



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Relazione tecnica sulla messa a punto della strumentazione per la misura della portata bifase nella facility SPES-3

Carlo Randaccio



Report RdS/2013/073

RELAZIONE TECNICA SULLA MESSA A PUNTO DELLA STRUMENTAZIONE PER LA MISURA DELLA PORTATA BIFASE NELLA FACILITY SPES-3

Carlo Randaccio (SIET)

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

Titolo

**Relazione tecnica sulla messa a punto
della strumentazione per la misura della portata
bifase nella facility SPES-3**

Ente emittente SIET

PAGINA DI GUARDIA**Descrittori**

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
Argomenti trattati: Reattori e sistemi innovativi
Sicurezza Nucleare

Sommario

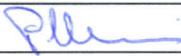
L'attività, descritta nella presente relazione tecnica, consiste nella messa a punto finale dello "Spool Piece" per la misura della portata massica bifase nelle linee di rottura dell'impianto sperimentale SPES-3. Allo scopo, è stato necessario integrare nello spool piece precedentemente realizzato, un misuratore di velocità da affiancare alla sonda capacitiva (che misura il grado di vuoto) e al drag disk (che misura il flusso di quantità di moto del fluido) un flussimetro a generazione di vortici per la misura della velocità della fase vapore. La sperimentazione sullo spool piece completo è stata realizzata su un impianto in grado di erogare vapore con potenze termiche dell'ordine di alcune centinaia di kW. Il drag disk, utilizzato per la misura del flusso della quantità di moto, data la sua scarsa sensibilità, è stato integrato con un sistema di misura alternativo il cui elemento sensibile al flusso è costituito da un tubo di Pitot multiplo. I set di dati sperimentali, raccolti durante le prove, sono stati elaborati in modo da calcolare la grandezza finale "portata massica bifase".

I risultati delle prove hanno evidenziato elevati errori nella determinazione del valore di portata bifase, principalmente dovuti alla elevata sensibilità del risultato rispetto al grado di vuoto misurato dalla sonda capacitiva. L'incertezza nella misura del grado di vuoto, peraltro ragionevole, determina errori molto più elevati nei valori di portata bifase. Per raggiungere errori più contenuti del valore di portata bifase è necessario ridurre ulteriormente l'incertezza del valore di grado di vuoto adottando accorgimenti migliorativi della sonda capacitiva.

Note

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	09/09/2013	NOME	P. Meloni	NA	F. De Rosa
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE

**EMITTENTE***issued by***Unità di Produzione (Sezione Ingegneria)***Production Unit (Engineering Section)*

CLIENTE: <i>client</i>	ENEA	COMMESSA: <i>Job</i>	1PN00SS30152	DISCO: <i>disk</i>	PAGINA: <i>page</i>	1	DI: <i>of</i>	73
----------------------------------	-------------	--------------------------------	---------------------	------------------------------	-------------------------------	----------	-------------------------	-----------

IDENTIFICATIVO :	02 116 RT 13	Classe Ris.: <i>confidentiality</i>	Allegati: <i>enclosures</i>
----------------------------	---------------------	-----------------------------------------------	---------------------------------------

TITOLO: <i>title</i>	Relazione tecnica sulla messa a punto della strumentazione per la misura della portata bifase nella facility SPES-3
--------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

REDATTORI: <i>prepared by</i>	C. Randaccio
-----------------------------------------	---------------------

LISTA DI DISTRIBUZIONE <i>distribution list</i>

ENEA Paride Meloni

0	09-08-2013	ISSUE	C.Randaccio	A. Achilli
REV. <i>rev.</i>	DATA <i>date</i>	DESCRIZIONE <i>description</i>	REDAZIONE <i>prepared by</i>	APPROVAZIONE <i>approved by</i>

Informazioni strettamente riservate di proprietà SIET SpA - Da non utilizzare per scopi diversi da quelli per cui sono state fornite.
Confidential information property of SIET SpA - Not to be used for any purpose other than those for which it is supplied.

SOMMARIO

SOMMARIO.....	2
LISTA DELLE TABELLE.....	3
LISTA DELLE FIGURE.....	4
3. SPOOL PIECE	9
3.1 Sonda capacitiva	10
3.2 Misura del flusso della quantità di moto	13
3.3 Misura di velocità.....	15
4. IMPIANTO SPERIMENTALE DI PROVA.....	18
4.1 Preparazione della miscela bifase.....	18
4.2 Sezione di prova orizzontale	19
5. TITOLO, PORTATA E GRADO DI VUOTO ALL'INGRESSO DELLA SEZIONE DI PROVA	22
6. MODELLO MATEMATICO PER IL CALCOLO DELLA PORTATA BIFASE.....	24
7. PROVE STATICHE E SET UP STRUMENTAZIONE SPECIALE	26
7.1 Sonda capacitiva	26
7.2 Drag disk	30
7.3 Vortex	31
8. PROVE SPERIMENTALI	32
8.1 Modalità di conduzione delle prove.....	32
8.2 Matrice sperimentale di prove	33
8.3 Prove sperimentali con Spool piece composta da <i>Vortex</i> , <i>Sonda capacitiva</i> e <i>Drag disk</i>	34
8.3.1 Analisi dati	37
8.3.2 Misura del flusso della quantità di moto con un sistema alternativo	47
8.4 Prove sperimentali con Spool piece composta da <i>Vortex</i> , <i>Sonda capacitiva</i> e <i>Tubo di Pitot</i>	48
8.4.1 Analisi dati	51
8.4.2 Calcolo portata massica bifase	64
9. CONCLUSIONI.....	70
10. BIBLIOGRAFIA.....	71

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 2: Limiti della matrice sperimentale	33
Tabella 3: Prima campagna sperimentale di prove (foglio 1 di 2)	34
Tabella 3: Prima campagna sperimentale di prove (foglio 2 di 2)	35
Tabella 4: Errore percentuale sulla misura del Grado di vuoto	41
Tabella 5: Spinta misurata dal drag disk vs Flusso della quantità di moto teorico.....	44
Tabella 6: Seconda campagna sperimentale di prove	48
Tabella 7: Flusso della quantità di moto teorico vs sperimentale.....	52
Tabella 8: confronto tra grado di vuoto teorico e sperimentale	55
Tabella 9: punti sperimentali seconda campagna	60
Tabella 10: Segnali Spool Piece.....	64
Tabella 11: Grandezze ricavate.....	65
Tabella 12: portata massica.....	66
Tabella 13: Massimi e minimi valori grandezze termodrauliche	69

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1: Sonda capacitiva	10
Figura 2: Cella di carico e sezione di prova.....	13
Figura 3: principio di funzionamento del vortex	15
Figura 4: Installazione drag disk e vortex nella sezione di prova	16
Figura 5: Portata massima e minima di vapore in funzione della pressione assoluta.....	17
Figura 6: Velocità massima e minima di vapore in funzione della pressione assoluta	17
Figura 7: Preriscaldatore POLIMI	18
Figura 8: Sezione orizzontale di prova	19
Figura 9: Indicatore graduato di livello per prove statiche.....	26
Figura 10: Segnale RMS elettrodi orientati a 22.5° (espresso in microvolt).....	27
Figura 11: Segnale normalizzato elettrodi orientati a 22.5°.....	27
Figura 12: Segnale RMS elettrodi orientati a 45° (espresso in microvolt).....	28
Figura 13: Segnale normalizzato elettrodi orientati a 45°.....	28
Figura 14: Prove statiche sul drag disk	30
Figura 16: Andamento del segnale in funzione della pressione della sezione di prova.....	31
Figura 17: matrice di prove pressione [bar] vs titolo (per portata $m=0.234$ [kg/s]).....	36
Figura 18: matrice di prove pressione [bar] vs titolo (per portata $m=0.183$ [kg/s]).....	36
Figura 19: Segnale Vortex (V) vs Velocità vapore (m/s) a pressione [bar] crescente.....	37
Figura 20: Segnale Vortex (V) vs Titolo di vapore a pressione [bar] crescente	37
Figura 21: Correlazione tra Velocità fase vapore (m/s) vs segnale del vortex (V)	38
Figura 22: Segnale normalizzato sonda capacitiva in funzione della distanza tra gli elettrodi in mm (prove a $p=1$ bar). Ogni colore si riferisce ad uno specifico grado di vuoto.	39
Figura 23: Segnale normalizzato sonda capacitiva in funzione della distanza tra gli elettrodi in mm (prove a $p=2$ bar). Ogni colore si riferisce ad uno specifico grado di vuoto.	39
Figura 24: Segnale normalizzato sonda capacitiva in funzione della distanza tra gli elettrodi in mm (prove a $p=3$ bar). Ogni colore si riferisce ad uno specifico grado di vuoto.	40
Figura 25: Segnale normalizzato sonda capacitiva in funzione della distanza tra gli elettrodi in mm (prove a $p=4$ bar). Ogni colore si riferisce ad uno specifico grado di vuoto.	40
Figura 26: Confronto tra Grado di vuoto sperimentale e teorico vs Titolo.....	42
Figura 27: Confronto tra Grado di vuoto sperimentale e teorico vs Titolo per le diverse pressioni [bar] della sezione di prova.....	42
Figura 28: Flusso della quantità di moto teorico vs Spinta misurata dal Drag disk.....	45
Figura 29: Flusso della quantità di moto teorico vs Spinta misurata dal Drag disk.....	45
Figura 30: Spinta misurata dal Drag disk vs Titolo	46
Figura 31: Spinta misurata dal Drag disk vs Titolo	46
Figura 32: Tubo di Pitot	47
Figura 33: prove sperimentali a $m=0.234$ [kg/s]	49
Figura 34: prove sperimentali a $m=0.183$ [kg/s]	50
Figura 35: prove sperimentali a $m=0.133$ [kg/s]	50
Figura 36: Velocità fase vapore [m/s] vs Segnale Vortex [V]	51
Figura 37: Correlazione tra Velocità fase vapore [m/s] e Segnale del Vortex [V]	51
Figura 38: Flusso della quantità di moto teorico vs sperimentale	53
Figura 39: Correlazione Flusso della quantità di moto teorico vs sperimentale.....	53
Figura 40: Flusso della quantità di moto teorica (M teo) e sperimentale (M Pitot) vs pressione	54
Figura 41: Segnale normalizzato della sonda capacitiva in funzione della distanza tra gli elettrodi in mm. Ogni grafico si riferisce ad un pressione diversa (1, 2, 3 e 4 bar) e ogni colore si riferisce ad uno specifico grado di vuoto.	56
Figura 42: Grado di vuoto sperimentale vs teorico in funzione del titolo.....	57
Figura 43: Grado di vuoto in funzione del titolo e della portata	57
Figura 44: Errore percentuale sul grado di vuoto per serie di punti a uguale portata	58
Figura 45: Errore percentuale sul grado di vuoto per serie di punti a uguale pressione.....	58
Figura 46: Errore sul calcolo della densità in funzione dell'errore sul grado di vuoto	59
Figura 47: Confronto tra i dati di grado di vuoto teorici e sperimentali delle due campagne di prove	59
Figura 48: grado di vuoto vs titolo punti a $m=0.233$ [kg/s], $p=1.2$ [bar]	60

Figura 49: Segnale normalizzato elettrodi a 180° vs prove (in legenda coppie di elettrodi di misura)	61
Figura 50: Segnale normalizzato elettrodi a 90° vs prove (in legenda coppie di elettrodi di misura)	61
Figura 51: Segnale normalizzato elettrodi a 45° vs prove (in legenda coppie di elettrodi di misura)	61
Figura 52: distribuzione fase vapore nella sezione della sonda per le prove 1, 5 e 9	62
Figura 53: Portata effettiva, teorica, sperimentale.....	67
Figura 54: portata [kg/s] vs titolo	68
Figura 55: portata [kg/s] vs pressione [bar]	68

LISTA DEGLI ALLEGATI

Certificato di taratura vortex Endress+Hauser.....	72
Schema di flusso strumentato dell'impianto prova SPOOL PIECE.....	73

1. OBIETTIVO

Questo documento riguarda la messa a punto finale della strumentazione speciale per la misura della portata massica bifase nelle linee per la simulazione delle rotture¹ e nelle linee di scarico dell'ADS dell'impianto sperimentale SPES-3.

Le attività svolte nel PAR 2012 riguardano:

- L'integrazione nello "Spool Piece" di uno strumento per la misura della velocità.
- Prove a caldo per la caratterizzazione della strumentazione.
- Messa a punto di un modello numerico per il calcolo della portata massica bifase.

¹ Tali linee permettono di simulare i transitori di perdita di refrigerante, conseguenti a rotture singole (split) o doppie (DEG: Double Ended Guillotine) dei componenti dell'impianto reale.

2. INTRODUZIONE

La necessità di effettuare misure in bifase nasce dall'esigenza di ricostruire la distribuzione di massa e di energia nei diversi componenti dell'impianto sperimentale SPES3.

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

Una caratteristica dei reattori integrali è il coinvolgimento, durante i transitori incidentali, dei volumi facenti parte del contenimento che, in determinate fasi, determinano il rientro nel vessel della massa d'acqua precedentemente fuoriuscita dalla rottura.

A causa della notevole differenza di pressione tra i circuiti primario e secondario (rispettivamente 155 e 58 bar circa) rispetto al sistema di contenimento (a pressione atmosferica), in caso di rottura, si verifica la presenza di flusso 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 e a valle delle valvole di rottura, sono interessati dalla presenza di fluido bifase.

3. SPOOL PIECE

La determinazione della portata massica bifase non è realizzabile mediante una misura diretta, ma richiede l'utilizzo di un set di strumenti eterogenei, denominati SPOOL PIECE, che, nel caso di SPES3, è composto da tre strumenti: un misuratore di grado di vuoto, un misuratore di flusso della quantità di moto e un misuratore di velocità media della miscela [3].

Tale strumentazione non è disponibile commercialmente o, se disponibile, richiede delle modifiche. Per questo motivo negli anni scorsi sono state avviate attività di ricerca finalizzate allo sviluppo e messa a punto di strumentazione per la misurazione di parametri tipici della termoidraulica bifase.

Dallo studio dei transitori incidentali in SPES3, tramite simulazione RELAP5 [1], [2], sono stati ricavati gli intervalli di misura delle grandezze d'interesse (Tabella 1) e, quindi, definite le specifiche tecniche per la misurazione della portata bifase [3], [4].

Note le grandezze rilevate dagli strumenti facenti parte dello SPOOL PIECE, sono state ricavate le correlazioni matematiche che permettono di ottenere la portata massica bifase [5].

PARAMETRO TERMOIDRAULICO		MIN	MAX
Temperatura	[°C]	36	216
Pressione	[MPa]	0.1	2
Flusso quantità di moto	[Pa]	0	900796
Velocità fase vapore	[m/s]	-6	400
Velocità fase liquida	[m/s]	-6	200
Velocità media miscela	[m/s]	-6	330
Grado di vuoto	[%]	60	100

Tabella 1: Massimi e minimi valori dei parametri termoidraulici a valle della generica rottura in SPES3

3.1 Sonda capacitiva

Per la misura del grado di vuoto della miscela si è deciso di intraprendere lo sviluppo di una sonda capacitiva. Tale dispositivo si basa sulla rilevazione della variazione della costante dielettrica del fluido in presenza di fase liquida o vapore [6], [7].



Figura 1: Sonda capacitiva

Il progetto e lo sviluppo della sonda capacitiva è descritto approfonditamente nei documenti [6],[7],[9].

Essa è composta da un tubo in pyrex da 3" lungo 600 mm, di 5 mm spessore con condizioni massime di esercizio di 200°C e 15 bar.

16 elettrodi metallici lunghi 45 cm sono disposti sulla superficie esterna del tubo in pyrex e distanziati angularmente di 22,5°. Gli elettrodi vengono attivati a coppie secondo tutte le combinazioni possibili e viene registrato un segnale proporzionale all'impedenza tra di essi.

La variazione di impedenza misurata tra gli elettrodi è associata alla variazione di costante dielettrica del mezzo ovvero ad una variazione della distribuzione delle fasi liquido e vapore ed in ultima analisi alla variazione del grado di vuoto medio all'interno del volume di controllo definito dalla sonda.

Nel PAR precedente la sonda è stata collaudata con flussi acqua /vapore prototipici e le misure di grado di vuoto, ottenute per pesatura con l'ausilio di valvole rapide, sono state correlate ai segnali della sonda in modo da ottenere un modello predittivo sperimentale.

Il segnale RMS in output da ogni coppia di elettrodi attivata $V = f(\alpha, d)$, funzione del grado di vuoto α , e della distanza tra gli elettrodi d , viene normalizzato nel modo seguente:

$$V^*(\alpha, d) = \frac{V - V_V}{V_L - V_V} \quad (1)$$

rapportando il segnale V , al massimo valore che esso può assumere, V_L , rende confrontabili i segnali ottenuti attivando coppie di elettrodi a distanze differenti.

In questo modo, il segnale normalizzato $V^*(\alpha, d)$ varia tra 0 (tutto vapore) e 1 (tutto liquido).

Successivamente viene calcolata la media dei segnali normalizzati ottenuti con coppie di elettrodi omologhi $\overline{V^*(\alpha)}$:

$$\overline{V^*(\alpha)} = \frac{1}{n} \sum_d V^*(\alpha)$$

n : numero di misure effettuate con coppie di elettrodi omologhi alla distanza d . 32 misure per gli elettrodi orientati a 22.5°, 45°, 67.5°, 90°, 112.5°, 135° e 157.5° e 16 misure per gli elettrodi orientati a 180°.

d : distanza lineare tra gli elettrodi di misura.

θ [°]	d [mm]
22.5°	18.85
45°	37.7
67.5°	56.55
90°	75.4
112.5°	94.25
135°	113.1
157.5°	131.95
180°	150.8

In tabella è mostrata la corrispondenza tra angolo compreso tra gli elettrodi di misura e distanza lineare tra di essi.

A questo punto, il segnale normalizzato viene moltiplicato per un coefficiente arbitrario che tiene conto dell'area di influenza di ciascuna coppia di elettrodi [9] $A(d)$.

Il segnale ottenuto per ciascuna combinazione, infatti, è proporzionale al valore della costante dielettrica media della porzione di fluido attraversata dalle linee di flusso del campo elettrico. Per tener conto di questo fatto si associa a ciascun segnale normalizzato un coefficiente, che tiene conto del peso che ciascuna misura ha sulla stima del grado di vuoto complessivo della miscela:

$$[(\overline{V^*(\alpha)})^*] = [\overline{V^*(\alpha)}] * [A(d)]$$

$[(\overline{V^*(\alpha)})^*]$ è una matrice $8 \times \alpha$, dove 8 rappresenta il numero di misure omologhe tra i 16 elettrodi della sonda.

Ora se consideriamo la funzione $(\overline{V^*}(\alpha))^* = f(d)$, notiamo che può essere interpolata con una regressione lineare con coefficienti di correlazione R^2 dell'ordine del 99% [9]:

$$[(\overline{V^*}(\alpha))^*] = [m(\alpha)] * [d] + [\varepsilon]$$

In cui $[d]$ è la matrice delle distanze angolari degli elettrodi 8×1 e $[\varepsilon]$ rappresenta la matrice degli errori di interpolazione.

I coefficienti angolari $m(\alpha)$, sono solo funzione del grado di vuoto α .

I segnali normalizzati e pesati crescono linearmente all'aumentare della distanza tra gli elettrodi con pendenze crescenti al diminuire del grado di vuoto.

Il grado di vuoto pertanto può essere espresso dalla correlazione sperimentale:

$$\alpha = -62.67 * m + 1.0376 \quad (2)$$

in cui m rappresenta il coefficiente angolare della retta interpolante i segnali degli elettrodi a distanze crescenti.

3.2 Misura del flusso della quantità di moto

Il flusso della quantità di moto rappresenta il prodotto della massa e della velocità valutato per unità di superficie e di tempo: $\rho V^2 [Pa]$.

Per la misura della quantità di moto è stato sviluppato presso la SIET un sistema tipo “drag disk” che impiega come elemento sensibile una cella di carico stagna da 20 kg per applicazione ad alta temperatura[8].

