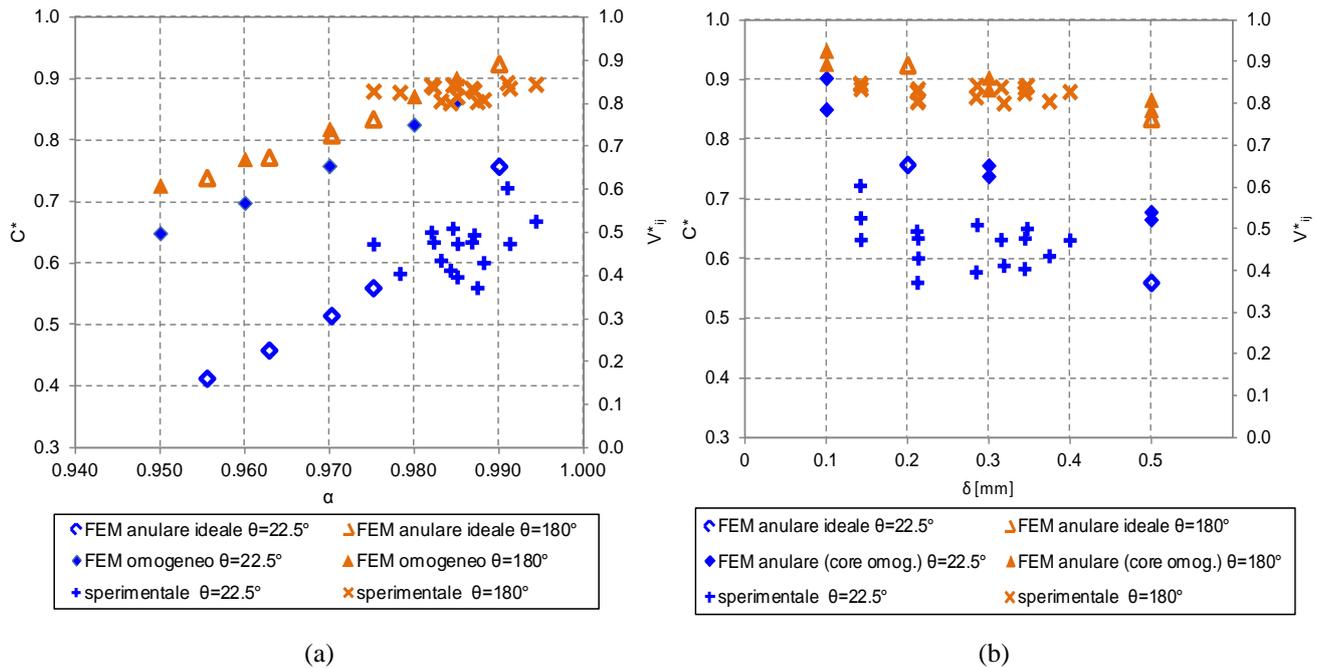


Fig. 32: Confronto tra segnale normalizzato e modelli numerici in funzione del grado di vuoto (a) e dello spessore di film liquido (b) per le coppie di misura a  $22.5^\circ$  e  $180^\circ$

### Elettrodo centrale

Come per i segnali misurati tra gli elettrodi esterni, i segnali misurati in corrispondenza dell'elettrodo centrale vengono analizzati in funzione delle grandezze fluidodinamiche e confrontati con i risultati del modello numerico.

In Fig. 34 è riportato il valore del segnale normalizzato  $V_{ij}^*$ , per l'elettrodo centrale, in funzione della velocità superficiale dell'aria e parametrizzato in funzione della velocità superficiale dell'acqua.

Il segnale cresce con la portata d'aria, mentre non mostra una dipendenza diretta dalla portata di liquido.

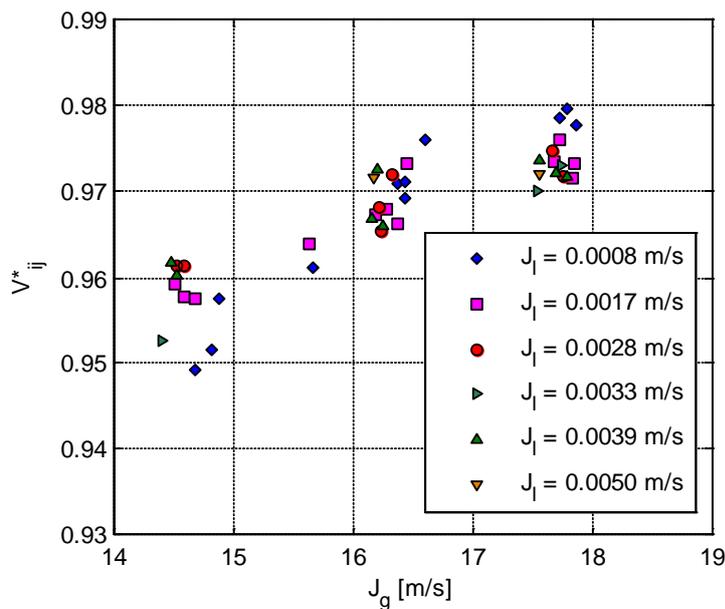


Fig. 33: Segnale normalizzato associato alla misura dell'elettrodo centrale in funzione delle velocità delle due fasi

La variazione del segnale dalla velocità dell'acqua è evidenziata in Fig. 35 (a) e (b) dove viene riportato il segnale della sonda in funzione del grado di vuoto volumetrico (a) e dello spessore del film (b).