Il sistema è costituito da un disco forato con un diametro di 46 mm disposto al centro della tubazione da 3”. La sezione maestra A_m (area del disco al netto dell’area dei fori) presenta un’area di 707 mm² ed è soggetta ad una forza, esercitata dal fluido che scorre nel condotto, definita dalla relazione:

$$F = C_R \frac{A_m \rho_{TP}}{2} V^2 \quad (3)$$

dove:

C_R : coefficiente di resistenza

A_m : area sezione maestra

ρ_{TP} : massa volumica del fluido

V : velocità media del fluido

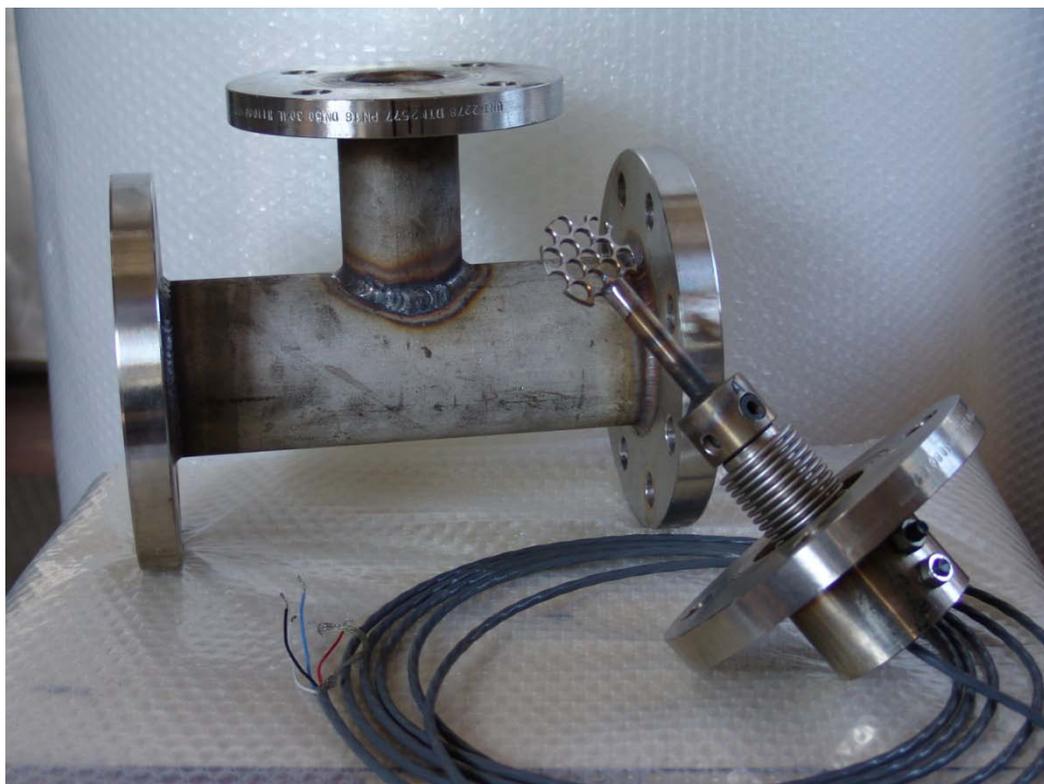


Figura 2: Cella di carico e sezione di prova

La cella di carico è equipaggiata con un sensore costituito da un ponte di wheatstone, per cui il carico applicato si ricava a partire dal segnale registrato dalla cella di carico, con la relazione:

$$M = \frac{V_{OUT}}{2 V_{ALIM}} M_S \quad (4)$$

dove:

V_{OUT} : segnale in uscita in mV

V_{ALIM} : tensione di alimentazione in V

M_S : portata cella di carico ($20 kg$)

il flusso della quantità di moto è pari a:

$$\rho V^2 = K \frac{2Mg}{A_m} \quad (5)$$

in cui:

g : accelerazione di gravità

K : coefficiente di resistenza aerodinamica

Nel PAR precedente sui dispositivi è stato condotto un collaudo a caldo del sensore per verificare il corretto funzionamento dello strumento ad alta pressione e temperatura e la tenuta meccanica del soffiato della cella di carico.

Durante le prove del PAR 2011 riportate nel documento [8] è stato evidenziato un segnale apparente causato probabilmente dal riscaldamento degli estensimetri che strumentano la cella. In quella fase della sperimentazione la velocità del fluido nella fase di pressurizzazione e riscaldamento infatti non è stata tale da dar luogo a spinte dinamiche misurabili.

Nella campagna sperimentale di quest'anno sono state condotte alcune prove preliminari per quantificare il segnale apparente registrato dalla cella di carico durante la pressurizzazione della sezione di prova. In questo modo è stato possibile ricavare il segnale netto dovuto esclusivamente alla pressione cinetica del fluido.

3.3 Misura di velocità

Nel PAR precedente (2011) è stata condotta una indagine di mercato volta ad identificare uno strumento idoneo a misurare le alte velocità del fluido presenti nei transitori incidentali di SPES-3.

I flussimetri a turbina, utilizzati nelle passate campagne sperimentali SPES e i misuratori ad ultrasuoni, presi preliminarmente in considerazione, sono risultati essere inadeguati per limiti sulla massima velocità ammissibile e per problemi di danneggiamento in caso di sovra velocità[8].

Tra gli strumenti commerciali, i misuratori a generazione di vortici sono risultati quelli con il campo di misura più ampio. Infatti, sebbene il vortex non riesca a misurare le velocità massime stimate del fluido (Tabella 1), la velocità della fase vapore massima rilevabile si aggira attorno ai 120 m/s corrispondenti a circa il 30 % del range di variazione atteso. Inoltre, non avendo parti rotanti, lo strumento è più resistente alle sovra velocità che si possono verificare nelle fasi iniziali del transitorio di rottura.

Sulla base di tali valutazioni si è deciso di acquistare un misuratore vortex in modo da completare il set di strumenti che compongono lo spool piece.

Il principio di funzionamento di tale strumento si basa sulla scia di Von Karman. Quando un corpo deflettore viene lambito da un fluido, si formano dei vortici alternati. Questi vortici si formano a causa della presenza del deflettore formando la cosiddetta "scia di Von Karman".

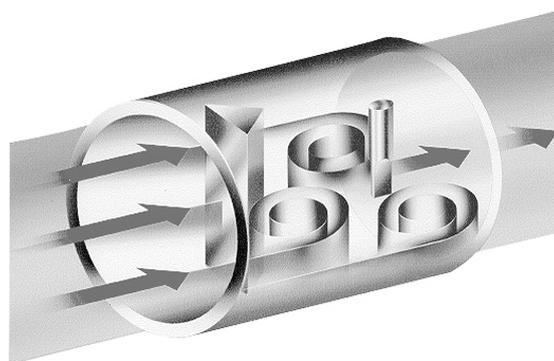


Figura 3: principio di funzionamento del vortex

La frequenza di distacco dei vortici è direttamente proporzionale alla velocità del flusso v e inversamente proporzionale alla larghezza del deflettore d :

$$f = St \frac{v}{d} \quad (6)$$

In cui St rappresenta il *numero di Strouhal*, un numero adimensionale che resta praticamente costante per un vasto intervallo del numero di Reynolds.

La frequenza di distacco dei vortici da misurare dipende solo dalla velocità del flusso e non dalla viscosità del fluido. Le variazioni di pressione locali derivanti dal distacco dei vortici vengono rilevate da un sensore capacitivo e convertite in impulsi elettrici in base alla frequenza di distacco dei vortici.

Dopo aver confrontato diverse offerte si è deciso di acquistare il misuratore a generazione di vortici della Endress+Hauser Prowirl 72 F DN80 per la misura di velocità di vapor saturo.



Figura 4: Installazione drag disk e vortex nella sezione di prova

Il misuratore vortex, mostrato in Figura 4 presenta le seguenti caratteristiche:

Temperatura massima di esercizio: 400°C

Pressione massima di esercizio: 40 bar

Materiale tubazione: *acciaio inox*

Velocità massima rilevabile: $120 \frac{m}{s}$

Lo strumento presenta un errore massimo di misura inferiore all'1% del valore istantaneo per velocità del vapore inferiori allo 0.75% del valore istantaneo misurato e errore di misura massimo inferiore allo 0.75% del valore di fondo scala per velocità comprese tra 75 e 120 m/s.

A seconda delle condizioni di pressione e temperatura variano i range di velocità rilevabili dallo strumento (Figure 5 e 6). I grafici seguenti sono stati ricavati con il programma "Applicator" della Endress+Hauser che

consente di ricavare i valori minimi e massima di frequenza di distacco dei vortici generati, i numero di Reynold e di conseguenza i valori di velocità per una data portata.

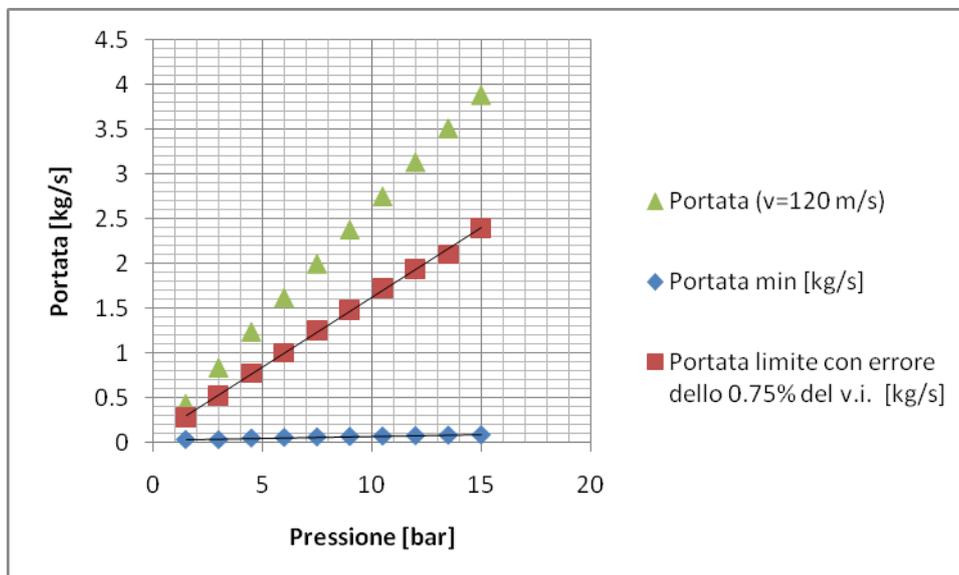


Figura 5: Portata massima e minima di vapore in funzione della pressione assoluta

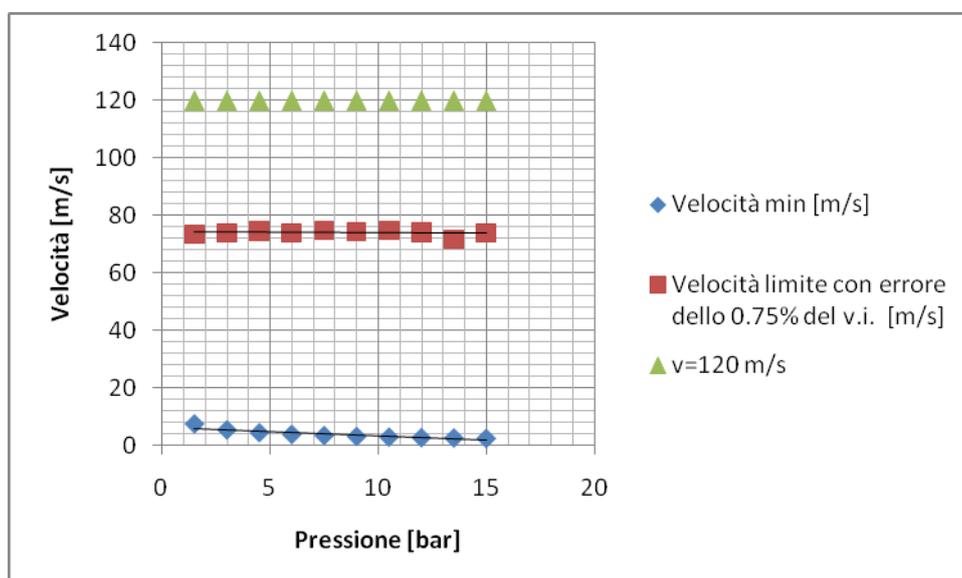


Figura 6: Velocità massima e minima di vapore in funzione della pressione assoluta

4. IMPIANTO SPERIMENTALE DI PROVA

La facility sperimentale utilizzata per effettuare le prove sullo Spool Piece è costituita da un impianto in grado di erogare vapore a portata e titolo controllati, con potenze termiche dell'ordine di alcune centinaia di kW ad una sezione di prova orizzontale in cui è installata la strumentazione speciale e dalle tubazioni di adduzione e scarico del vapore.

4.1 Sezione per la preparazione della miscela bifase

Il vapore utilizzato nella sezione di prova dello Spool Piece è prodotto dall'impianto SIET denominato IETI, in grado di erogare vapore con potenze termiche dell'ordine delle centinaia di kW. Come preriscaldatore è stato utilizzato un impianto di proprietà del Politecnico di Milano già utilizzato negli anni scorsi per simulare le spire elicoidali del reattore IRIS (Figura 7).

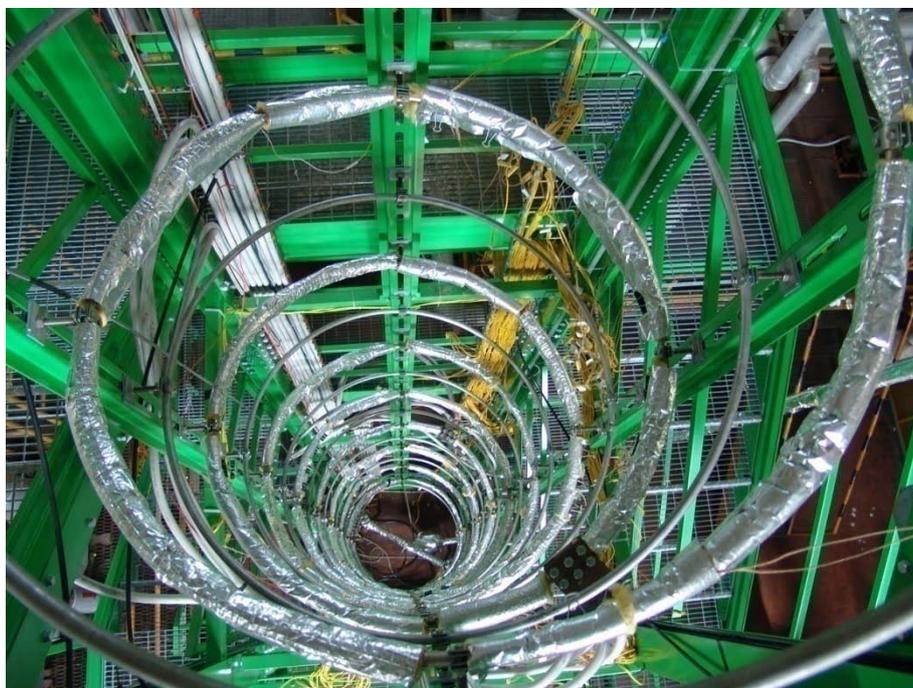


Figura 7: Preriscaldatore POLIMI

Il preriscaldatore è suddiviso in più stadi: il primo stadio è costituito da un tubo a spirale della lunghezza di 12 m con diametro interno di 12.53 mm; il secondo stadio è costituito da 2 spire elicoidali in parallelo lunghe complessivamente 30 m e con diametro interno di 12.53 mm. Per la nostra applicazione è stata utilizzata una sola spira. La produzione di vapore avviene grazie a generatori di corrente continua collegati tramite delle clamp direttamente alle spire elicoidali, che determinano un intenso passaggio di corrente nella parete del tubo realizzato in acciaio inossidabile, la produzione di calore per effetto Joule che avviene nella parete determina il riscaldamento dell'acqua demineralizzata che scorre internamente al tubo fino a determinarne la parziale o totale evaporazione.

Il circuito è alimentato da una pompa volumetrica a pistoni, chiamata *PERONI-3*, con portata massima di $7 \text{ m}^3/\text{h}$ e pressione massima di 260 bar.

La portata di liquido in ingresso al preriscaldatore è misurata attraverso un flussometro ad accelerazione di Coriolis con fondo scala di $1000 \text{ l}/\text{h}$.

Per poter effettuare test con un flusso a velocità superiore rispetto ai test svolti nel precedente PAR, la tubazione di collegamento tra l'uscita del preriscaldatore e l'ingresso della sezione di prova è stata dimensionata in modo da mantenere, in condizioni di massima portata, velocità dell'ordine di 60 m/s

La tubazione di collegamento è da $3/4''$ *schedula* 80 ed è lunga circa 25 m.

4.2 Sezione di prova orizzontale

La sezione orizzontale di prova, mostrata in Figura 8, ha una lunghezza totale di circa 5 m. E' compresa tra due valvole elettropneumatiche a sfera a chiusura rapida che vengono utilizzate per intercettare un volume di controllo. Su tale volume viene effettuata, per pesatura, la misura del grado di vuoto volumetrico medio, della miscela bifase.

La tubazione di collegamento da $3/4''$ è connessa alla sezione di prova tramite una valvola manuale di regolazione *DN* 65. Tra la valvola di regolazione e la prima valvola elettropneumatica si trova un tratto di tubazione da 3" lungo 750 mm che ha lo scopo di uniformare il flusso.

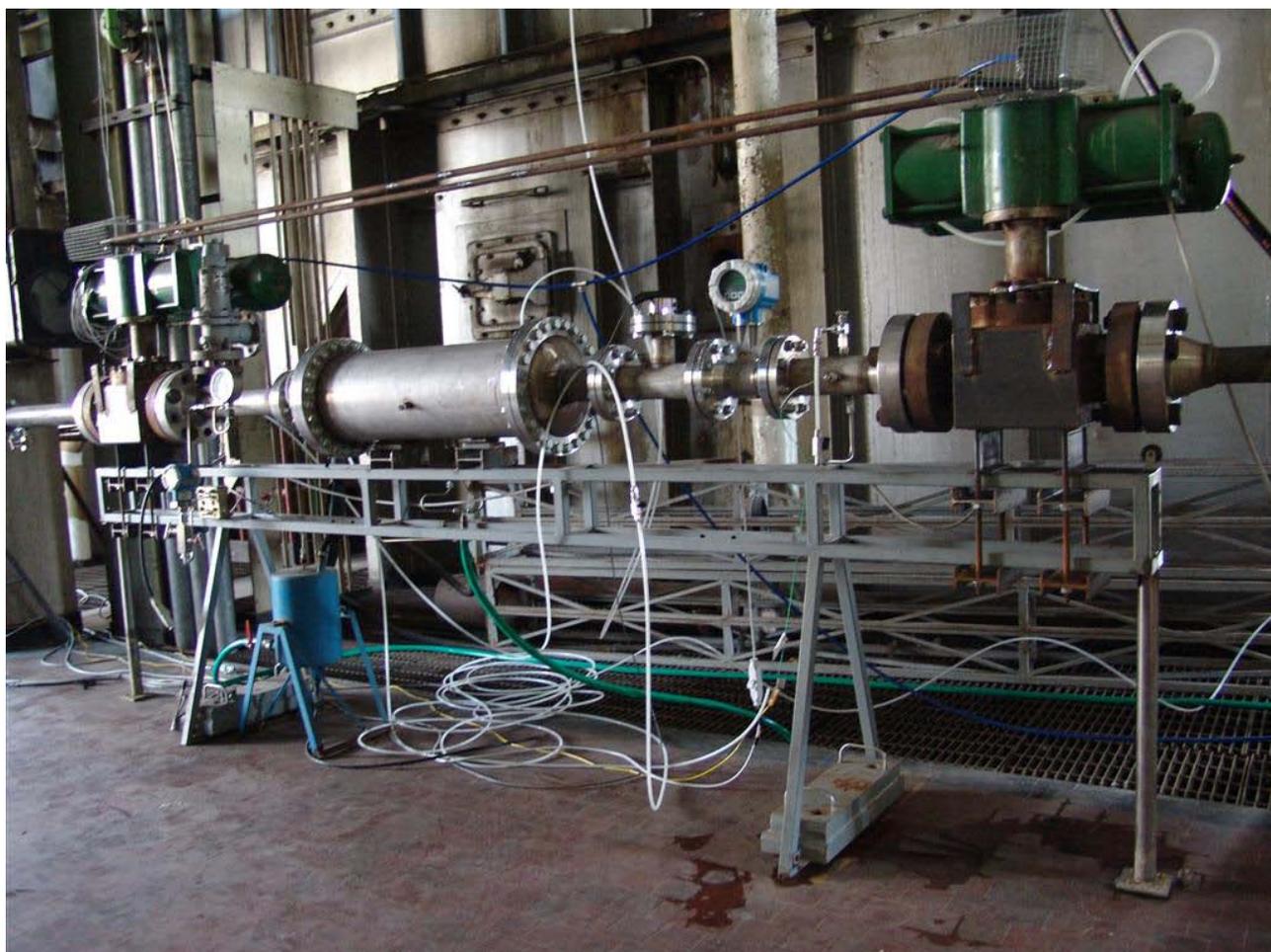


Figura 8: Sezione orizzontale di prova

Tra la flangia della prima elettrovalvola pneumatica e la flangia d'ingresso della sonda capacitiva, in un tratto lungo 630 mm da 3" è presente:

- Un manometro per la misura della pressione interna alla sezione di prova.
- Una termocoppia tipo k per la misura della temperatura del fluido.
- Un misuratore relativo di pressione.
- Un tratto discendente provvisto di valvola manuale e collegato ad un condensatore.

Inoltre, sulla sommità, è presente una valvola di sicurezza con pressione di scatto di 14 *bar* con diametro dell'orifizio di 14 *mm*, in grado di scaricare la massima portata che fluisce nella sezione di prova pari a 0.277 *kg/s*.

La sonda capacitiva si trova al centro della sezione di prova orizzontale all'interno di un contenitore d'acciaio di 1240 *mm* e diametro interno di 267 *mm*. La funzione del contenitore in acciaio è quella di preservare l'incolumità degli operatori nel caso in cui si verifichi una rottura del tubo in pyrex o una perdita di vapore significativa da una delle tenute tra pyrex e acciaio.

All'interno del contenitore in acciaio, tra la sonda e la parete interna del contenitore stesso, sono installati due solenoidi in rame alimentati con acqua fredda per garantire il raffreddamento della zona che contiene i circuiti stampati. Per favorire l'asportazione di calore, l'interno del contenitore è raffreddato con un flusso continuo di aria compressa a circa 6 *bar*.

Sempre all'interno del contenitore, in corrispondenza della basetta inferiore è posizionata una termocoppia per monitorare in tempo reale la temperatura dei reed relè, la cui temperatura massima sopportabile è pari a 70°C.

A valle della sonda capacitiva sono posizionati rispettivamente il drag disk e il vortex. Il disco forato del drag disk, oltre a costituire l'elemento sensibile alla quantità di moto, ha la funzione anche di raddrizzatore di flusso per ottimizzare la misura del vortex.

Un ultimo tratto di 350 *mm*, a valle del vortex, collega la sezione di prova in cui è installato lo spool piece alla elettrovalvola pneumatica di uscita del circuito sperimentale. Su tale tratto, collocata sulla parte superiore del tubo, si trova una valvola di sfiato, che può essere anche utilizzata come presa per l'aria compressa per facilitare la rimozione del fluido intercettato dalle valvole rapide in sede di misura.

L'uscita della sezione di prova è connessa ad una tubazione di scarico tramite un tubo da 2 1/2" intercettato da una valvola manuale di regolazione DN 65 che viene utilizzata per regolare la pressione all'interno della sezione di prova.

L'acqua di alimento dei solenoidi in rame e della serpentina interna al condensatore è fornita da una pompa centrifuga. Il fluido di raffreddamento è convogliato, tramite tubo flessibile, all'interno del condensatore dove incontra, in controcorrente, il vapore drenato dalla sezione di prova. Successivamente si dirama nelle due linee di adduzione, che garantiscono il raffreddamento dell'elettronica della sonda.

4.3 Strumentazione e sistemi d'acquisizione dati

L'impianto sperimentale, oltre agli strumenti appartenenti allo spool piece, presenta altri strumenti necessari per ricavare le informazioni sul flusso di vapore prodotto, sempre con riferimento allo schema strumentato la seguente tabella riassume le principali caratteristiche degli strumenti utilizzati.

Plant code [Ref. Fig. 1]	SIET code	Upper Range Value	Measurement description
P0001	S16577	50 bar	Pressione uscita preriscaldatore
P0002	S14736	20 bar	Pressione sezione di prova
DP0001	S 2653	50 kPa	Pressione differenziale al tubo di pitot
Q0001	S14828	1000 l/h	Portata volumetrica all'uscita della pompa di alimento
TF0001	S16851	250 °C	Temperatura uscita preriscaldatore
TF0001	S15453	250 °C	Temperatura sezione di prova
SAD 1	S3287	-	Sistema acquisizione dati per segnali termoidraulici
SAD 2	S11598	-	Sistema d'acquisizione dati per sonda capacitiva
M0001	CSM 005	5 kg	Bilancia per la misura della massa spillata

5. TITOLO, PORTATA E GRADO DI VUOTO ALL'INGRESSO DELLA SEZIONE DI PROVA

La portata massica bifase all'ingresso della sezione di prova, per la legge di continuità, è pari alla portata di liquido in ingresso al preriscaldatore misurata dal Coriolis Q0001:

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{TP} = \dot{m} \quad (7)$$

Il titolo x è desumibile dal bilancio energetico del preriscaldatore:

$$\dot{m}h_{IN} + P - P_{disp} = \dot{m}xh_V + \dot{m}(1-x)h_L \quad (8)$$

$$x = \frac{\dot{m}(h_{IN}-h_L)+P-P_{disp}}{\dot{m}(h_V-h_L)} \quad (9)$$

dove:

h_{IN} : entalpia del liquido in ingresso al preriscaldatore [kJ/kg].

h_V : entalpia del vapor saturo in ingresso alla sezione di prova [kJ/kg].

h_L : entalpia del liquido saturo in ingresso alla sezione di prova [kJ/kg].

P : potenza elettrica ceduta al preriscaldatore [kW].

P_{disp} : potenza termica persa [kW].

La potenza termica persa lungo la tubazione di collegamento tra l'uscita del preriscaldatore e l'ingresso della sezione di prova è valutata intorno ai 5 kW.

La potenza elettrica ceduta al preriscaldatore è espressa dalla somma dei prodotti tensione corrente delle tre sezioni (una per il primo stadio e due per il secondo stadio) alimentate dai tre generatori di corrente continua G1, G2, G3.

A partire dalla conoscenza del titolo, di pressione e temperatura nella sezione di prova, è possibile ricavare il grado di vuoto con una delle numerose relazioni empiriche che si trovano in letteratura.

Il modello semiempirico scelto è quello di Zuber e Findlay[10]. Tale modello considera sia l'effetto della non uniforme distribuzione radiale delle fasi e quello dello scorrimento locale tra le due fasi. I coefficienti numerici che occorre definire quantitativamente sono ottimizzati per diverse situazioni sperimentali.

Il punto di partenza è la definizione delle velocità superficiali locali come:

$$J_V = \alpha u_V \quad (10)$$

$$J_L = (1 - \alpha)u_L \quad (11)$$

$$J = J_V + J_L = \alpha u_V + (1 - \alpha)u_L \quad (12)$$

Che può essere riscritta come:

$$J_V = \alpha J + \alpha(u_V - J) \quad (13)$$

In cui

α : grado di vuoto medio.

J_V, J_L : velocità superficiali delle fasi liquido e vapore.

u_V, u_L : velocità puntuali delle fasi liquido e vapore.

$(u_V - J)$ rappresenta la *velocità di deriva*. Mediando su tutta la sezione si ottiene:

$$\bar{J}_V = C_0 \bar{\alpha} \bar{J} + V_{VJ} \bar{\alpha} \quad (14)$$

Dove:

$$C_0 = \frac{\bar{\alpha} \bar{J}}{\bar{\alpha} \bar{J}} \quad (15)$$

Il coefficiente C_0 rappresenta l'effetto di una non uniforme distribuzione dei vuoti e delle velocità: se α o J fossero uniformi C_0 sarebbe uguale a 1; nei casi di interesse pratico C_0 è maggiore o minore di 1, rispettivamente nel caso di vapore concentrato nella zona centrale del condotto o vicino alla parete [11].

$$V_{VJ} = \frac{\overline{\alpha(u_V - J)}}{\bar{\alpha}} \quad (16)$$

V_{VJ} rappresenta l'effetto dello scorrimento locale. Tale termine risulta nullo nel caso in cui le due fasi abbiano la stessa velocità in ogni punto del condotto.

Combinando le equazioni precedenti si ricava il grado di vuoto medio sull'intera sezione del condotto:

$$\bar{\alpha} = \frac{x}{C_0 \left[x + \frac{\rho_V}{\rho_L} (1-x) \right] + \frac{\rho_V V_{VJ}}{\dot{m}}} \quad (17)$$

Nel caso di tubi orizzontali *Steiner* (1993) ha ricavato la seguente relazione per il coefficiente C_0 in ottimo accordo con i risultati sperimentali:

$$C_0 = 1 + 0.12(1 - x) \quad (18)$$

Mentre V_{VJ} può essere espresso come:

$$V_{VJ} = 1.18(1 - x) \left[\frac{g\sigma(\rho_L - \rho_V)}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \quad (19)$$

In cui:

g : accelerazione di gravità

σ : tensione superficiale del liquido

Il grado di vuoto medio calcolato per via teorica verrà confrontato con quello misurato dalla sonda capacitiva.

6. MODELLO MATEMATICO PER IL CALCOLO DELLA PORTATA BIFASE

Le grandezze misurate e gli strumenti utilizzati nella sezione di prova dello spool piece sono:

- T : temperatura (Termocoppia tipo K TF0002)
 p : pressione (Trasmittitore relativo di pressione P0002)
 α : grado di vuoto volumetrico (Sonda capacitiva SC0001)
 ρV^2 : flusso della quantità di moto (Drag disk, Tubo di Pitot F0001 e DP0001)
 V_V : velocità della fase vapore (Vortex V0001)

Le principali ipotesi che stanno alla base del modello matematico proposto nel seguito sono:

- le fasi liquido e vapore hanno la stessa temperatura e pressione nella sezione di prova.
- non sono presenti variazioni di grado di vuoto, titolo temperatura e pressione nella sezione di prova.
- il moto del fluido bifase è completamente sviluppato.

Le cinque equazioni utilizzate per calcolare la portata massica bifase sono le seguenti:

$$\rho_{TP} = \alpha \rho_V + (1 - \alpha) \rho_L \quad (20)$$

La densità media della miscela bifase ρ_{TP} è la media pesata secondo il grado di vuoto α delle densità della fase vapore e della fase liquida ρ_V e ρ_L .

ρ_V e ρ_L sono calcolate a partire dalla misura di pressione e temperatura del fluido.

$$V_L = \frac{V_V}{S} \quad (21)$$

La velocità della fase liquida V_L è uguale alla velocità del vapore V_V , misurata dal Vortex, divisa per lo slip factor.

$$(\rho V^2) = \alpha \rho_V V_V^2 + (1 - \alpha) \rho_L V_L^2 = V_L^2 (\alpha \rho_V S^2 + (1 - \alpha) \rho_L) \quad (22)$$

Esplicita la dipendenza del flusso della quantità di moto ρV^2 , misurata con il drag disk o con il tubo di Pitot, da altri parametri termo fluidodinamici.

Sostituendo l'equazione 21 nella 22, l'unica incognita risulta essere lo slip factor S :

$$S = \sqrt{\frac{(1 - \alpha) \rho_L V_V^2}{(\rho V^2) - \alpha V_V^2 \rho_V}} \quad (23)$$

L'equazione fondamentale della termoidraulica da cui si ricava il titolo x .

$$S = \frac{(1-\alpha) \rho_L}{\alpha \rho_V} \frac{x}{(1-x)} \quad (24)$$

La portata massica bifase \dot{m} , può essere ricavata utilizzando due soli strumenti, per esempio, utilizzando il segnale del drag disk e della sonda capacitiva:

$$\dot{m} = A \rho_{TP} (\rho V^2) \quad (25)$$

Si può dimostrare [5] che l'accoppiamento di drag disk e sonda capacitiva non fornisce il valore esatto di portata massica. L'errore è descritto dal coefficiente K_S , dato dalla relazione:

$$K_S = \left((x + (1-x)S) \left(x + \frac{(1-x)}{S} \right) \right) \quad (26)$$

Per ottenere la portata massica bifase esatta è necessario dividere l'eq. 25 per l'eq. 26. Pertanto la portata massica bifase è data dalla relazione:

$$\dot{m} = A \left(\frac{\rho_{TP} (\rho V^2)}{(x + (1-x)S) \left(x + \frac{(1-x)}{S} \right)} \right)^{1/2} \quad (27)$$

7. PROVE STATICHE E SET UP STRUMENTAZIONE SPECIALE

7.1 Sonda capacitiva

Sulla sonda capacitiva sono state condotte preliminarmente alcune prove statiche di livello con la sonda già montata sulla sezione di prova in posizione orizzontale.

Le prove statiche sono servite per verificare la funzionalità dell'elettronica dopo un anno di inattività e hanno consentito di valutare la sensibilità della sonda alle variazioni di livello del liquido all'interno del volume di controllo e la ripetibilità dei segnali elettrici.

Per effettuare le prove statiche, sono state chiuse le due valvole elettropneumatiche in modo da isolare il tratto in cui è contenuta la sonda capacitiva e la sezione di prova è stata riempita gradualmente con dell'acqua fredda demineralizzata.

Dato che la sonda si trovava all'interno del contenitore di sicurezza, per avere una indicazione visiva del livello di liquido all'interno della sonda, un tubo trasparente graduato è stato posizionato in direzione trasversale rispetto all'asse del tubo e collegato idraulicamente mediante un tubo manometrico (Figura 9).



Figura 9: Indicatore graduato di livello per prove statiche

I livelli (da 0 a 8) fanno riferimento alle diverse altezze, espresse in centimetri, alle quali sono state effettuate le misurazioni con la sonda capacitiva. Dato che il diametro interno della tubazione è pari a 8 cm, un livello pari a zero centimetri significa assenza di liquido, mentre per livelli di liquido pari a otto centimetri il volume di controllo è interessato dalla presenza di sola acqua.

I grafici seguenti mostrano rispettivamente il segnale RMS e il segnale normalizzato in funzione del livello di liquido all'interno della sonda per diverse coppie di elettrodi separate da un angolo rispettivamente di 22.5° e 45°.

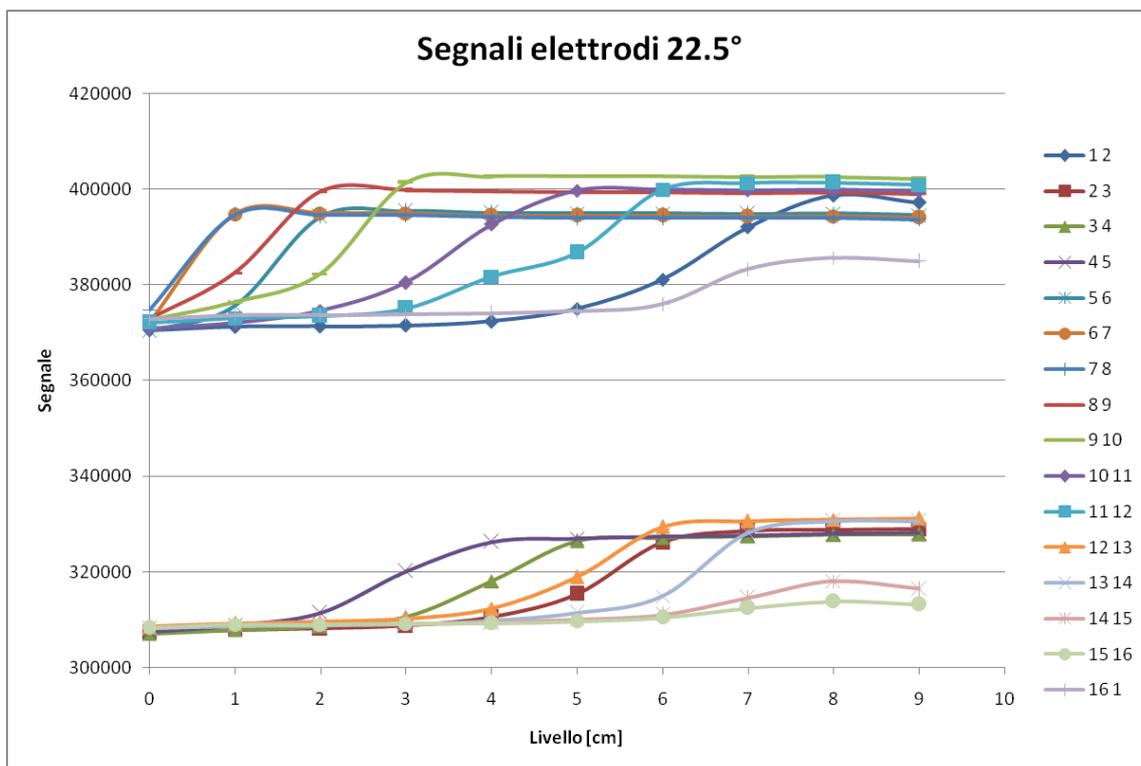


Figura 10: Segnale RMS elettrodi orientati a 22.5° (espresso in microvolt)

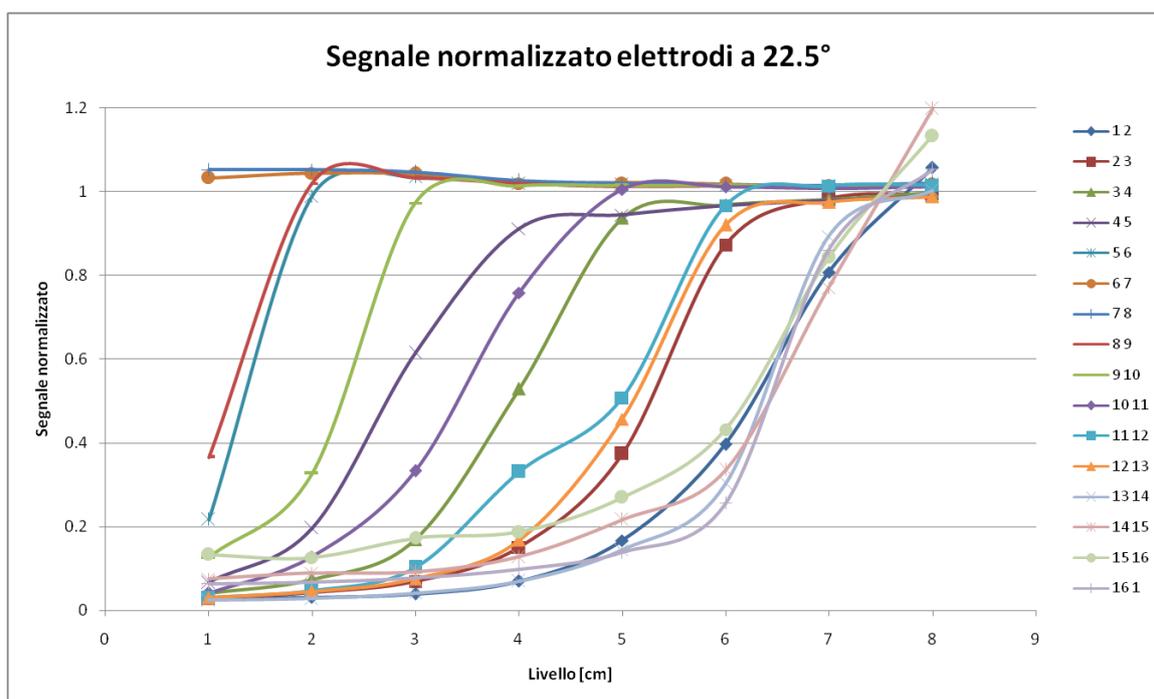


Figura 11: Segnale normalizzato elettrodi orientati a 22.5°

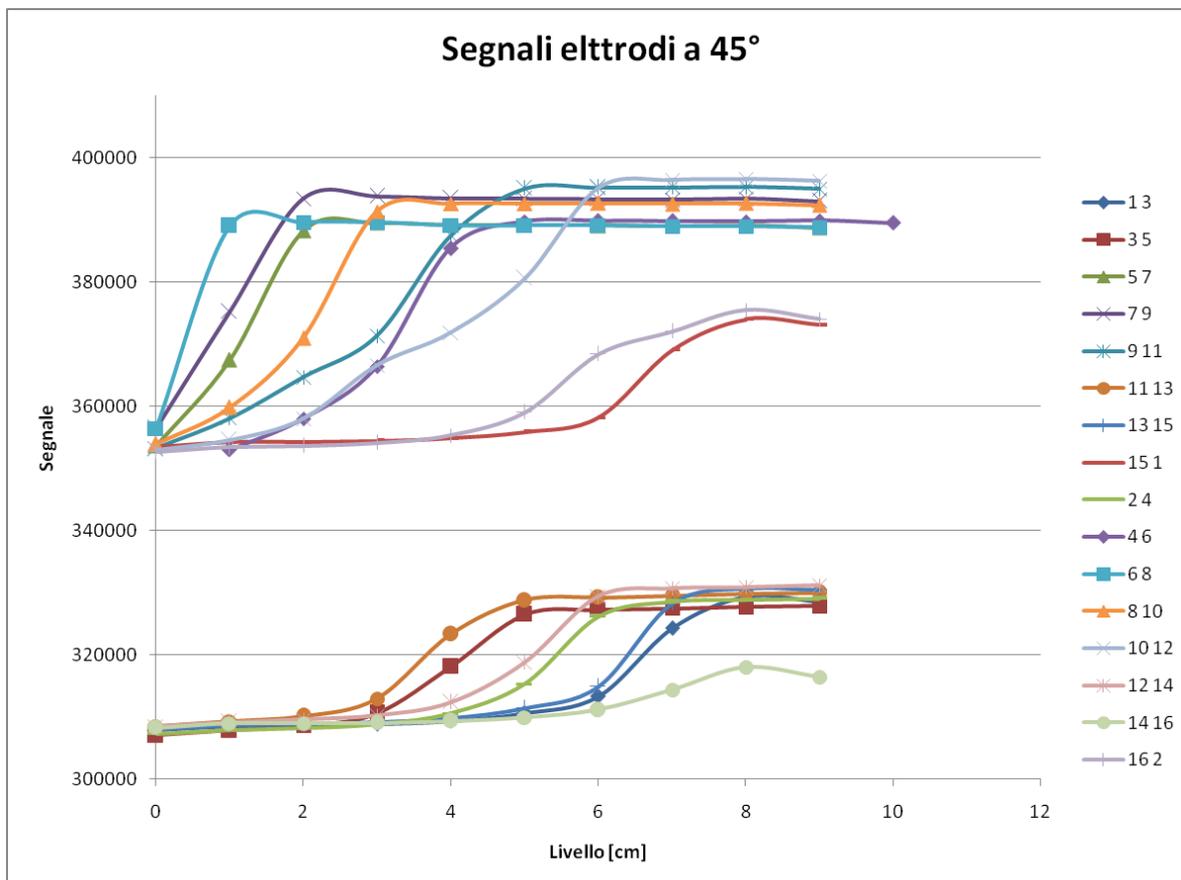


Figura 12: Segnale RMS elettrodi orientati a 45° (espresso in microvolt)