Come per gli elettrodi esterni il segnale cresce al crescere del grado di vuoto secondo delle curve che dipendono fortemente dalla velocità della fase liquida. La caratterizzazione di queste curve (pendenza, tipologia, ecc..) richiede ulteriori indagini sperimentali.

In Fig. 36 e Fig. 37 è riportato il confronto tra i risultati del modello numerico e i dati sperimentali. I grafici mostrano una buona corrispondenza, ma ulteriori indagini sono necessarie per caratterizzare lo strumento.

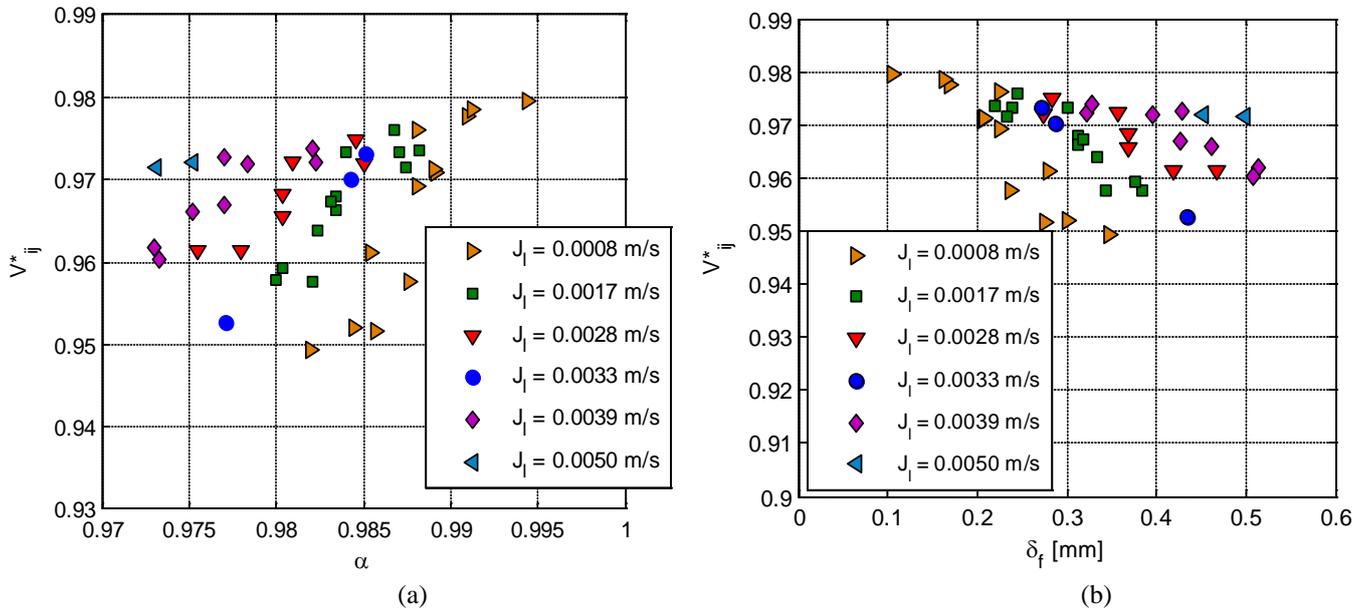


Fig. 34: Segnale normalizzato associato alla misura dell'elettrodo centrale in funzione di (a) grado di vuoto e (b) spessore del film