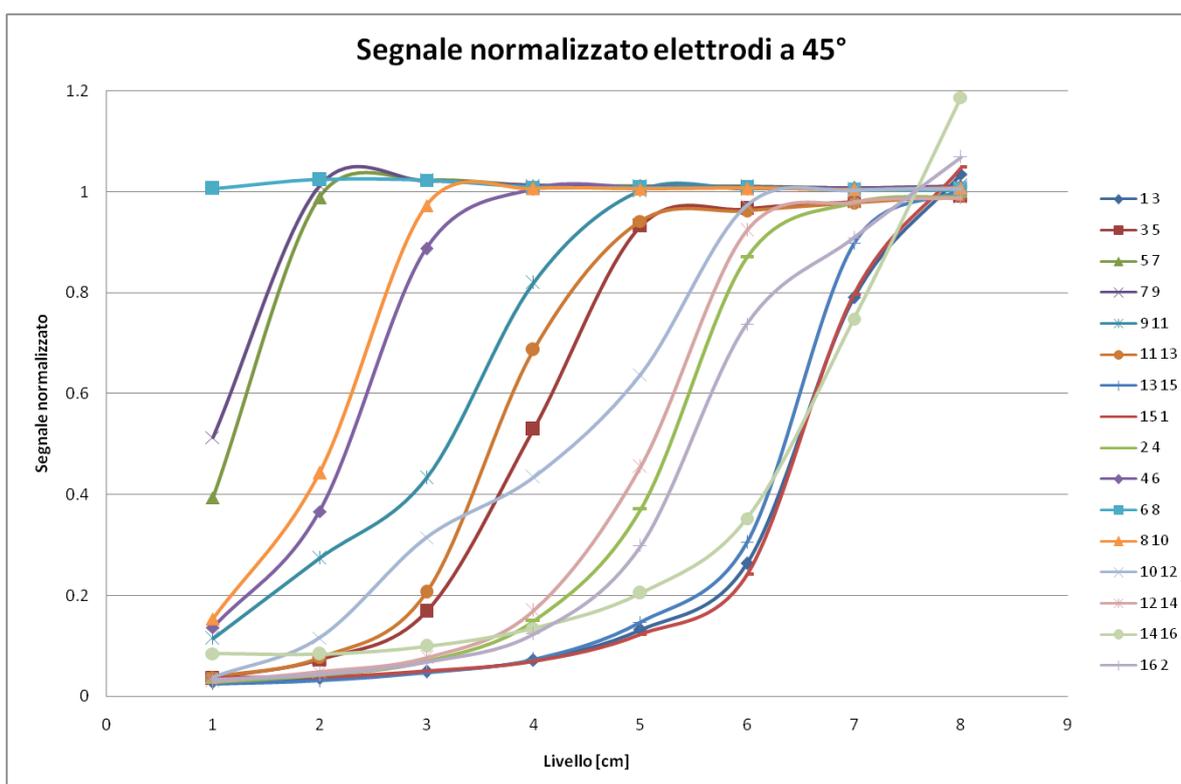


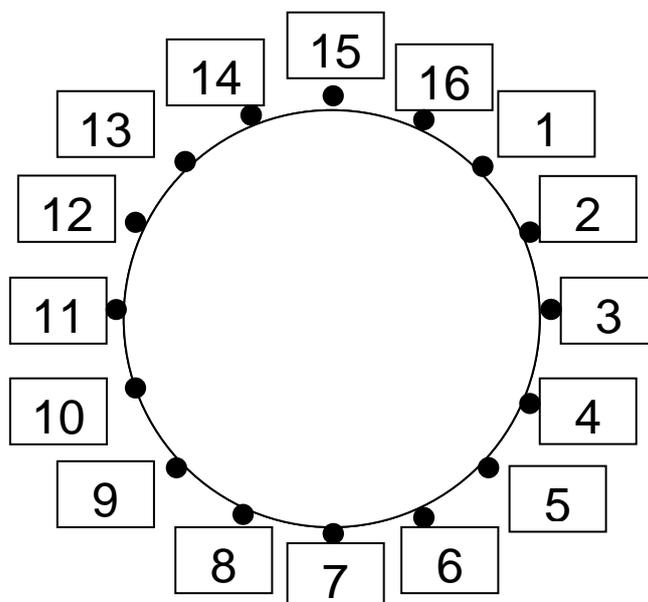
Figura 13: Segnale normalizzato elettrodi orientati a 45°

I segnali riportati nei grafici dei segnali RMS sono la media dei segnali ottenuti in 3 cicli di misura. In leggenda per ogni serie è riportata la coppia di elettrodi utilizzati.

La disposizione degli elettrodi è riportata nella figura in basso. L'elettrodo 7 si trova lungo la generatrice inferiore della sonda, l'elettrodo 15 lungo la generatrice superiore.

Analizzando i grafici, si possono fare alcune osservazioni:

- Per tutte le coppie di elettrodi considerate, il segnale varia in modo monotono, crescente con l'aumento di livello.
- Il valore del segnale di ogni coppia di elettrodi cresce non appena il liquido entra nella zona di influenza della coppia di elettrodi. Quando il liquido si trova ancora lontano dagli elettrodi di misura la derivata del segnale rispetto alla variazione di livello è piccola ma cresce non appena il liquido si trova in prossimità di essi.
- Non appena gli elettrodi coinvolti nella misura si trovano entrambi al di sotto del livello del liquido, il segnale raggiunge un valore di saturazione che mantiene costante anche quando il livello di liquido supera l'altezza degli elettrodi di misura.
- Coerentemente con la disposizione degli elettrodi all'interno della sonda, le coppie di elettrodi che per prime sono interessate dalla presenza di liquido raggiungono immediatamente valori di saturazione (si vedano le coppie 6-7 e 7-8 nelle Figura 10 e 11 e la coppia 6-8 nelle Figure 12 e 13). Viceversa i segnali registrati tra le combinazioni di elettrodi che si trovano in prossimità della generatrice superiore della sonda raggiungono per ultime i valori di soglia (vedi coppie 14-15 e 15-16 nelle Figure 10 e 11 e la coppia 14-16 nelle Figure 12 e 13).



7.2 Drag disk

Sul drag disk sono state condotte alcune prove statiche per verificare il corretto funzionamento della cella di carico dopo le prove a caldo dell'anno scorso.

Il sistema cella di carico – disco forato è stato estratto dalla sezione di prova ed è stato disposto in posizione orizzontale fissandolo su una morsa. La cella di carico è stata alimentata e collegata ad un multimetro per misurare il segnale in uscita ed è stata sottoposta ad un ciclo di carico e scarico utilizzando dei pesi campione.

Nel grafico seguente è mostrato l'andamento del segnale registrato dal multimetro in funzione del carico applicato.

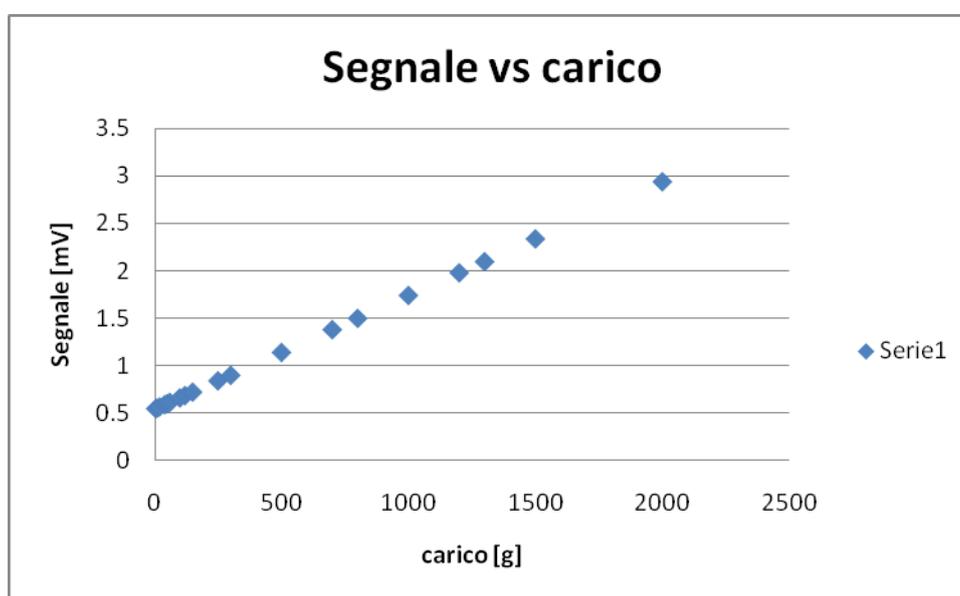


Figura 14: Prove statiche sul drag disk

L'andamento del segnale risulta lineare in funzione del carico e, a carico nullo applicato, presenta un valore di partenza pari a 0.536 mV .

Successivamente sono state condotte alcune prove per quantificare il segnale apparente registrato dalla cella di carico dovuto alla pressurizzazione del circuito. In questo modo è stato possibile ricavare il segnale netto dovuto esclusivamente alla pressione cinetica del fluido.

Per effettuare le prove di pressurizzazione, la sezione di prova è stata isolata chiudendo le elettrovalvole pneumatiche ed è stata pressurizzata gradualmente con aria compressa fino alla pressione di 5.5 bar .

Successivamente il circuito è stato depressurizzato. Il segnale in uscita della cella di carico è stato acquisito sia nella fase di carico sia in quella di scarico.

La variazione di segnale, che teoricamente dovrebbe essere nulla o per lo meno costante, mostra un andamento lineare in funzione della pressione della sezione di prova (Figura 15).

Noto il segnale spurio della cella di carico in funzione della pressione è possibile risalire, durante le prove dinamiche al segnale netto dovuto al flusso della quantità di moto del fluido.

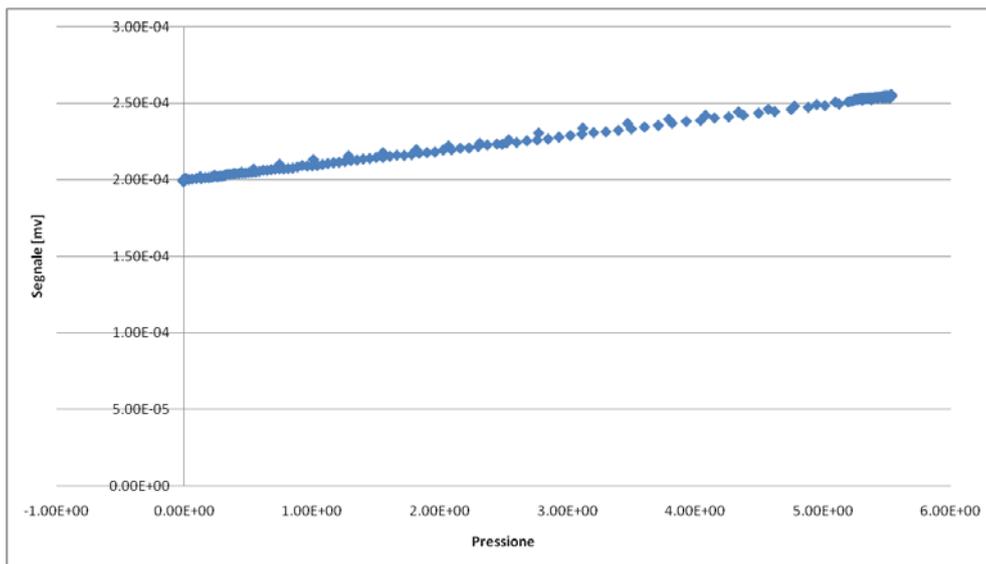


Figura 16: Andamento del segnale in funzione della pressione della sezione di prova

7.3 Vortex

Il vortex, essendo l'unico strumento dello spool piece non realizzato nei laboratori SIET, non ha richiesto particolari operazioni preliminari se non il set up delle impostazioni per la messa in servizio. In allegato è riportato il certificato di taratura della Endress+Hauser.

8. PROVE SPERIMENTALI

Le prove effettuate sulla strumentazione speciale possono essere divise in due campagne sperimentali. Nella prima campagna, lo strumento utilizzato per la misura del flusso della quantità di moto del fluido è costituito dal drag disk. Nella seconda campagna, dati i risultati poco soddisfacenti del drag disk, è stato utilizzato un tubo di Pitot.

8.1 Modalità di conduzione delle prove

La modalità di conduzione delle prove in deflusso bifase è articolata nei seguenti passi:

- 1- Si avvia la pompa *BOOSTER 3e* quindi la pompa *PERONI*, si regola la portata immessa nel circuito attraverso le valvole V114 e V115 e si inizia il flussaggio dell'impianto di prova. Dalla stessa pompa *BOOSTER 3* è derivata l'acqua che alimenta il circuito di raffreddamento all'interno del contenitore della sonda capacitiva.
- 2- Si eroga potenza dai generatori G1, G2, G3 fino a raggiungere il valore desiderato.
- 3- Per i test a pressione maggiore della pressione atmosferica si regola l'apertura della valvola V204.
- 4- Si regolano accuratamente potenza e portata in modo da mantenere costanti pressione e temperatura nel circuito.
- 5- Quando l'impianto è in condizioni stazionarie, si avvia l'acquisizione delle grandezze d'interesse (portata di liquido in ingresso, pressione e temperatura del fluido nella sezione di prova, segnale in uscita e alimentazione della cella di carico, segnale del trasmettitore differenziale di pressione collegato al tubo di pitot, segnale del vortex, temperatura dell'elettronica, tensione e corrente nei tre stadi del preriscaldatore).
- 6- Dalla conoscenza delle condizioni del fluido in uscita dal preriscaldatore e nella sezione orizzontale di prova si calcola titolo e grado di vuoto teorico nella sezione di prova.
- 7- Vengono effettuati 3 cicli di acquisizione con la sonda capacitiva per ciascun punto sperimentale a condizioni note.
- 8- Nei punti in cui è prevista la misura di grado di vuoto per pesata si chiudono le valvole rapide intercettando un volume di controllo e contemporaneamente di ferma la pompa *PERONI* ed i gruppi di potenza G1, G2 e G3. Il fluido bifase viene fatto passare all'interno di un condensatore, viene raccolto all'interno di un contenitore a tara nota e pesato con una bilancia da laboratorio.
- 9- Si riaprono le valvole rapide e si riparte dal punto 1.

8.2 Matrice sperimentale

Le condizioni termoidrauliche che caratterizzano i punti sperimentali sono riportati all'interno di una matrice tridimensionale portata -titolo -pressione i cui limiti sono riportati in tabella 2.

Un primo gruppo di punti sperimentali è stato realizzato con i seguenti strumenti :Vortex, Sonda capacitiva e Drag disk, tali punti sono riportati in tabella 3. Successivamente, per avere una misura più affidabile della spinta dovuta al flusso di quantità di moto, è stato installato un tubo di Pitot, e sono stati realizzati i punti sperimentali riportati in tabella 6.

Grandezza		Min	Max
Portata	[kg/s]	0.132	0.235
Titolo	[%]	70	100
Pressione	[bar]	1	4

Tabella 2: Limiti della matrice sperimentale

8.3 Prove sperimentali con Spool piece composta da Vortex, Sonda capacitiva e Drag disk

Prova	T(in) [°C]	p(in) [bar]	Portata [kg/s]	p sonda [bar]	Titolo [adim]	Segnale vortex [V]	DD netto [kg]	GdV sperim [adim]
94	167.1	39.3	0.234	1.3	0.7304	3.25	0.087	0.980
86	167.7	42.4	0.234	1.31	0.8079	3.44	0.122	0.995
90	165.2	41.3	0.236	1.31	0.7592	3.3	0.216	1.016
78	164.9	44.7	0.235	1.32	0.8754	3.6	0.142	1.005
71	163.9	46	0.236	1.33	0.9459	3.82	0.172	1.003
82	166.3	45	0.235	1.33	0.8399	3.52	0.207	1.011
74	165	46.2	0.234	1.35	0.9166	3.7	0.237	1.020
68	163	47.2	0.236	1.37	0.9815	3.88	0.267	1.000
83	165.6	44.2	0.235	2.2	0.8249	2.5	0.208	0.983
69	162.5	46.7	0.236	2.21	0.9702	2.72	0.241	1.007
79	165.8	44.7	0.235	2.23	0.8638	2.5	0.158	0.985
72	164	45.6	0.236	2.25	0.9340	2.62	0.178	0.987
75	164.9	45.6	0.235	2.26	0.9005	2.56	0.218	0.987
87	185.5	34.7	0.234	2.26	0.8278	2.36	0.148	0.972
91	166.5	41.15	0.236	2.34	0.7442	2.1	0.210	0.976
95	167.8	39.3	0.234	2.4	0.7125	1.97	0.132	0.964
70	163.6	45.65	0.236	3	0.9654	2.26	0.205	0.987
73	164.5	45.5	0.236	3	0.9281	2.2	0.197	0.955
76	166	45.5	0.235	3	0.8954	2.18	0.200	0.968
80	166.3	44.9	0.234	3	0.8600	2.13	0.188	0.966
84	166.1	44.2	0.235	3	0.8169	2.1	0.207	0.964
92	166.5	41	0.236	3	0.7361	1.72	0.205	0.956
88	166.1	42.5	0.236	3.1	0.7735	1.98	0.175	0.954
96	167.9	39.3	0.233	3.10	0.7067	1.6	0.157	0.948

Tabella 3: Prima campagna sperimentale di prove (foglio 1 di 2)

Prova	T(in) [°C]	p(in) [bar]	Portata [kg/s]	p sonda [bar]	Titolo [adim]	Segnale vortex [V]	DD netto [kg]	GdV sperim [adim]
77	165.8	45.5	0.235	4	0.8873	1.88	0.188	0.948
81	166.8	45.1	0.233	4	0.8564	1.85	0.174	0.938
85	167.3	44.1	0.234	4	0.8138	1.8	0.171	0.946
89	166.4	42.5	0.236	4	0.7658	1.73	0.167	0.937
93	166.4	40.8	0.235	4	0.7289	1.4	0.162	0.939
97	167.9	39.3	0.234	4.10	0.6938	1.32	0.167	0.934
65	164.2	32	0.184	1.18	0.7371	2.1	0.118	1.005
59	164.6	34.5	0.184	1.2	0.8343	2.36	0.100	0.999
62	165.8	34.6	0.183	1.2	0.7919	2.1	0.132	1.004
53	166.1	36.85	0.182	1.22	0.9918	3.2	0.173	0.999
47	165.5	38.1	0.183	1.24	1.0831	3.4	0.188	1.032
56	165.2	37.9	0.183	1.24	0.9118	2.45	0.170	1.006
50	165	36.8	0.183	1.25	1.0331	3.35	0.188	1.005
57	165	37	0.183	2.2	0.8975	1.88	0.186	0.981
48	166	38	0.182	2.22	1.0793	1.88	0.193	1.000
51	165.8	36.8	0.183	2.23	1.0234	1.75	0.168	1.011
66	164.7	32.1	0.184	2.23	0.7185	1.29	0.154	0.977
63	164	34.1	0.185	2.24	0.7629	1.43	0.161	0.981
54	167	37	0.182	2.25	0.9807	1.63	0.173	0.976
60	165	34.5	0.183	2.3	0.8215	1.6	0.147	0.978
58	163.7	36.6	0.184	2.96	0.8828	1.58	0.183	0.966
49	166	37.8	0.183	3	1.0684	1.43	0.187	0.993
52	166.1	36.85	0.182	3	1.0233	1.34	0.175	1.001
55	167	37	0.182	3	0.9743	1.27	0.172	0.961
61	165	34.5	0.183	3	0.8137	1.4	0.152	0.962
64	164	34	0.185	3	0.7536	1.2	0.162	0.968
67	165.5	32.2	0.183	3	0.7136	1.11	0.166	0.963

Tabella 4: Prima campagna sperimentale di prove (foglio 2 di 2)

Le colonne della matrice sperimentale di tabella 3 riportano rispettivamente:

- Il numero associato alla prova.
- La temperatura del fluido in ingresso al preriscaldatore.
- La pressione in ingresso al preriscaldatore.
- La portata del fluido misurata con il Coriolis.
- La pressione nella sezione di prova.
- Il titolo di vapore in ingresso alla sezione di prova calcolato con l' Eq. (9).
- Il segnale d'uscita del vortex in *Volt*.
- Il segnale in uscita della cella di carico depurata dell'errore dovuto alla pressione in *mV*.
- Il grado di vuoto misurato con la sonda capacitiva ed elaborato con l'Eq (2).

Le condizioni di pressione[bar], portata [kg/s] e titolo sono riassunte nei grafici seguenti, che esprimono pressioni e titoli effettivamente realizzati per i diversi valori della portata totale fluente nella sezione di prova.

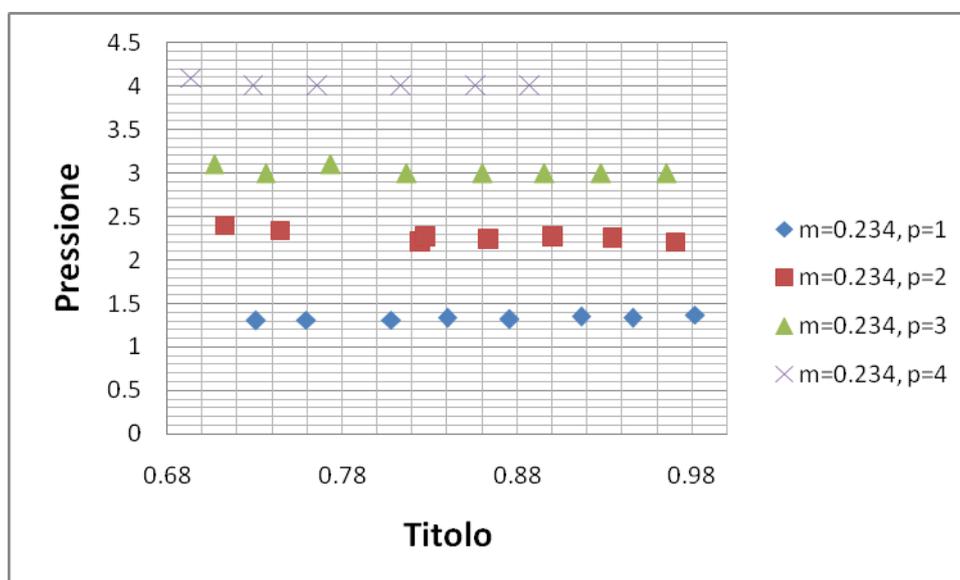


Figura 17: matrice di prove pressione [bar] vs titolo (per portata $m=0.234$ [kg/s])

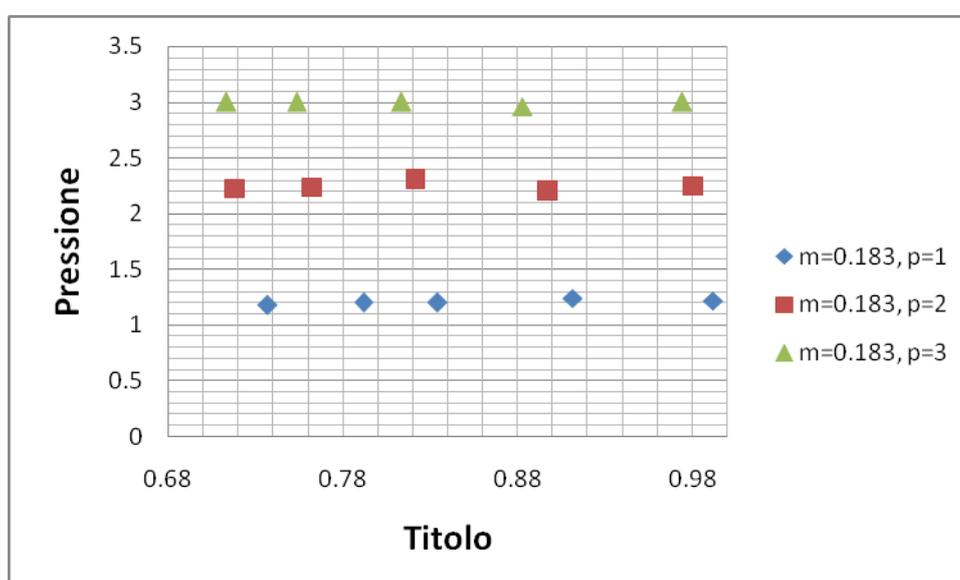


Figura 18: matrice di prove pressione [bar] vs titolo (per portata $m=0.183$ [kg/s])

8.3.1 Analisi dati

Vortex

Analizzando i punti sperimentali ad alta portata ($\dot{m} = 0.234 \text{ [kg/s]}$), il segnale del vortex risulta correttamente proporzionale alla velocità della fase vapore. La velocità della fase vapore viene calcolata come segue:

$$V_V = \frac{x\dot{m}}{A\rho_V} \quad (28)$$

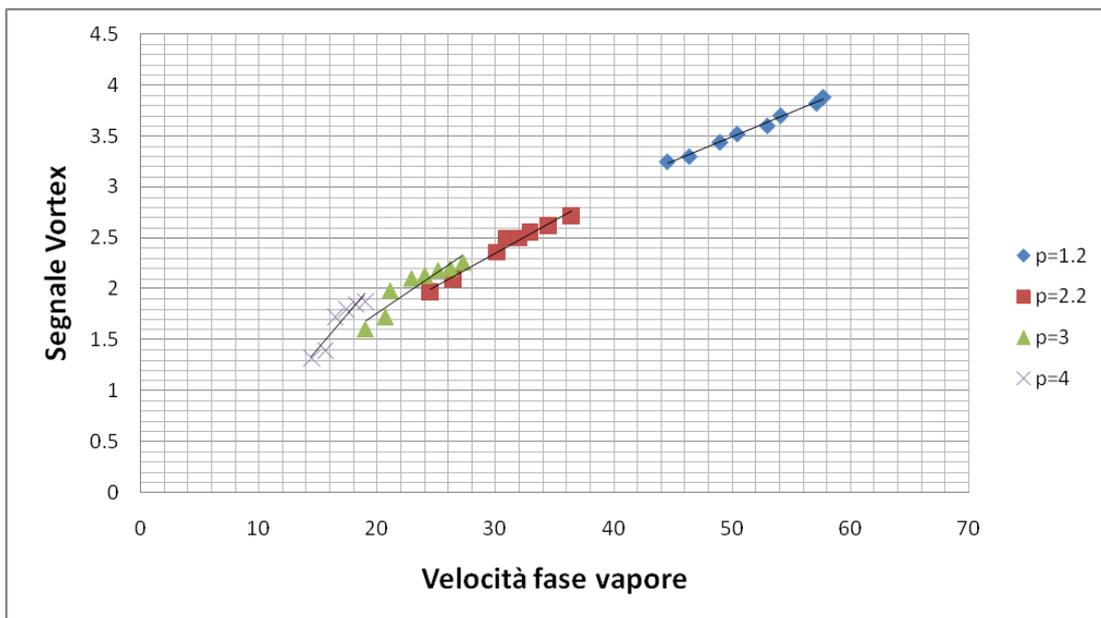


Figura 19: Segnale Vortex (Volt) vs Velocità vapore (m/s) a pressione [bar] crescente

Le velocità più alte della fase vapore si hanno quando il fluido nella sezione di prova è caratterizzato da pressioni più basse come si evince dalla Figura 19.

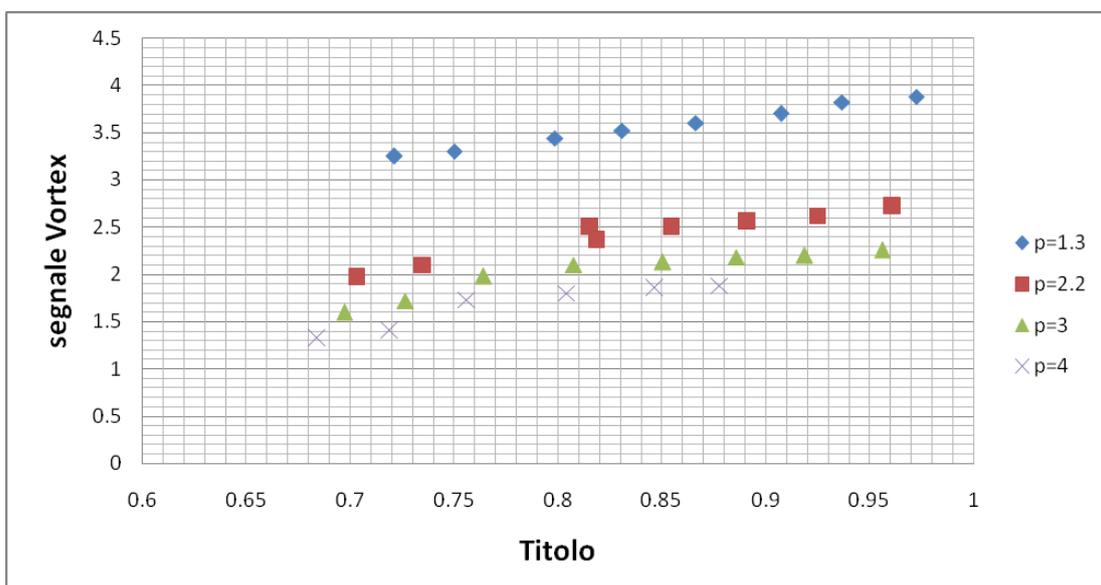


Figura 20: Segnale Vortex (Volt) vs Titolo di vapore a pressione [bar] crescente

Il Vortex è sensibile alla portata di vapore, infatti a parità di portata e di pressione nella sezione di prova, il segnale aumenta al crescere del titolo (Figura 20).

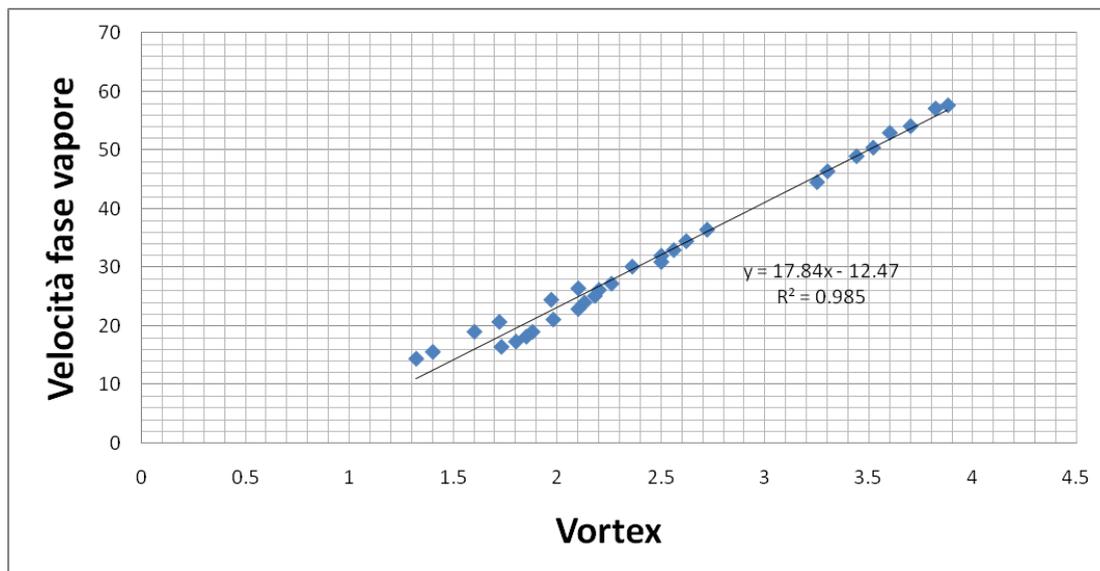


Figura 21: Correlazione tra Velocità fase vapore (m/s) vs segnale del vortex (Volt)

Le velocità rilevate con il vortex sono in ottimo accordo con le velocità teoriche della fase vapore (Figura 21). Il grafico in Figura 20 consente di ricavare una correlazione sperimentale tra segnale d'uscita in Volt del vortex e le velocità della fase vapore.

I risultati ottenuti con il Vortex sono soddisfacenti e ci consentono di avere una misura accurata della velocità di vapore.

Sonda Capacitiva

I grafici seguenti mostrano l'andamento del segnale normalizzato e pesato, utilizzando le equazioni (1) e (2), in funzione della distanza tra gli elettrodi di misura in *mm*.
I grafici fanno riferimento a pressioni nella sezione di prova crescenti.

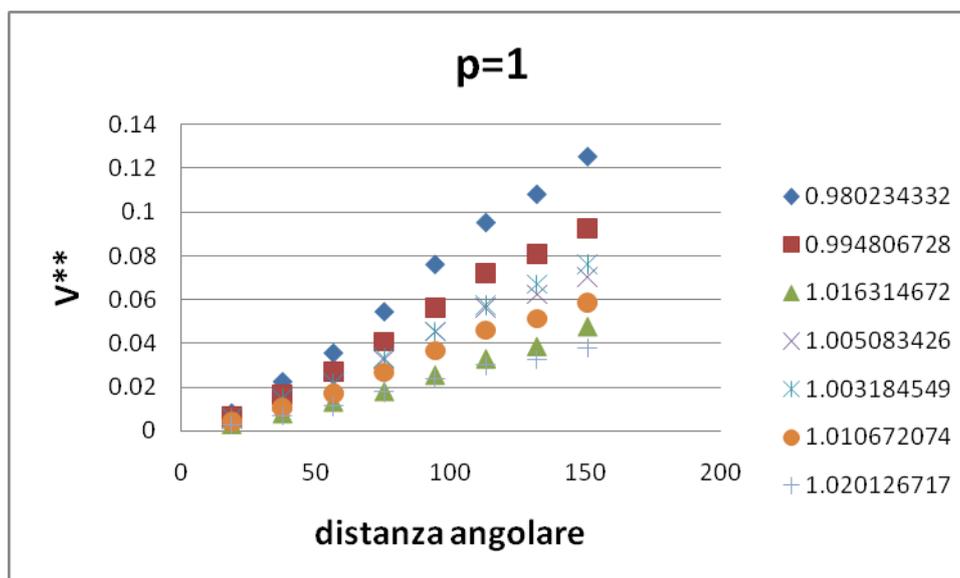


Figura 22: Segnale normalizzato sonda capacitiva in funzione della distanza tra gli elettrodi in *mm* (prove a $p=1$ bar). Ogni colore si riferisce ad uno specifico grado di vuoto.

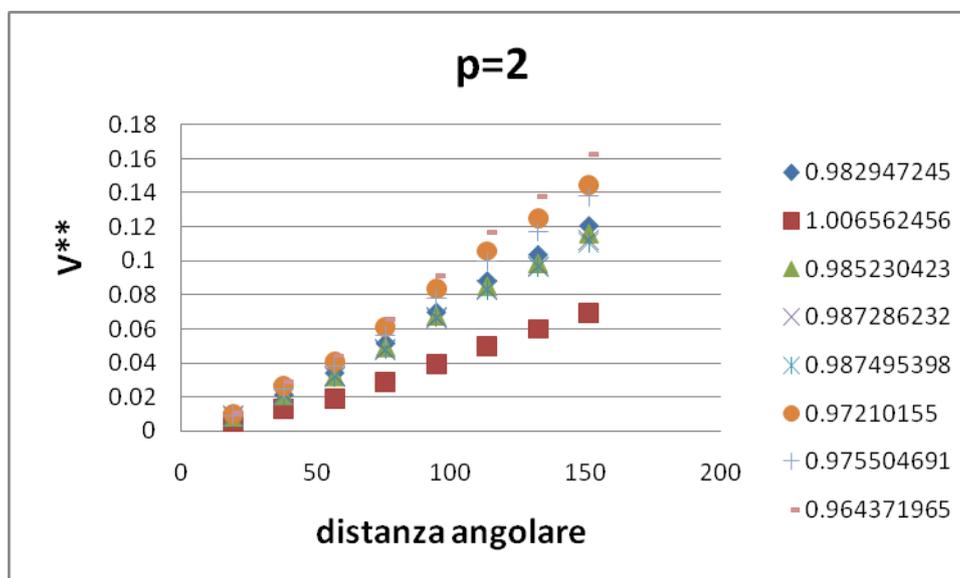


Figura 23: Segnale normalizzato sonda capacitiva in funzione della distanza tra gli elettrodi in *mm* (prove a $p=2$ bar). Ogni colore si riferisce ad uno specifico grado di vuoto.

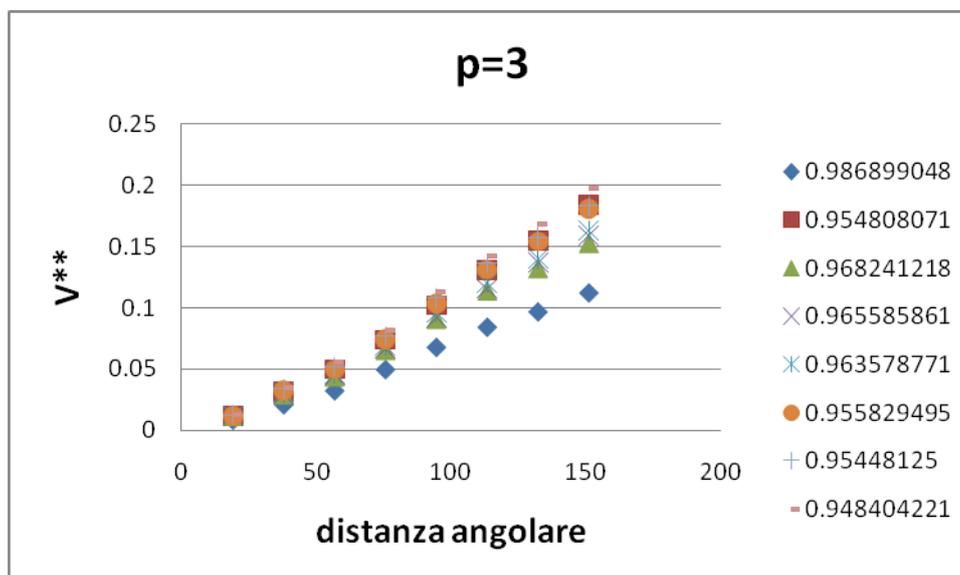


Figura 24: Segnale normalizzato sonda capacitiva in funzione della distanza tra gli elettrodi in *mm* (prove a $p=3$ bar). Ogni colore si riferisce ad uno specifico grado di vuoto.

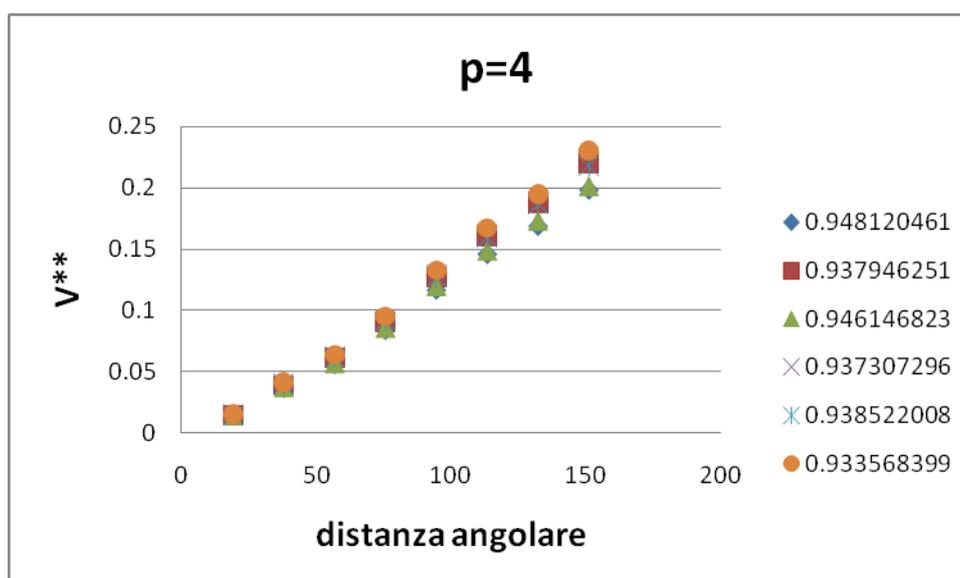


Figura 25: Segnale normalizzato sonda capacitiva in funzione della distanza tra gli elettrodi in *mm* (prove a $p=4$ bar). Ogni colore si riferisce ad uno specifico grado di vuoto.