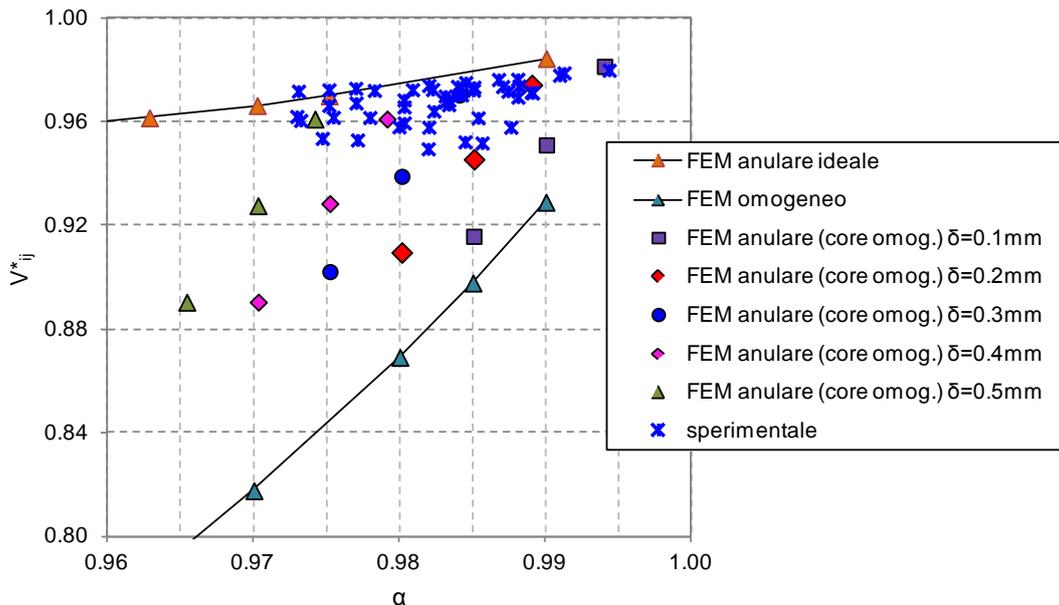
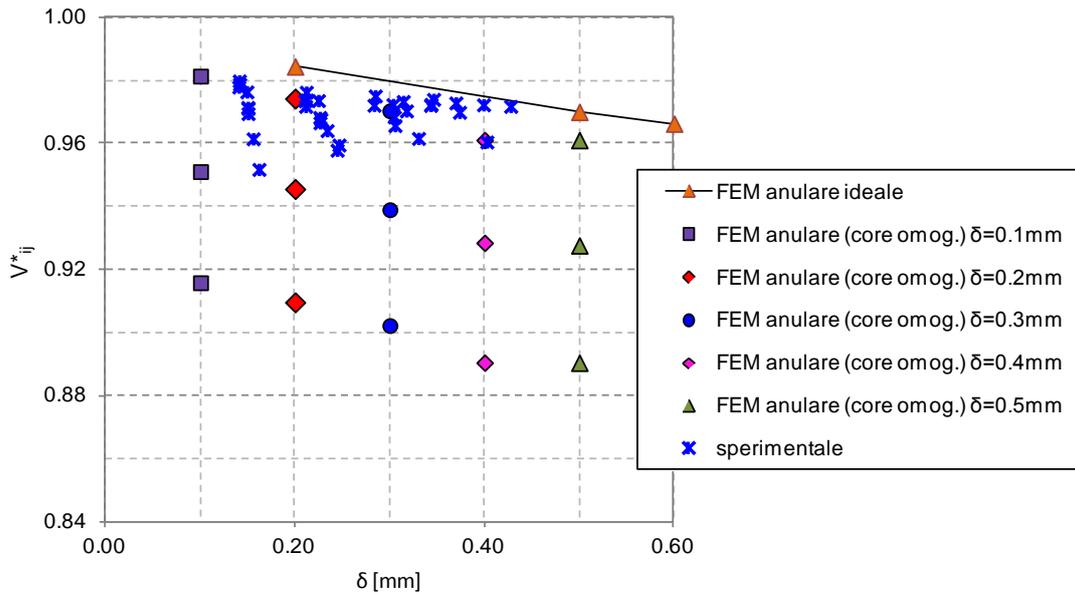


Fig. 35: Confronto tra segnale normalizzato e modelli numerici in funzione del grado di vuoto per l'elettrodo centrale



**Fig. 36: Confronto tra segnale normalizzato e modelli numerici in funzione dello spessore di film liquido per l'elettrodo centrale**

## 6 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

- Sonda ECP
- Venturi
- Pressione
- Temperatura

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

La combinazione dei modelli dei singoli strumenti, costituisce quindi il modello dello SP.

Come visto nei paragrafi precedenti, per modellizzare il comportamento del Venturi, interessato da un deflusso bifase, si possono utilizzare diversi approcci aventi differenti livelli di accuratezza e complessità.

L'utilizzo del modello fluidodinamico, per poter essere coerente, richiede la conoscenza di grandezze locali quali il grado di vuoto nelle varie sezioni del misuratore, e il titolo.

L'utilizzo del coefficiente di scarico bifase d'altra parte richiede la conoscenza del grado di vuoto medio globale, utilizzato per calcolare la densità bifase e il numero di Reynolds bifase, da cui il coefficiente di scarico dipende, oltre che del titolo della miscela.

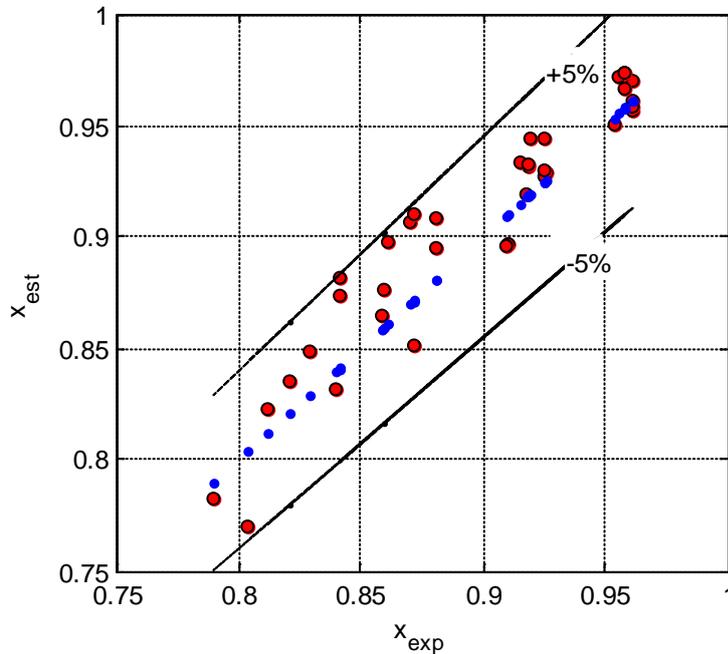
Nel terzo metodo proposto, l'utilizzo del moltiplicatore bifase funzione del parametro di Martinelli modificato, richiede la sola conoscenza del titolo della miscela e della curva monofase dello strumento.

Nel primo caso occorre quindi avere uno strumento che accorpa il misuratore di grado di vuoto e il Venturi; nel secondo modello proposto, dai segnali della sonda si dovrebbero ricavare le informazioni relative al grado di vuoto, input del modello del Venturi.

Nel terzo modello proposto, la conoscenza del grado di vuoto non è necessaria, in quanto è richiesta la sola conoscenza del titolo della miscela e della caratteristica monofase dello strumento. La seconda equazione del modello, necessaria a chiudere il problema, viene ottenuta dalla misura delle cadute di pressione irreversibili nel Venturi (equazione (54)), funzione delle velocità superficiali delle due fasi. Tramite un approccio iterativo, è possibile stimare le portate di aria e acqua sulla base dei due segnali di cadute di pressione nel

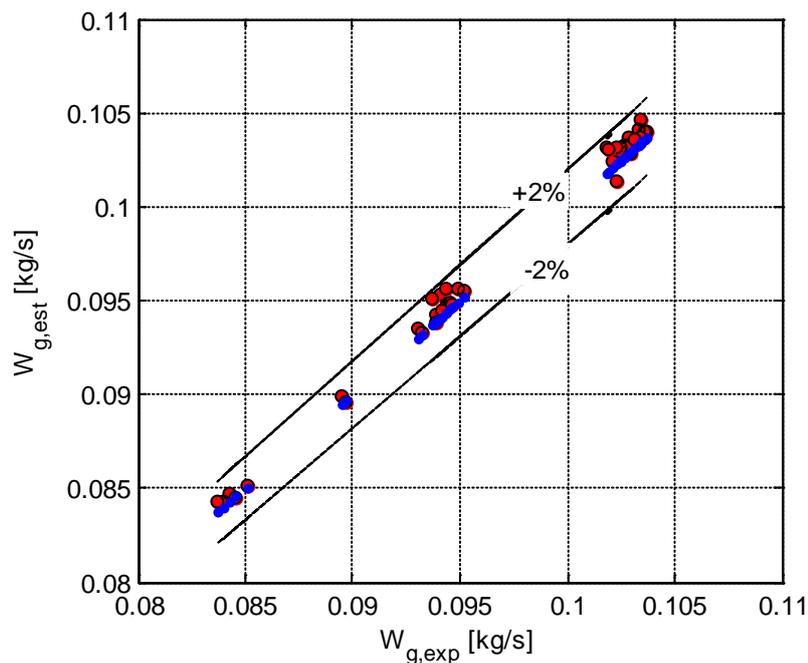
Venturi. Le portate delle fasi e il titolo stimati con questo modello, sulla base dei segnali sperimentali (mediati sul tempo di acquisizione di 30 s), sono riportati di seguito.

In Fig. 38, è riportato il confronto tra il titolo ottenuto dal modello e il titolo misurato sperimentalmente. Lo scostamento percentuale è inferiore al 5% per tutte le prove considerate.

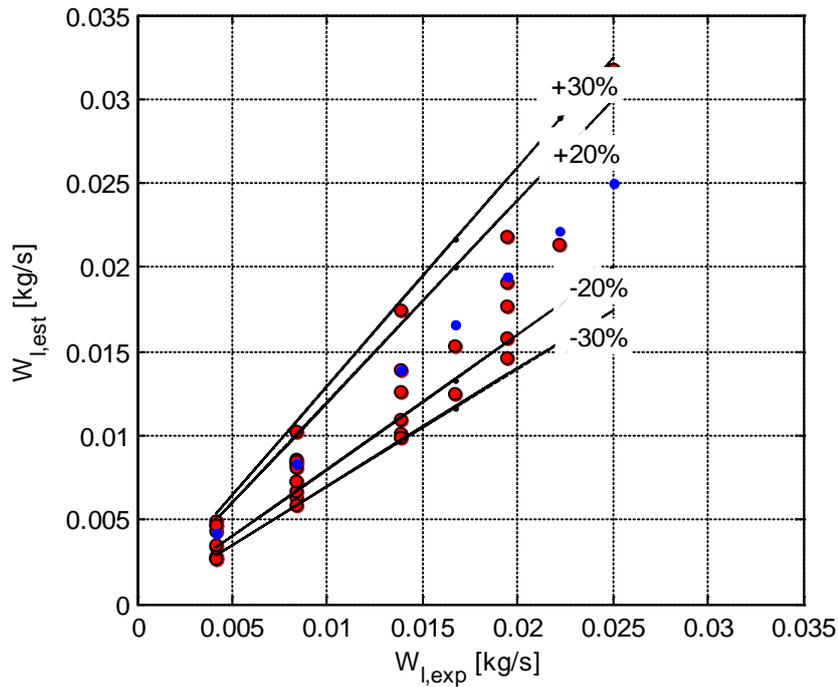


**Fig. 37: Confronto tra titolo sperimentale e titolo ottenuto dal modello del Venturi con moltiplicatore bifase**

In Fig. 39 e Fig. 40 sono riportati i confronti tra le portate stimate e le portate sperimentali, per aria e acqua rispettivamente. Le portate d'aria stimate dal modello sono caratterizzate da uno scostamento, rispetto ai dati sperimentali sempre inferiore al 2%. Incertezze maggiori, si hanno nella stima delle portate della fase liquida. Gli scostamenti percentuali sono comunque inferiori al 30% in tutti i casi analizzati.