I segnali normalizzati e pesati crescono linearmente all'aumentare della distanza tra gli elettrodi con pendenze crescenti al diminuire del grado di vuoto.

Il grado di vuoto, funzione del coefficiente angolare della retta interpolante i segnali in funzione della distanza tra gli elettrodi, è calcolato con l'equazione (2).

L'errore medio percentuale sulla stima del grado di vuoto risulta essere inferiore al 2% come riportato in Tabella 4. Il grado di vuoto medio teorico è calcolato con la (17) in funzione di titolo, pressione, temperatura e portata nella sezione di prova.

Prova	titolo	GdV sp	GdV teo	Errore %
94	0.721	0.980	0.966	1.446
86	0.799	0.995	0.975	1.979
90	0.750	1.016	0.970	4.807
78	0.866	1.005	0.984	2.180
71	0.937	1.003	0.992	1.105
82	0.831	1.011	0.979	3.199
74	0.907	1.020	0.989	3.186
68	0.972	1.000	0.997	0.342
83	0.816	0.983	0.977	0.606
69	0.961	1.007	0.995	1.153
79	0.854	0.985	0.982	0.350
72	0.925	0.987	0.991	-0.329
75	0.891	0.987	0.986	0.118
87	0.819	0.972	0.977	-0.527
91	0.735	0.976	0.967	0.901
95	0.703	0.964	0.963	0.172
70	0.956	0.987	0.994	-0.749
73	0.919	0.955	0.990	-3.511
76	0.886	0.968	0.985	-1.736
80	0.851	0.966	0.981	-1.551
84	0.808	0.964	0.975	-1.198
92	0.727	0.956	0.965	-0.939
88	0.764	0.954	0.970	-1.557
96	0.697	0.948	0.961	-1.295
77	0.878	0.948	0.984	-3.629
81	0.847	0.938	0.980	-4.260
85	0.804	0.946	0.974	-2.862
89	0.756	0.937	0.968	-3.132
93	0.719	0.939	0.963	-2.501
97	0.684	0.934	0.958	-2.515

Tabella 5: Errore percentuale sulla misura del Grado di vuoto

Il grafico 26 riporta il confronto tra il grado di vuoto medio misurato con la sonda capacitiva e il grado di vuoto medio teorico in funzione del titolo di vapore.

Il grafico 27 invece, oltre a riportare l'andamento del grado di vuoto teorico e sperimentale in funzione del titolo, evidenzia la pressione della sezione di prova alla quale si riferisce il punto sperimentale.

I punti che meglio approssimano l'andamento del grado di vuoto teorico sono quelli a pressione intermedie (2 e 3 bar), I punti a 1 e 4 bar presentano un errore sistematico rispettivamente positivo e negativo rispetto al valore teorico di grado di vuoto medio.

In ogni caso anche per la sonda capacitiva l'errore risulta essere molto contenuto.

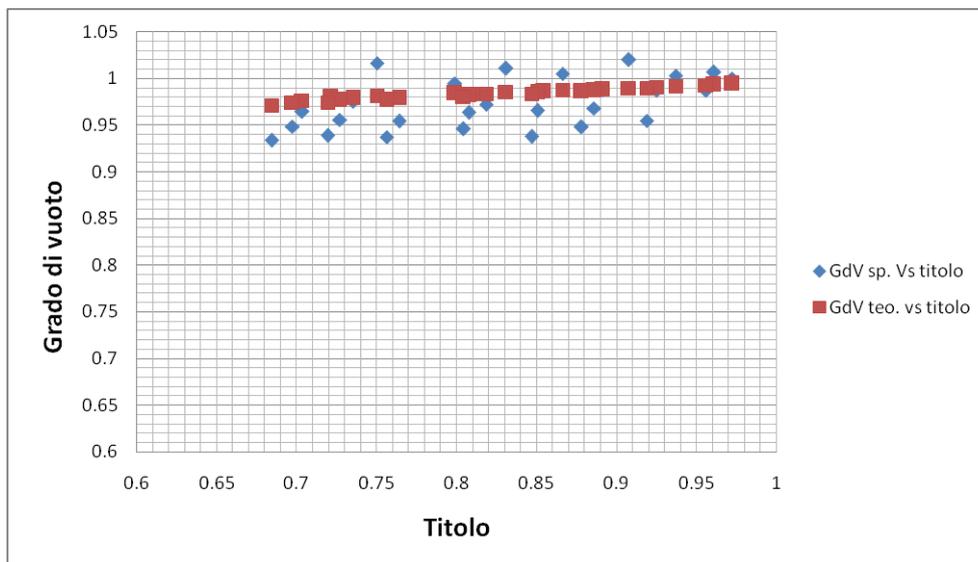


Figura 26: Confronto tra Grado di vuoto sperimentale e teorico vs Titolo

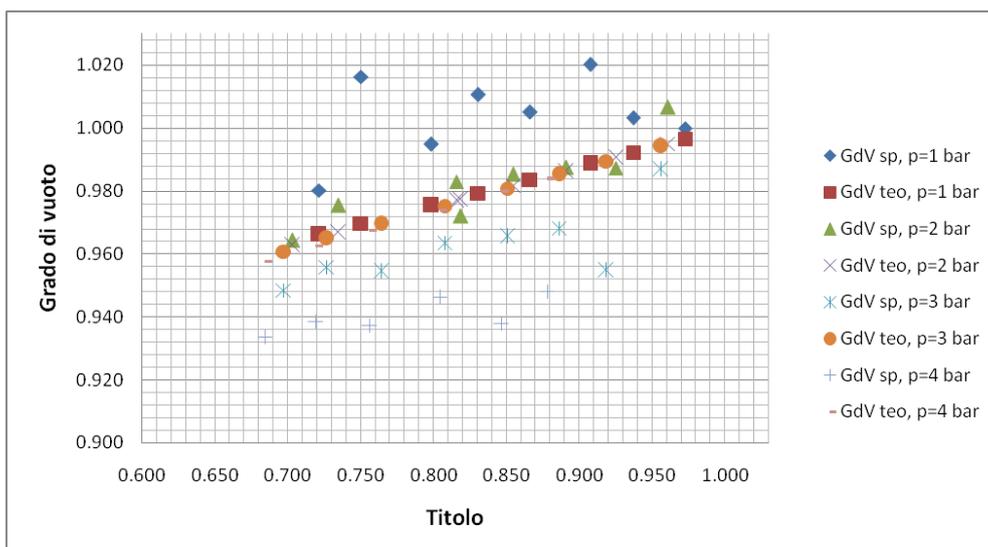


Figura 27: Confronto tra Grado di vuoto sperimentale e teorico vs Titolo per le diverse pressioni [bar] della sezione di prova

Drag disk

La seguente tabella riporta, per ogni prova, oltre alle principali grandezze termoidrauliche d'interesse, il confronto tra la spinta del fluido espressa in Kg misurata dalla cella di carico del Drag disk e il flusso della quantità di moto teorico.

Prova	Portata [kg/s]	P sonda [bar]	Titolo [-]	Forza DDt [kg]	Momento teorico [Pa]
94	0.234	1.3	0.730	0.07	1539.96
86	0.234	1.31	0.808	0.10	1823.26
90	0.236	1.31	0.759	0.18	1672.50
78	0.235	1.32	0.875	0.12	2189.25
71	0.236	1.33	0.946	0.14	2559.60
82	0.235	1.33	0.840	0.17	2001.00
74	0.234	1.35	0.917	0.20	2330.27
68	0.236	1.37	0.981	0.22	2680.41
83	0.235	2.2	0.825	0.17	1256.84
69	0.236	2.21	0.970	0.20	1674.14
79	0.235	2.23	0.864	0.13	1274.31
72	0.236	2.25	0.934	0.15	1462.54
75	0.235	2.26	0.901	0.18	1379.69
87	0.234	2.26	0.828	0.12	1082.73
91	0.236	2.34	0.744	0.17	802.20
95	0.234	2.4	0.713	0.11	668.19
70	0.236	3	0.965	0.17	1263.66
73	0.236	3	0.928	0.16	1130.45
76	0.235	3	0.895	0.17	1116.58
80	0.234	3	0.860	0.16	1040.20
84	0.235	3	0.817	0.17	996.00
92	0.236	3	0.736	0.17	526.07
88	0.236	3.1	0.773	0.15	851.39
96	0.233	3.10	0.707	0.13	419.55
77	0.235	4	0.887	0.16	910.85
81	0.233	4	0.856	0.14	856.15
85	0.234	4	0.814	0.14	791.14
89	0.236	4	0.766	0.14	688.03
93	0.235	4	0.729	0.13	319.02
97	0.234	4.10	0.694	0.14	255.30
65	0.184	1.18	0.737	0.10	1056.59
59	0.184	1.2	0.834	0.08	635.38
62	0.183	1.2	0.792	0.11	1187.47
53	0.182	1.22	0.992	0.14	1413.36
47	0.183	1.24	1.083	0.16	1836.55
56	0.183	1.24	0.912	0.14	1526.87
50	0.183	1.25	1.033	0.16	1822.80
57	0.183	2.2	0.898	0.15	538.22
48	0.182	2.22	1.079	0.16	1053.33
51	0.183	2.23	1.023	0.14	1060.47
66	0.184	2.23	0.718	0.13	136.93
63	0.185	2.24	0.763	0.13	210.91
54	0.182	2.25	0.981	0.14	339.56
60	0.183	2.3	0.821	0.12	326.06
58	0.184	2.96	0.883	0.15	389.34
49	0.183	3	1.068	0.16	278.93
52	0.182	3	1.023	0.15	794.36
55	0.182	3	0.974	0.14	164.65
61	0.183	3	0.814	0.13	249.00
64	0.185	3	0.754	0.13	128.31
67	0.183	3	0.714	0.14	86.16

Tabella 6: Spinta misurata dal drag disk vs Flusso della quantità di moto teorico

La spinta è calcolata a partire dal segnale della cella di carico attraverso l'equazione (4) depurato dalla componente spuria dovuta alla pressurizzazione del circuito.

Il segnale efficace del drag disk risulta, per i bassi flussi della quantità di moto generati, dell'ordine dell'1% del fondo scala dello strumento (20 kg).

Il Drag disk realizzato presso i laboratori SIET, in effetti, era stato concepito per coprire anche i picchi di flusso di quantità di moto previsti nei transitori incidentali di SPES-3, che possono raggiungere valori anche di due ordini di grandezze superiore ai valori raggiunti durante le prove sperimentali.

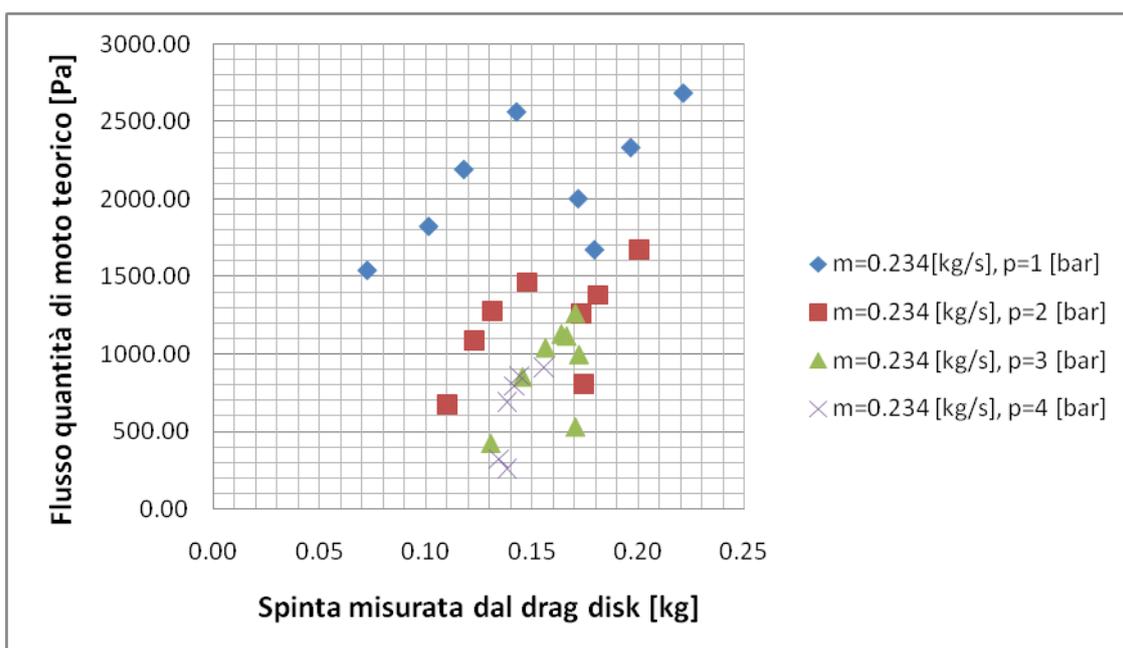


Figura 28: Flusso della quantità di moto teorico vs Spinta misurata dal Drag disk

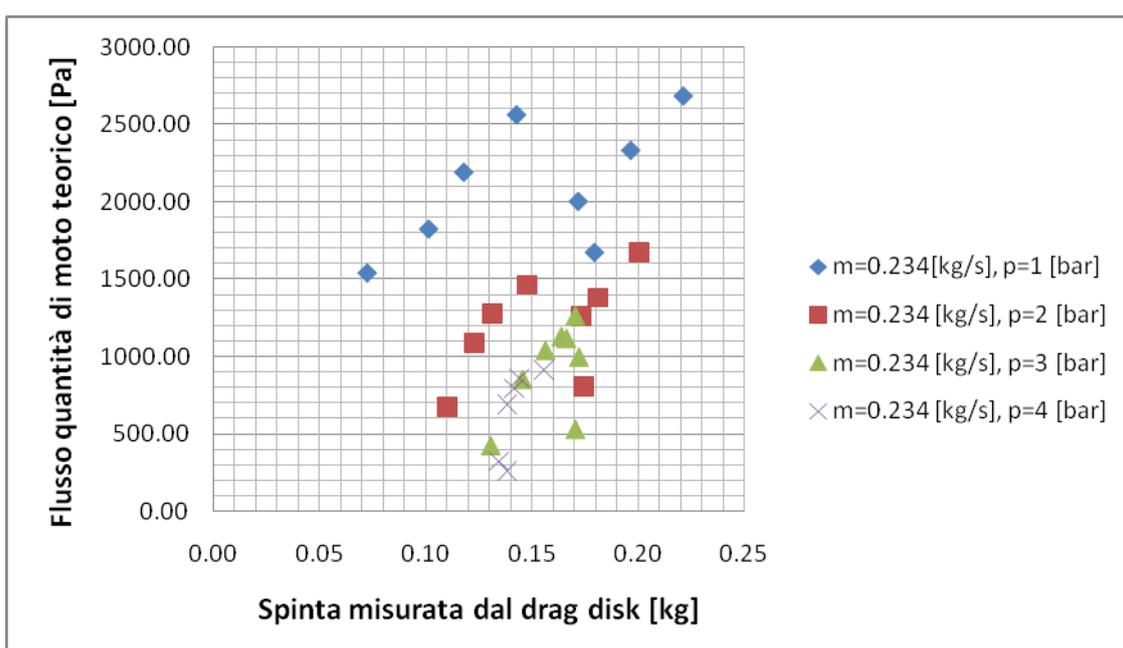


Figura 29: Flusso della quantità di moto teorico vs Spinta misurata dal Drag disk

I grafici 28 e 29 riportano in ascissa la spinta in Kg misurata dal Drag disk e in ordinata il flusso della quantità di moto teorico.

Il flusso della quantità di moto teorico è calcolato con l'Eq. (22) considerando il grado di vuoto teorico e lo Slip factor calcolato con l'Eq. (24) sempre facendo riferimento al grado di vuoto teorico.

Il flusso della quantità di moto teorico e la misura del Drag disk sono essere legati da un relazione del tipo:

$$\rho V^2 = K \frac{2Mg}{A_m}$$

in cui K , g e A_m sono delle costanti. I segnali, per entrambi i gruppi di prove, risultano essere molto oscillanti ed è difficile trovare una correlazione funzionale tra le due grandezze in esame.

Ciò è confermato anche dai grafici 30 e 31 che mostrano l'andamento del segnale registrato dalla cella di carico del drag disk in funzione del titolo di vapore.

Il disturbo, dovuto probabilmente ad effetti termici indesiderati, è dello stesso ordine di grandezza del segnale stesso. L'errore in questo campo di misura risulta intollerabile.

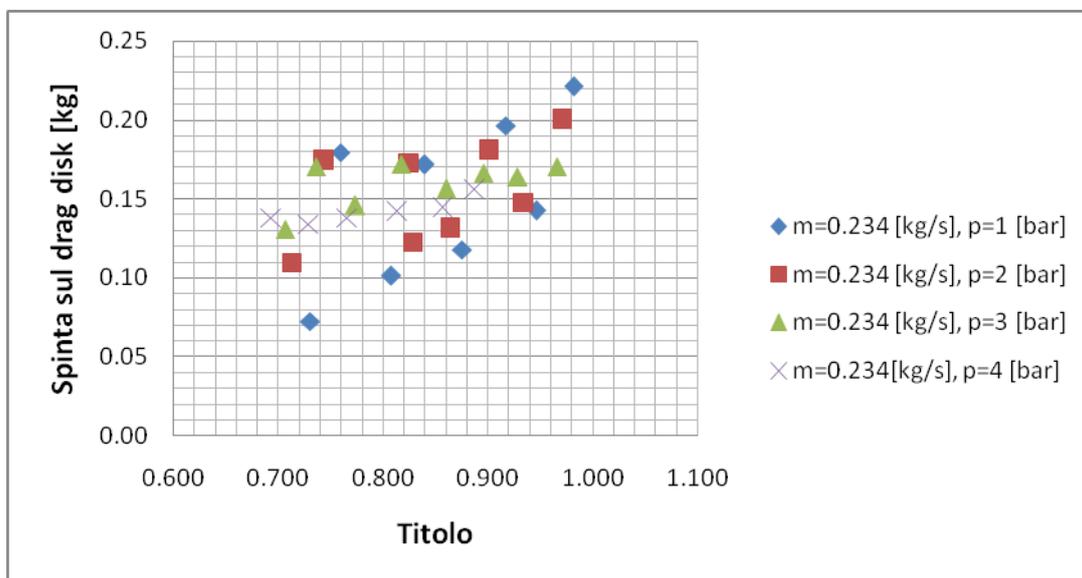


Figura 30: Spinta misurata dal Drag disk vs Titolo

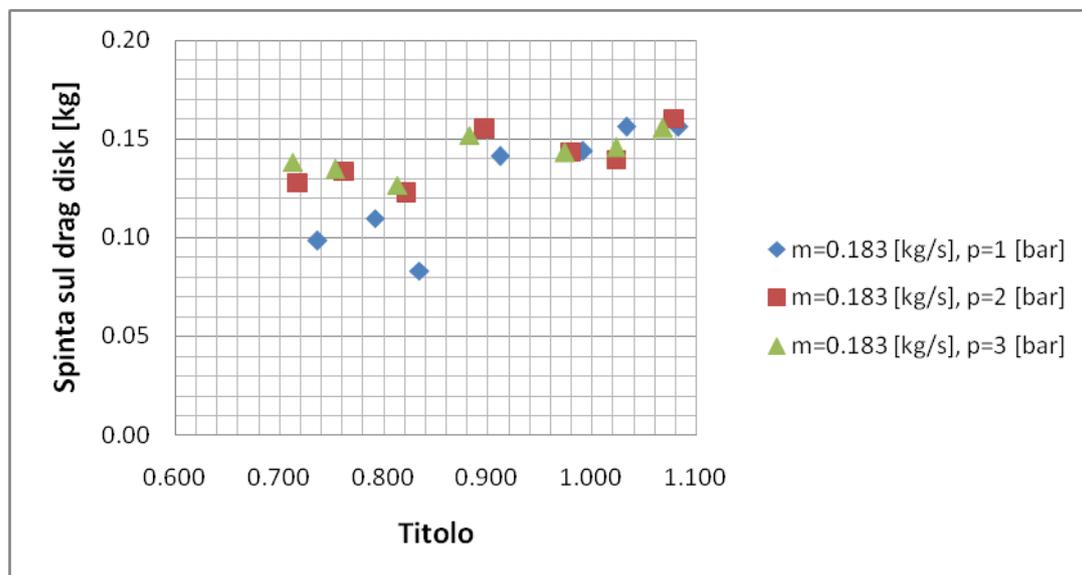


Figura 31: Spinta misurata dal Drag disk vs Titolo

8.3.2 Misura del flusso della quantità di moto con un sistema alternativo

Come detto, il Drag disk, nel range di portate in cui è stato testato, non può essere utilizzato per misurare correttamente il flusso della quantità di moto. In tale range, infatti, la cella di carico lavora al disotto del 5% del suo fondo scala, campo in cui l'errore è decisamente più alto dell'errore nominale dello strumento.