**Fig. 38: Confronto portata aria sperimentale e ottenuta dal modello del Venturi con moltiplicatore bifase**

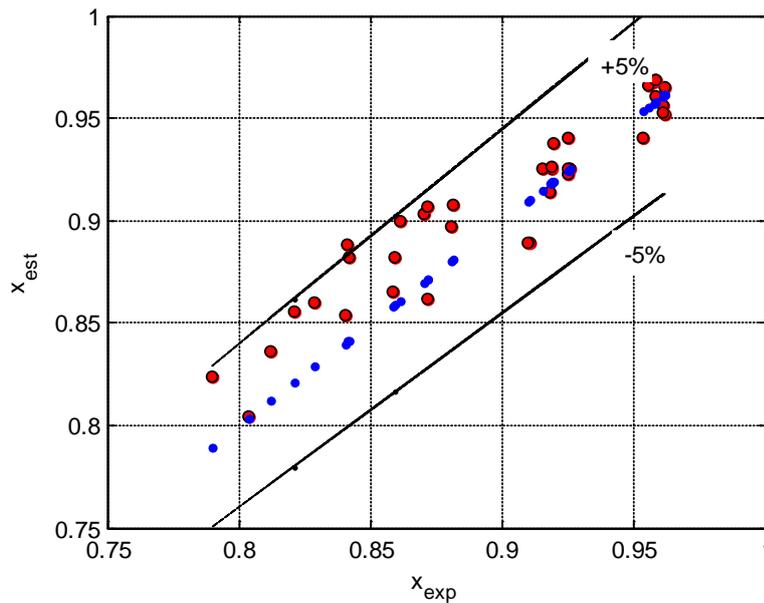


**Fig. 39: Confronto portata acqua sperimentale e ottenuta dal modello del Venturi con moltiplicatore bifase**

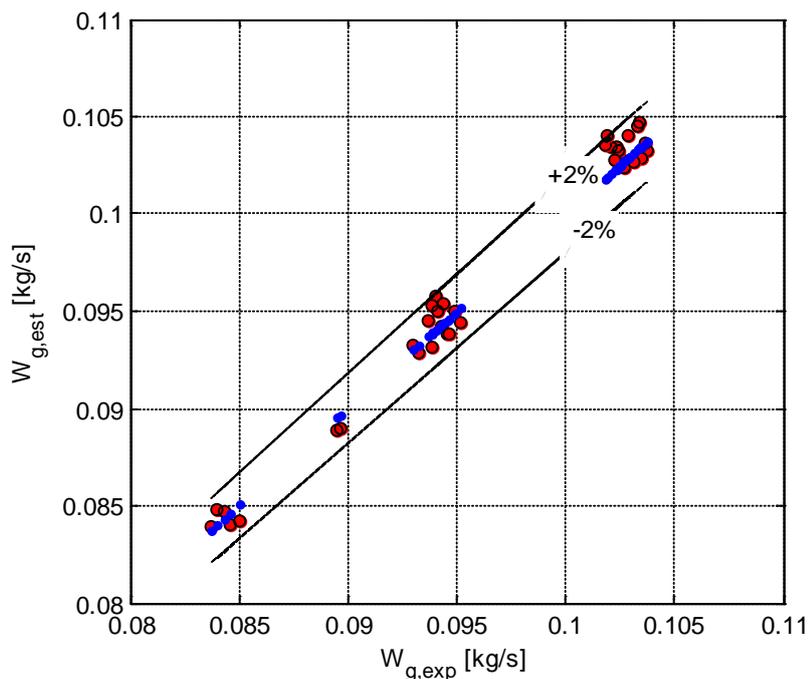
Il secondo approccio proposto prevede la stima delle portate a partire dai due segnali del Venturi e dalla conoscenza del grado di vuoto. Sulla base dei dati di input è possibile valutare, sempre tramite approccio iterativo, il coefficiente di scarico bifase, e conseguentemente le portate delle due fasi.

L'utilizzo della secondo segnale del Venturi, consente di avere un numero tale di equazioni del sistema da non richiedere l'introduzione di correlazioni  $x-\alpha$ . Il grado di vuoto dovrebbe essere ricavato dai segnali della sonda.

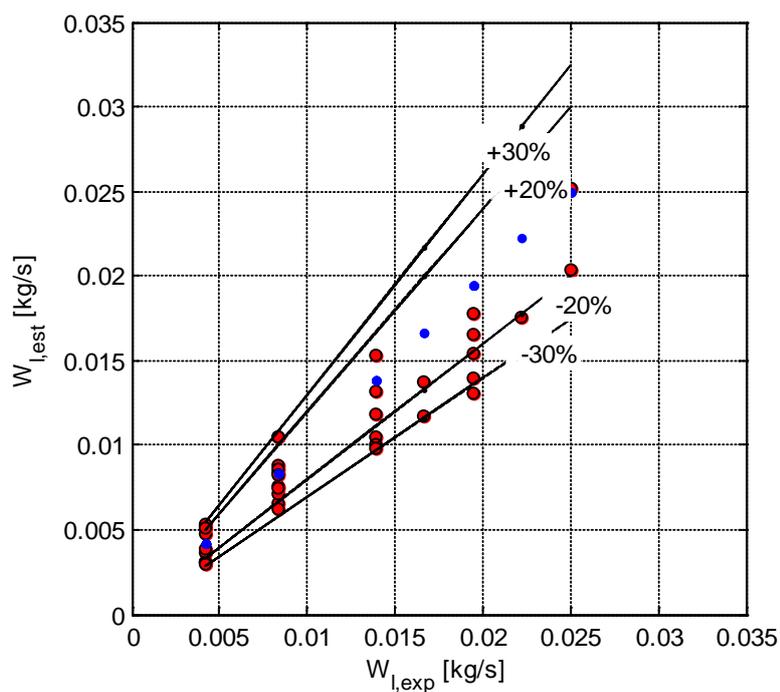
Nell'ipotesi di conoscere il grado di vuoto sperimentale con un errore trascurabile, il modello proposto fornisce i risultati riportati nei grafici di Fig. 41, Fig. 42 e Fig. 43.



**Fig. 40: Confronto tra titolo sperimentale e titolo ottenuto dal modello del Venturi con coefficiente scarico bifase**



**Fig. 41: Confronto portata aria sperimentale e ottenuta dal modello del Venturi con coefficiente scarico bifase**



**Fig. 42: Confronto portata acqua sperimentale e ottenuta dal modello del Venturi con coefficiente scarico bifase**

I grafici mostrano che l'utilizzo del grado di vuoto nell'approccio che prevede la stima del coefficiente di scarico bifase del Venturi, non riduce gli errori relativi alla stima della portata delle due fasi. La conoscenza delle grandezze locali è dunque necessaria per ridurre gli errori di stima, utilizzando l'approccio fluidodinamico.

## 7 CONCLUSIONI

Nel presente documento è descritta la caratterizzazione di uno Spool Piece (SP) costituito da un Venturi e dalla sonda ECP, installati in un condotto verticale interessato da una miscela aria-acqua in deflusso anulare e anulare disperso. 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 e identificare le caratteristiche del deflusso.

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.

La sonda ECP sviluppata presso la SIET e testata nei laboratori del Politecnico di Torino è stata caratterizzata tramite un modello numerico agli elementi finiti che ha permesso di determinare la dipendenza della capacità elettrica misurata dai vari elettrodi al variare dei parametri caratteristici del deflusso bifase anulare: spessore del film e grado di vuoto del *core*.

Il confronto tra risultati del modello numerico e i dati sperimentali hanno mostrato la necessità di utilizzare sia il modello fluidodinamico, che descrive la distribuzione locale delle fasi, sia il modello numerico per interpretare i segnali dello strumento e ricavare le grandezze di interesse. L'analisi dei dati sperimentali ha inoltre mostrato che il segnale della sonda è influenzato da capacità/impedenze parassite aggiuntive che devono essere eliminate o tenute in debita considerazione nello sviluppo di un modello dello strumento.

Per quanto riguarda il Venturi, l'analisi dei dati sperimentali ha mostrato la possibilità di utilizzare la misura delle cadute di pressione irreversibili (misura tra sezione di ingresso e sezione di uscita dello strumento) congiuntamente alla misura di caduta di pressione tra ingresso e sezione ristretta, per ricavare le portate delle due fasi.

L'analisi dei dati ha infatti mostrato che le cadute di pressione irreversibili dipendono fortemente dalla velocità superficiale del liquido. La conoscenza dei segnali relativi alle due cadute di pressione, insieme ai valori di pressione e temperatura, hanno quindi permesso di sviluppare un modello dello strumento che consente di calcolare la portata di aria e acqua con un errore massimo rispettivamente del 2% e del 30%.

Nel secondo approccio proposto le portate delle due fasi vengono stimate sulla base del modello del Venturi che richiede la conoscenza del coefficiente di scarico bifase dello strumento e della densità bifase.

L'analisi ha evidenziato che la conoscenza del grado di vuoto volumetrico nella *test section* (necessaria per la stima dei parametri del modello) non consente di ridurre gli errori sulla stima delle portate.

Come evidenziato dall'analisi numerica della sonda ECP e dalla modellizzazione della risposta del Venturi, la conoscenza della topologia del deflusso risulta essere fondamentale per l'interpretazione dei segnali.

La conoscenza delle grandezze locali è dunque necessaria per ridurre gli errori di stima delle portate. In particolare si riscontra la necessità di misurare il grado di vuoto in ingresso, nella sezione ristretta e in uscita del Venturimetro. La conoscenza di queste grandezze consentirebbe 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.