Per poter effettuare la misura del flusso della quantità di moto è stato installato un sistema alternativo. Il sistema, mostrato in Figura 32, è costituito da un tubo in acciaio di 8 mm di diametro esterno e 6 mm di diametro interno, disposto trasversalmente rispetto alla direzione del flusso.

Il Tubo presenta un foro centrale da 2.5 mm di diametro centrato rispetto alla tubazione da 3" e altri due fori, sempre da 2.5 mm, a distanza di 20 mm rispetto al foro centrale.

Il tubo intercetta il flusso e risulta sensibile alla sua pressione totale:

$$p_{TOT} = p_s + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (29)$$

Il tubo è collegato alla presa positiva di un trasmettitore differenziale di pressione. La presa negativa è collegata idraulicamente alla sezione di prova stessa. Pertanto, il trasmettitore differenziale di pressione ci dà direttamente in uscita la pressione cinetica del fluido:

$$p_{TOT} - p_s = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (30)$$

Questo sistema è stato utilizzato nella seconda campagna sperimentale per ottenere il flusso della quantità di moto del fluido.



Figura 32: Tubo di Pitot

8.4 Prove sperimentali con Spool piece composta da Vortex, Sonda capacitiva e Tubo di Pitot

La tabella 6 mostra la matrice sperimentale di prove contenente rispettivamente:

- Il numero della prova.
- La temperatura del fluido all'ingresso del preriscaldatore [°C].
- La pressione del fluido all'ingresso del preriscaldatore [bar].
- La portata di fluido misurata dal Coriolis [kgs].
- La pressione nella sezione di prova [bar].
- Il titolo all'ingresso della sezione di prova calcolato con la (9).
- Il segnale in uscita in *Volt* del trasmettitore differenziale di pressione collegato al tubo di Pitot.
- Il segnale in uscita del Vortex [V].
- Il flusso della quantità di moto misurato (30) [Pa].
- Il segnale effettivo in uscita della cella di carico [kg].
- Il grado di vuoto misurato con la sonda capacitiva (2).

prova	Tin	Pin	portata [kg/s]	p sonda	x	Pitot	vortex	M	DD eff	alpha
9	160.7	44.4	0.234	1.375	0.723	2.22	3.56	6100	0.149	0.913
5	158	46.7	0.233	1.4	0.796	1.36	3.73	1800	0.223	1.013
13	161.5	45.7	0.234	1.4	0.762	1.36	3.64	1800	0.166	
1	158	50.25	0.233	1.44	0.873	1.42	3.85	2100	0.205	1.024
2	158	50.25	0.233	2.2	0.862	1.23	2.85	1150	0.212	0.992
14	161.5	45.7	0.234	2.2	0.748	1.17	2.65	850	0.176	0.901
6	158	46.7	0.233	2.3	0.782	1.19	2.68	950	0.208	0.999
10	160.7	44.4	0.234	2.3	0.706	2.07	2.44	5350	0.180	0.893
3	158	50.25	0.233	3.1	0.852	1.15	2.3	750	0.233	0.993
7	158	46.7	0.233	3.1	0.773	1.11	2.05	550	0.228	0.979
15	161.5	45.7	0.234	3.1	0.737	1.09	2.03	450	0.207	0.889
11	160.7	44.4	0.234	3.13	0.696	1.55	1.93	2750	0.196	
4	158	50.25	0.233	4	0.845	1.1	1.97	500	0.253	0.977
8	158	46.7	0.233	4	0.765	1.06	1.6	300	0.233	
16	161.5	45.7	0.234	4.1	0.728	1.05	1.59	250	0.228	0.870
12	160.7	44.4	0.234	4.14	0.685	1.05	1.53	250	0.211	0.841
25	165.3	40	0.183	1.27	0.760	1.19	3.26	950	0.110	0.932
17	165.2	44	0.183	1.3	0.955	1.29	3.64	1450	0.160	0.913
21	164	42	0.185	1.3	0.847	1.24	3.43	1200	0.132	0.925
22	164	42	0.185	2.15	0.833	1.11	2.44	550	0.161	0.924
26	165.3	40	0.183	2.16	0.744	1.08	2.23	400	0.146	0.954
18	165.2	44	0.183	2.25	0.942	1.12	2.49	600	0.172	0.918
19	165.2	44	0.183	3	0.936	1.08	2.09	400	0.203	0.908
23	164	42	0.185	3.13	0.823	1.06	1.98	300	0.197	0.905
27	165.3	40	0.183	3.13	0.732	1.04	1.76	200	0.188	0.961
20	165.2	44	0.183	4	0.929	1.04	1.83	200	0.217	0.885
24	164	42	0.185	4.1	0.814	1.03	1.74	150	0.215	0.882
28	165.3	40	0.183	4.1	0.723	1.01	1.55	50	0.214	0.954
34	164.2	31.2	0.132	1.17	0.841	1.106	2.87	530	-0.202	1.015
30	162.8	32.2	0.133	1.18	0.933	1.14	3	700	0.176	1.000
35	164.2	31.2	0.132	2.1	0.825	1.03	1.97	150	-0.211	1.005
31	162.8	32.2	0.133	2.35	0.917	1.04	1.98	200	0.218	1.014
36	164.2	31.2	0.132	3	0.815	1.01	1.6	50	-0.220	0.988
32	162.8	32.2	0.133	3.1	0.910	1.02	1.76	100	0.221	0.999
37	164.2	31.2	0.132	4	0.806	1	1.45	0	-0.230	0.973
33	162.8	32.2	0.133	4.16	0.902	1	1.56	0	0.235	0.982

Tabella 7: Seconda campagna sperimentale di prove

La matrice di prove può essere divisa in tre gruppi caratterizzati da portate diverse, rispettivamente 0.133, 0.183 e 0.233 $[Kg/s]$. Per ciascuna portata sono state effettuate prove alle pressioni di circa 1, 2, 3 e 4 [bar].

La pressione all'interno della sezione di prova è stata regolata agendo sulla valvola manuale di contropressione DN 65 a valle della sezione di prova.

I titolo di vapore all'ingresso della sezione di prova considerati variano da 0.73 a 0.95.

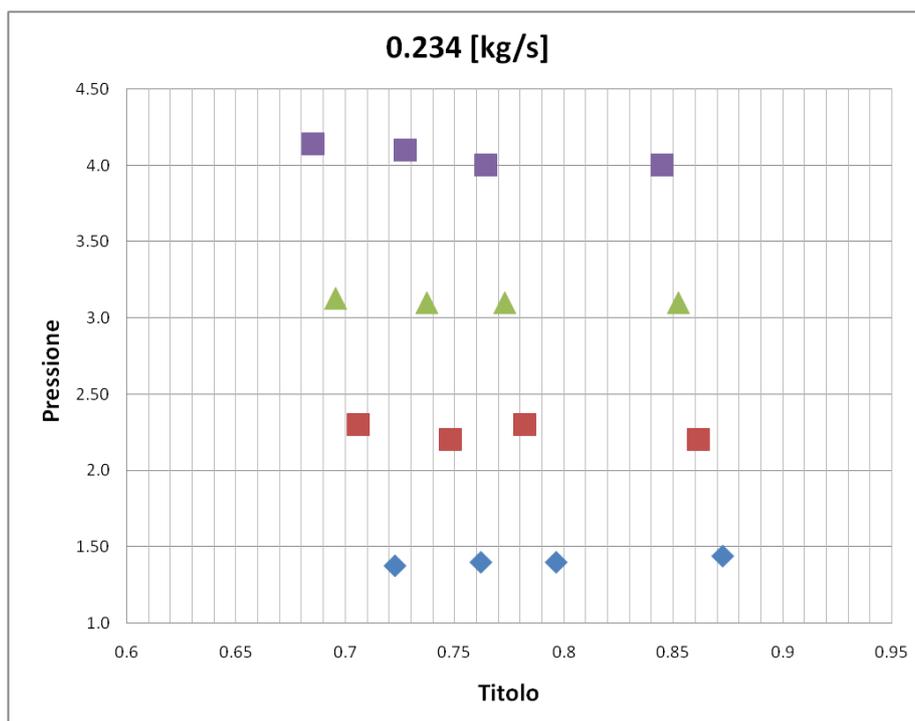


Figura 33: prove sperimentali a $m=0.234$ [kg/s]

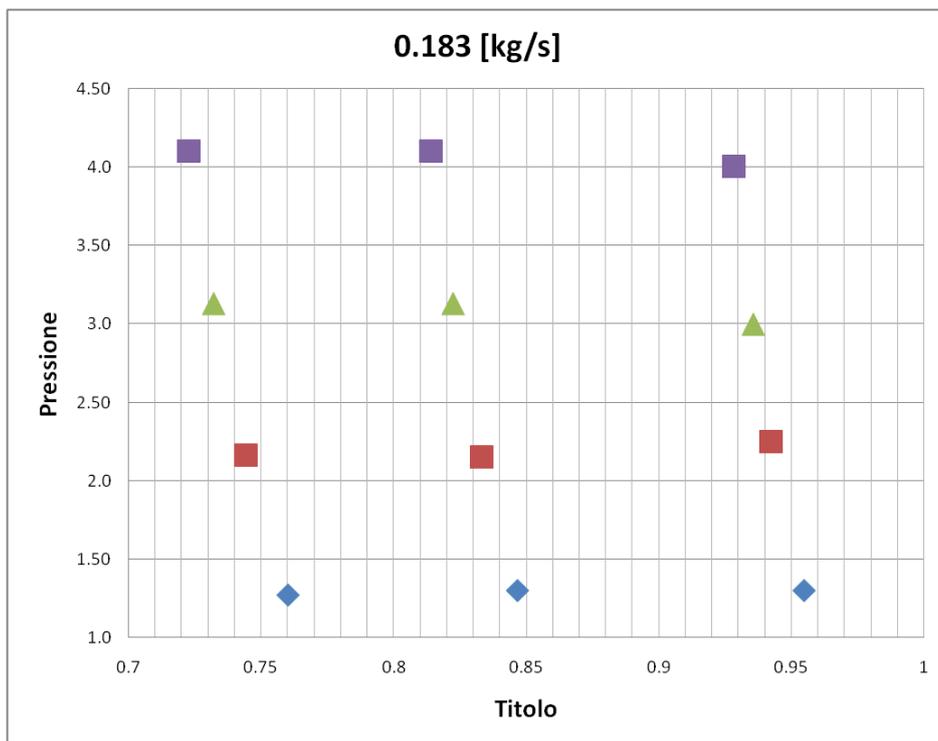


Figura 34: prove sperimentali a $m=0.183$ [kg/s]

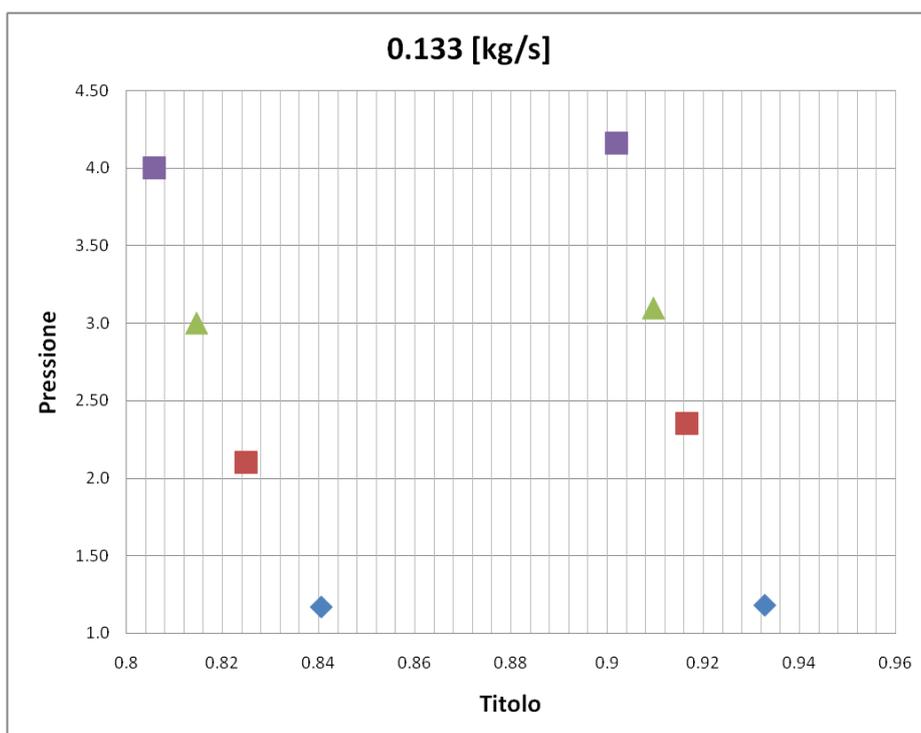


Figura 35: prove sperimentali a $m=0.133$ [kg/s]

8.4.1 Analisi dati

Vortex

Il segnale del Vortex è direttamente proporzionale alla velocità della fase vapore. La figura 36 mostra, oltre all'andamento del segnale in funzione della velocità del vapore, la portata totale e la pressione alla quale le singole prove fanno riferimento.

A parità di portata, i segnali più alti si registrano naturalmente per pressioni della sezione di prove più basse.

A parità di pressione, portate maggiori determinano segnali del vortex maggiori.

La figura 37 mostra la correlazione tra il segnale del vortex e la velocità della fase vapore.

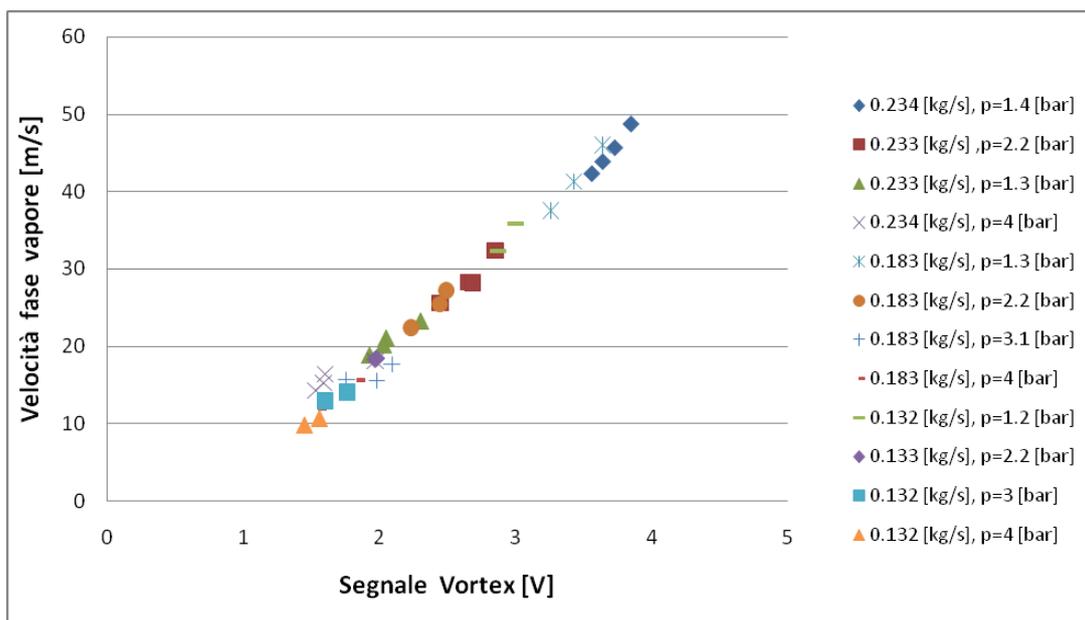


Figura 36: Velocità fase vapore [m/s] vs Segnale Vortex [V]

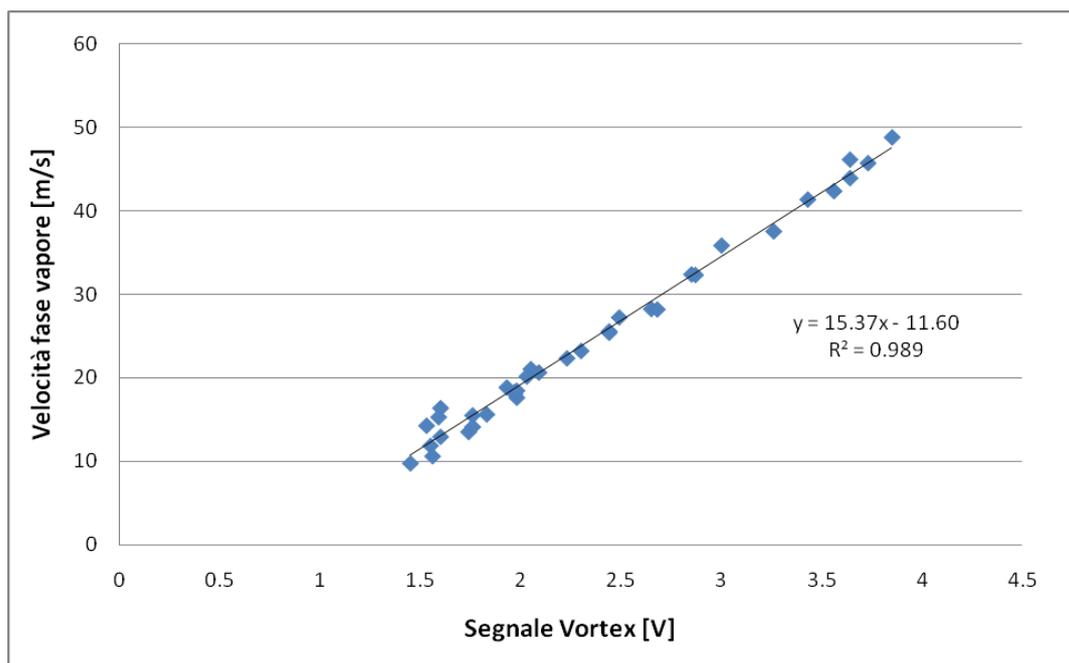


Figura 37: Correlazione tra Velocità fase vapore [m/s] e Segnale del Vortex [V]

Tubo di Pitot

La tabella 7 mostra il confronto tra il flusso della quantità di moto misurato con il tubo di Pitot e quello teorico, calcolato con l'equazione:

$$M = V_L^2(\alpha\rho_V S^2 + (1 - \alpha)\rho_L)$$

In cui α rappresenta il *grado* di vuoto teorico, S è calcolato con l'Eq. (24) a partire dai valori teorici di titolo e grado di vuoto, V_L invece, è calcolato con i valori teorici di velocità della fase vapore e di slip factor.

Il valore sperimentale di flusso della quantità di moto è calcolato moltiplicando per due la pressione cinetica del fluido ottenuta con il tubo di Pitot.

Prova	Portata [kg/s]	P sonda [bar]	Titolo [-]	Segnale Pitot [V]	M sp. [Pa]	M teorico [Pa]
34	0.132	1.17	0.841	1.106	530	703.9
30	0.133	1.18	0.933	1.14	700	876.7
25	0.183	1.27	0.760	1.19	950	1023.0
17	0.183	1.3	0.955	1.29	1450	1591.2
21	0.185	1.3	0.847	1.24	1200	1272.0
5	0.233	1.4	0.796	1.36	1800	1664.4
13	0.234	1.4	0.762	1.36	1800	1535.2
1	0.233	1.44	0.873	1.42	2100	1950.8
35	0.132	2.1	0.825	1.03	150	391.9
22	0.185	2.15	0.833	1.11	550	769.1
26	0.183	2.16	0.744	1.08	400	596.7
2	0.233	2.2	0.862	1.23	1150	1279.1
14	0.234	2.2	0.748	1.17	850	970.6
18	0.183	2.25	0.942	1.12	600	927.0
6	0.233	2.3	0.782	1.19	950	1008.7
31	0.133	2.35	0.917	1.04	200	443.8
19	0.183	3	0.936	1.08	400	697.3
36	0.132	3	0.815	1.01	50	273.3
3	0.233	3.1	0.852	1.15	750	907.2
7	0.233	3.1	0.773	1.11	550	744.8
15	0.234	3.1	0.737	1.09	450	683.4
32	0.133	3.1	0.910	1.02	100	336.9
23	0.185	3.13	0.823	1.06	300	526.8
27	0.183	3.13	0.732	1.04	200	407.8
4	0.233	4	0.845	1.1	500	701.7
8	0.233	4	0.765	1.06	300	573.8
20	0.183	4	0.929	1.04	200	523.9
37	0.132	4	0.806	1	0	203.9
16	0.234	4.1	0.728	1.05	250	512.2
24	0.185	4.1	0.814	1.03	150	400.6
28	0.183	4.1	0.723	1.01	50	308.4
12	0.234	4.14	0.685	1.05	250	450.8
33	0.133	4.16	0.902	1	0	251.1

Tabella 8: Flusso della quantità di moto teorico vs sperimentale

Come mostrano le figure 38 e 39, che mettono in relazione il flusso della quantità di moto teorico con quello sperimentale, il segnale del tubo di Pitot è effettivamente proporzionale alla pressione cinetica del fluido.