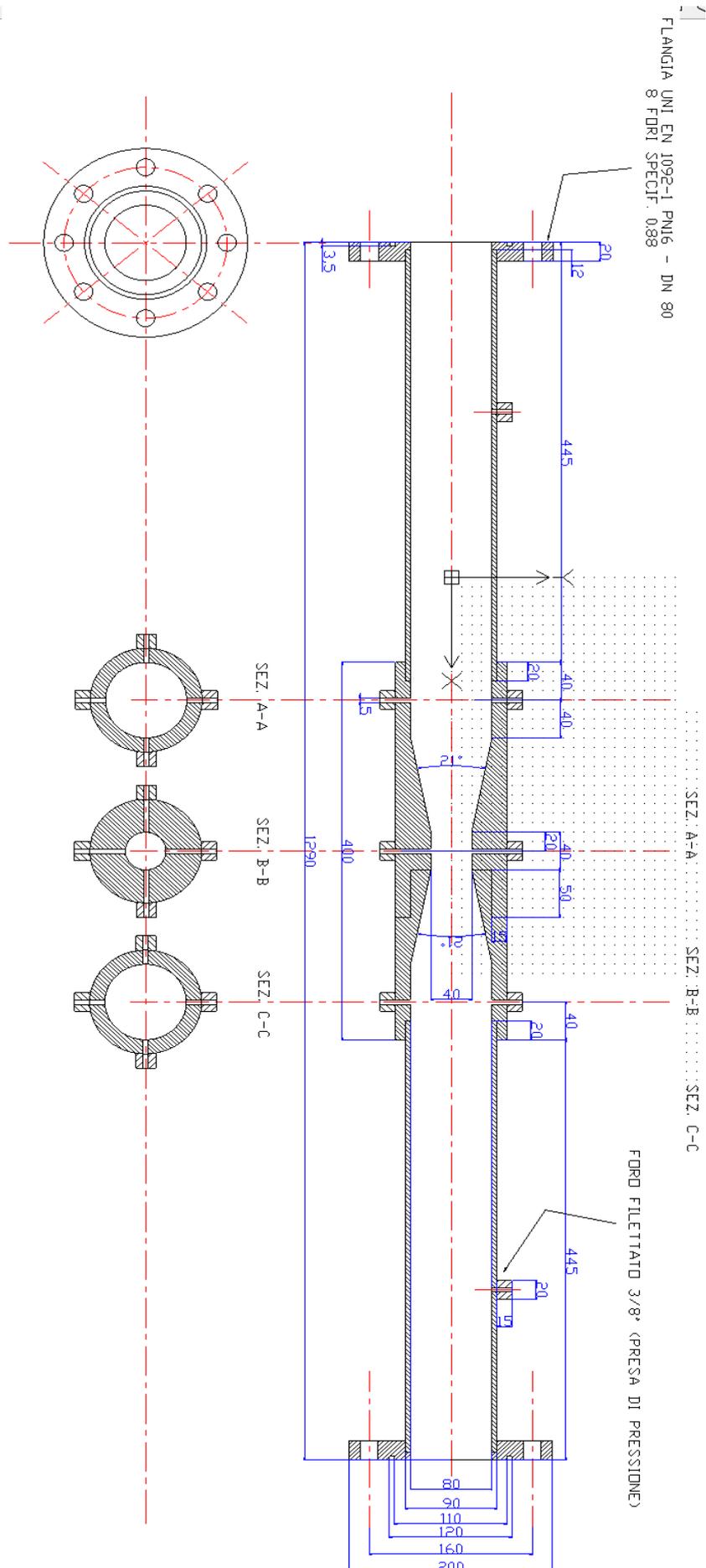
## BIBLIOGRAFIA

- [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. Masetto, *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 6<sup>th</sup> European Thermal Sciences Conference, Eurotherm 2012 September 04 – 07, Poitiers - Futuroscope France
- [9] Achilli, M. Greco, *Progettazione di una sonda capacitiva per misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscela 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 9<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, July 2012 Malta
- [12] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, *A Model for a Spool Piece made up of Venturi and Void fraction Flow Meter in Horizontal Flow*, Trans. ANS, Vol. 108 1013-1016, Atlanta, Georgia, June 16–20 (2013)
- [13] M. Ishii, K. Mishima, *Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations*, Nuclear Engineering and Design, 82, 107-126 (1984)
- [14] Norma ISO 5167-1:4 :2003 (E)
- [15] OMEGA, *Complete Flow and Level Measurement Handbook and Encyclopedia®*, OMEGA Press (2005)
- [16] C. R. Baker, *Flow measurement handbook*, Cambridge University Press (2000)
- [17] A. E. Dukler, M. Wicks, and R.G. Cleveland, *Frictional pressure drop and holdup in two phase flow, Part A, A Comparison of existing correlations for pressure drop and holdup, B An approach through similarity analysis*, AIChE J. 10, 38-43 and 44 -51, (1964).
- [18] K. Aziz, G. W. Govier, M. Fogarasi, *Pressure drop in wells producing oil and gas*, J. Canadian Petro. Tech, 38-48 (1972)
- [19] A. H. A. M. Hasan, G. P. Lucas, *Experimental and theoretical study of the gas-water two phase flow through a conductance multiphase Venturi meter in vertical annular (wet gas) flow*, Nuclear Engineering and Design, 241, 1998-2005 (2011)
- [20] R. Steven, *Horizontally installed differential pressure meter wet gas flow performance review*, In: North sea flow measurement workshop (2006).

- [21] J. G. Collier, J. R. Thome, *Convective Boiling and Condensation* 3<sup>th</sup> edition, Oxford Science Publications
- [22] C. J. Baroczy, *A systematic correlation for two-phase pressure drop*, AIChE reprint 37 presented at 8<sup>th</sup> National Heat Transfer Conference, Los Angeles, August
- [23] R. W. Lockhart and R.C. Martinelli, *Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes*, *Chem. Eng. Prog.*, 45, 39 (1949).
- [24] R. C. Martinelli and D. B. Nelson, *Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water*, *Trans. ASME*, 70, 695 (1948).
- [25] P. B. Whalley, *Boiling, Condensation, and Gas-Liquid Flow*.

# ALLEGATO I

## Disegno Venturi



## ALLEGATO II

### Matrice Sperimentale: valori medi misurati dei principali parametri

RUN	p <sub>inlet</sub> [bar]	T <sub>inlet</sub> [°C]	W <sub>air</sub> [kg/s]	W <sub>water</sub> [kg/s]	x	α	Dp <sub>venturi in-thr</sub> [mbar]	Dp <sub>venturi in-out</sub> [mbar]
1	1.01	32	0.104	0.0042	0.961	0.991	39.5	18.7
2	1.01	32	0.104	0.0083	0.926	0.987	39.8	20.2
3	1.02	32	0.103	0.0167	0.861	0.985	40.6	21.7
4	1.02	32	0.103	0.0194	0.842	0.982	40.4	22.1
5	1.01	32	0.095	0.0042	0.958	0.989	32.5	14.0
6	1.01	32	0.094	0.0083	0.919	0.983	32.8	16.2
7	1.01	32	0.094	0.0139	0.871	0.980	33.6	18.8
8	1.01	32	0.094	0.0194	0.829	0.977	33.5	20.2
9	1.00	31	0.085	0.0042	0.953	0.982	26.2	13.2
10	1.00	31	0.084	0.0083	0.910	0.980	26.3	14.5
11	1.01	31	0.084	0.0139	0.859	0.976	27.0	15.7
12	1.01	31	0.084	0.0194	0.812	0.973	26.9	16.3
13	1.00	33	0.103	0.0042	0.961	0.991	39.4	17.7
14	1.00	32	0.103	0.0083	0.925	0.987	39.4	19.3
15	1.01	32	0.103	0.0139	0.881	0.985	39.3	20.6
16	1.01	33	0.103	0.0194	0.841	0.978	40.3	21.9
17	1.00	33	0.094	0.0042	0.957	0.988	32.6	14.0
18	1.00	33	0.093	0.0083	0.918	0.983	32.4	16.3
19	1.00	33	0.093	0.0139	0.870	0.980	32.6	16.8
20	1.00	33	0.093	0.0194	0.827	0.975	32.9	21.6
21	1.00	33	0.090	0.0042	0.956	0.985	29.5	12.6
22	1.00	33	0.090	0.0083	0.915	0.982	29.5	14.3
23	1.00	33	0.076	0.0042	0.948	0.980	20.9	10.6
24	1.00	33	0.079	0.0042	0.950	0.985	22.8	10.7
25	1.00	33	0.085	0.0042	0.953	0.986	26.1	12.0
26	1.01	33	0.085	0.0083	0.910	0.982	26.2	13.3
27	1.01	33	0.084	0.0139	0.859	0.978	27.0	14.0
28	1.01	33	0.084	0.0194	0.812	0.973	26.7	14.6
29	1.01	34	0.095	0.0042	0.958	0.988	33.1	14.3
30	1.01	33	0.095	0.0083	0.919	0.984	33.5	16.1
31	1.01	33	0.094	0.0139	0.872	0.981	33.8	17.4
32	1.02	33	0.094	0.0194	0.829	0.977	33.4	18.4
33	1.01	32	0.094	0.0250	0.790	0.973	33.7	19.3
34	1.01	32	0.103	0.0042	0.961	0.991	39.0	18.1
35	1.01	33	0.102	0.0083	0.925	0.987	39.2	19.9
36	1.01	33	0.102	0.0139	0.881	0.985	39.7	21.2
37	1.02	33	0.102	0.0194	0.840	0.982	39.8	22.5
38	1.02	33	0.102	0.0250	0.804	0.975	39.8	23.6
39	1.00	31	0.085	0.0042	0.953	0.988	26.1	12.2
40	1.00	31	0.095	0.0042	0.958	0.989	32.5	14.5
41	1.01	31	0.103	0.0042	0.961	0.994	39.2	18.4
42	1.00	31	0.084	0.0083	0.909	0.980	26.7	13.2
43	1.01	31	0.094	0.0083	0.918	0.983	33.7	16.4
44	1.01	32	0.102	0.0083	0.925	0.988	39.4	19.9
45	1.01	32	0.083	0.0167	0.833	0.977	26.8	14.3
46	1.01	32	0.094	0.0167	0.850	0.981	33.9	18.0
47	1.01	32	0.102	0.0167	0.859	0.984	39.9	21.8
48	1.00	32	0.083	0.0222	0.788	0.975	27.0	15.0
49	1.00	32	0.083	0.0222	0.789	0.974	27.2	14.9
50	1.01	32	0.102	0.0222	0.821	0.983	40.4	22.8