I punti sperimentali possono essere interpolati linearmente con un coefficiente di correlazione del 98%.

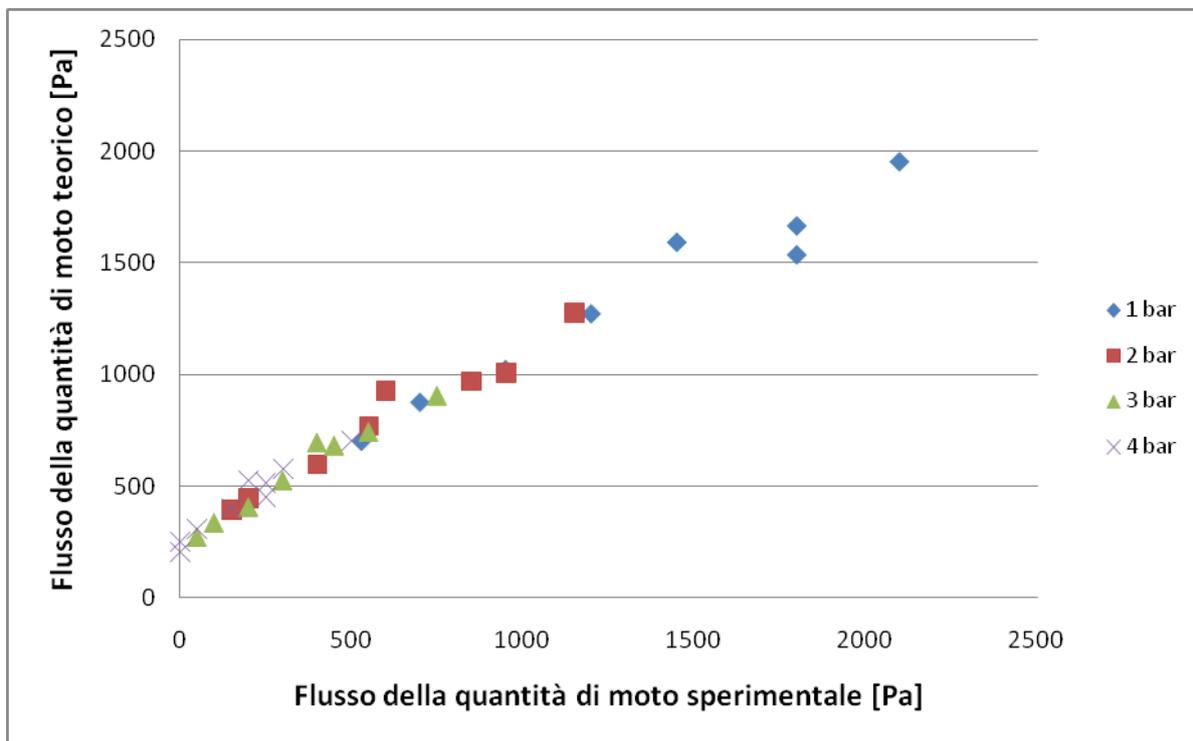


Figura 38: Flusso della quantità di moto teorico vs sperimentale

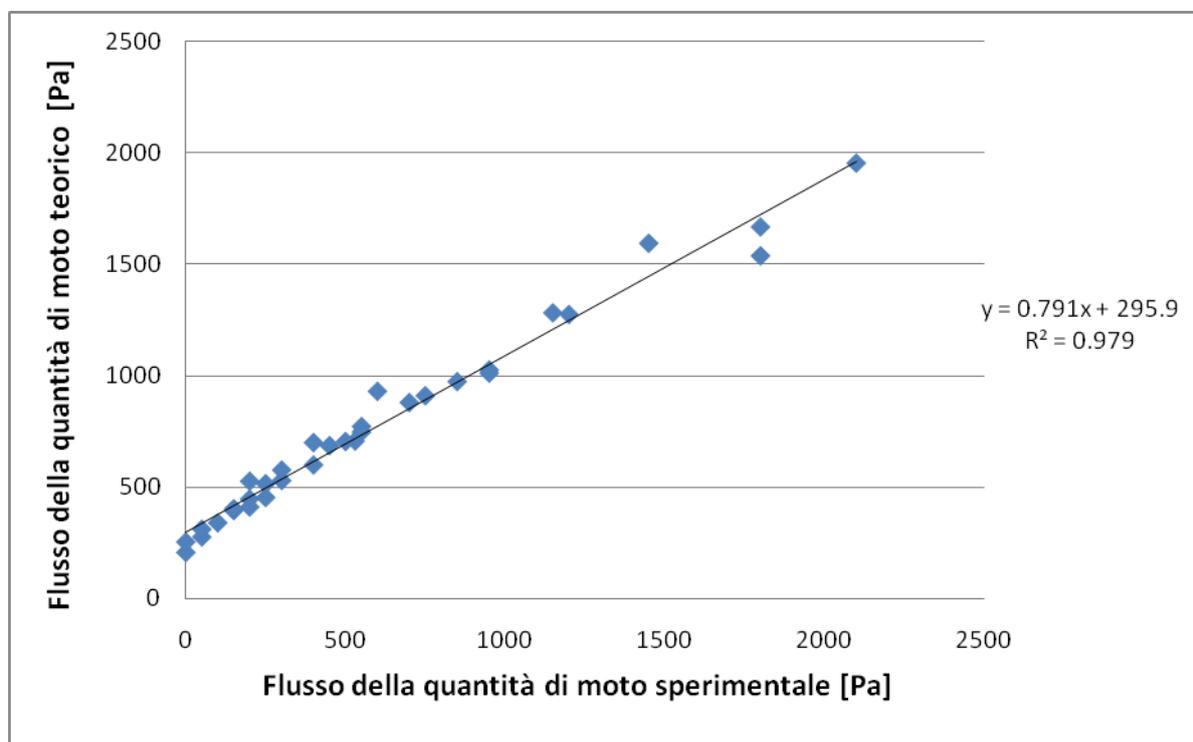


Figura 39: Correlazione Flusso della quantità di moto teorico vs sperimentale

La figura 40 mostra l'andamento del flusso della quantità di moto teorico e sperimentale in funzione della pressione della sezione di prova per le diverse portate totali di fluido bifase.

In questo modo si può avere una indicazione visiva sulla dispersione dei valori sperimentali di flusso della quantità di moto rispetto agli omologhi teorici. L'errore medio rispetto al valore di flusso della quantità di moto teorico è circa del 7.5%.

A parità di pressione della sezione di prova, il flusso della quantità di moto cresce al crescere della portata e, a parità di portata, presenta, come è logico aspettarsi, valori più alti a basse pressioni.

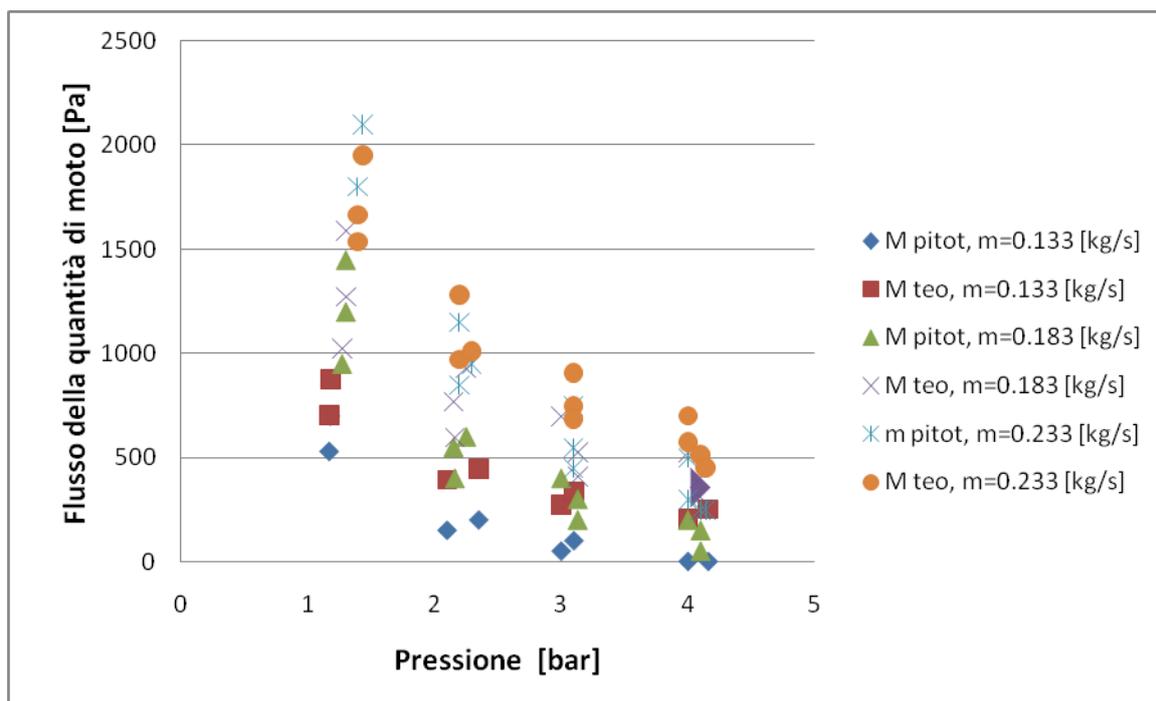


Figura 40: Flusso della quantità di moto teorica (M teo) e sperimentale (M Pitot) vs pressione

Sonda capacitiva

La tabella 41 mette in confronto il grado di vuoto sperimentale, misurato con la sonda capacitiva (2), con il grado di vuoto teorico, ricavato attraverso al correlazione di Zuber-Findlay (17).

Prova	P sonda [bar]	Portata [kg/s]	Titolo [-]	GdV sp. [-]	GdV teo. [-]
9	1.375	0.234	0.7226	0.9126	0.9801
5	1.4	0.233	0.7965	1.0129	0.9838
1	1.44	0.233	0.8728	1.0236	0.9878
2	2.2	0.233	0.8619	0.9920	0.9866
14	2.2	0.234	0.7483	0.9009	0.9799
6	2.3	0.233	0.7822	0.9987	0.9817
10	2.3	0.234	0.7063	0.8933	0.9772
3	3.1	0.233	0.8525	0.9927	0.9852
7	3.1	0.233	0.7729	0.9790	0.9800
15	3.1	0.234	0.7372	0.8886	0.9776
4	4	0.233	0.8452	0.9770	0.9839
16	4.1	0.234	0.7276	0.8701	0.9751
12	4.14	0.234	0.6854	0.8409	0.9717
25	1.27	0.183	0.7602	0.9325	0.9817
17	1.3	0.183	0.9548	0.9132	0.9930
21	1.3	0.185	0.8467	0.9249	0.9862
22	2.15	0.185	0.8333	0.9240	0.9844
26	2.16	0.183	0.7443	0.9537	0.9788
18	2.25	0.183	0.9425	0.9182	0.9918
19	3	0.183	0.9356	0.9078	0.9910
23	3.13	0.185	0.8225	0.9048	0.9824
27	3.13	0.183	0.7322	0.9614	0.9759
20	4	0.183	0.9285	0.8851	0.9899
24	4.1	0.185	0.8144	0.8816	0.9806
28	4.1	0.183	0.7228	0.9540	0.9731
34	1.17	0.132	0.8406	1.0152	0.9856
30	1.18	0.133	0.9328	1.0000	0.9912
35	2.1	0.132	0.8250	1.0053	0.9831
31	2.35	0.133	0.9166	1.0141	0.9894
36	3	0.132	0.8147	0.9881	0.9809
32	3.1	0.133	0.9097	0.9989	0.9883
37	4	0.132	0.8059	0.9727	0.9784
33	4.16	0.133	0.9021	0.9820	0.9868

Tabella 9: confronto tra grado di vuoto teorico e sperimentale

La figura 42 mostra l'andamento del segnale della sonda normalizzato e pesato utilizzando l'Eq. (1) in funzione della distanza angolare tra gli elettrodi e la pressione della sezione di prova.

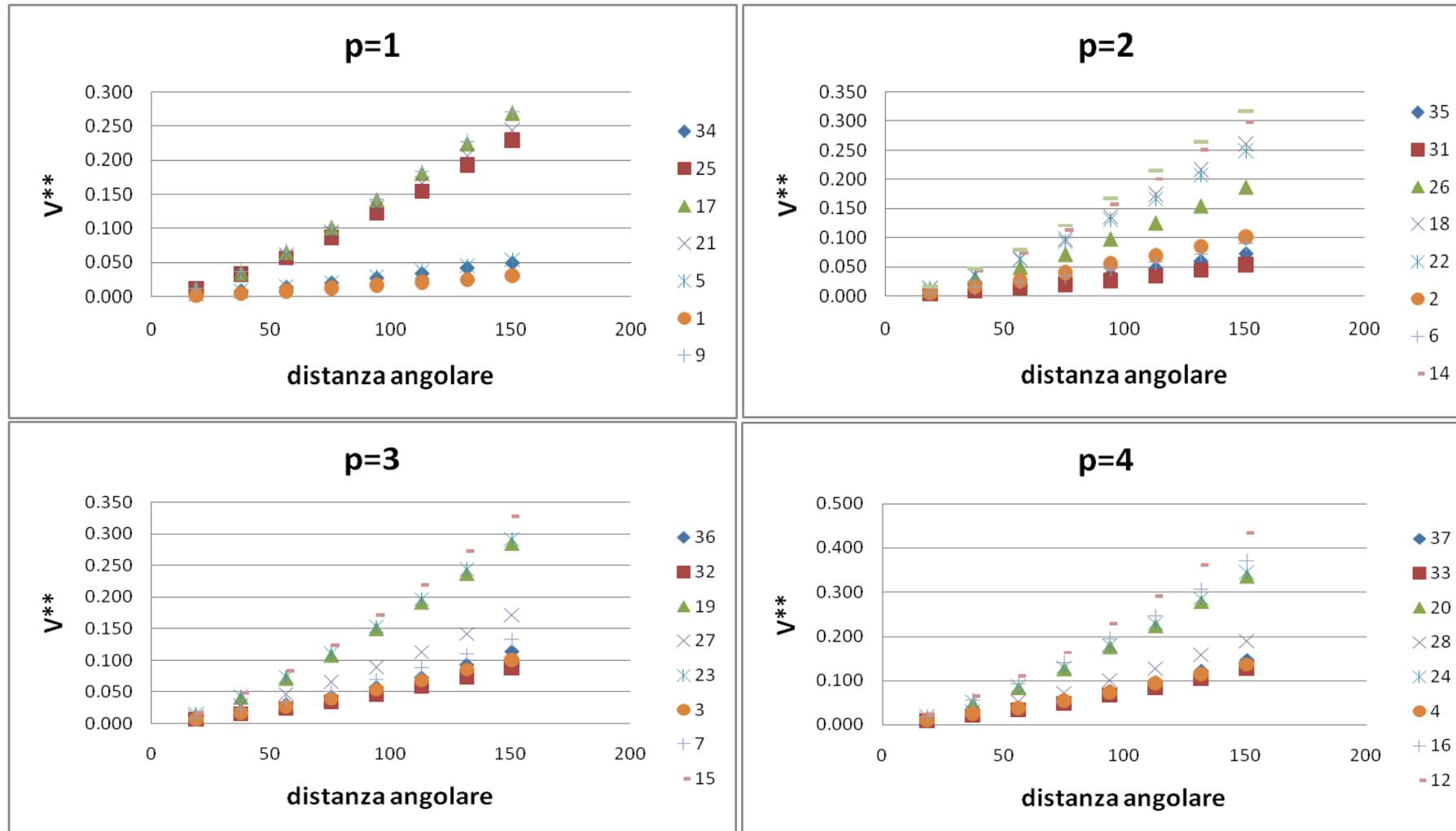


Figura 41: Segnale normalizzato della sonda capacitiva in funzione della distanza tra gli elettrodi in mm. Ogni grafico si riferisce ad un pressione diversa (1, 2, 3 e 4 bar) e ogni colore si riferisce ad uno specifico grado di vuoto.

Le figure 42 e 43 mostrano l'andamento del grado di vuoto sperimentale e teorico in funzione del titolo di vapore. In particolare La figura 43, in particolare, discrimina le diverse portate a cui fanno riferimento i punti sperimentali.

Si può notare che per i punti sperimentali a portata bassa (0.133 Kg/s) l'errore sistematico è sempre positivo e per quelli a portata intermedia (0.183 kg/s) l'errore è sempre negativo. Per i punti ad alta portata (0.233 kg/s), l'errore in alcuni casi è negativo e in altri casi è positivo.

Questo andamento si può vedere meglio in Figura 45.

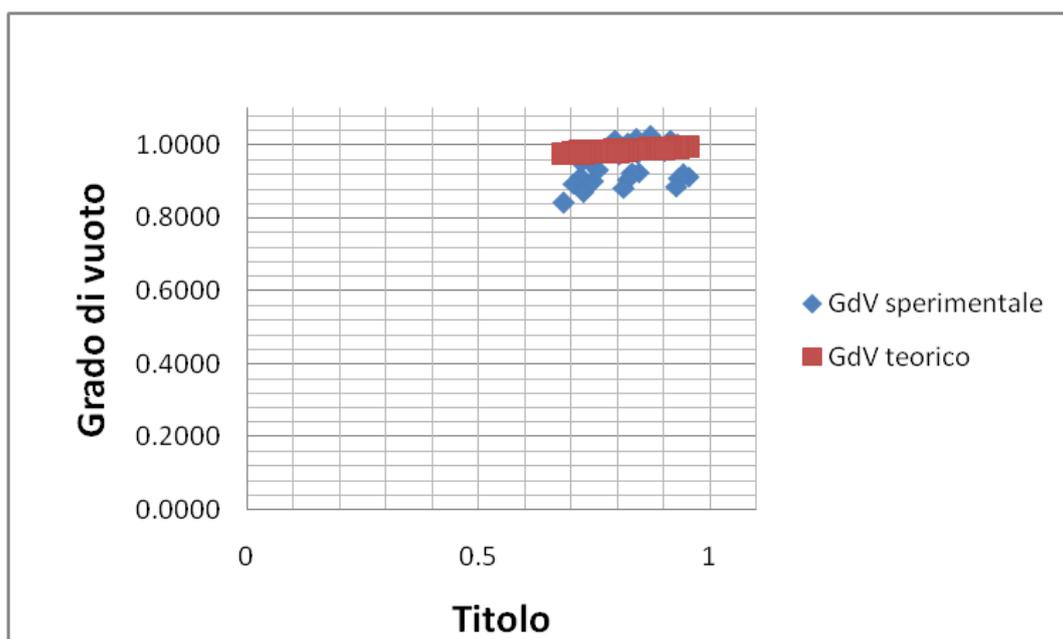


Figura 42: Grado di vuoto sperimentale vs teorico in funzione del titolo

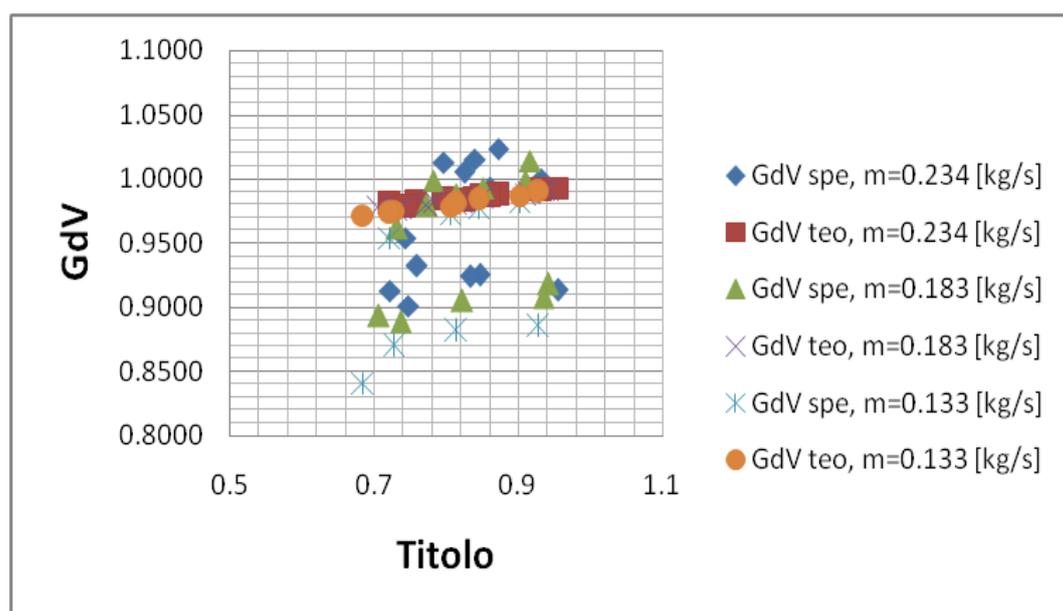


Figura 43: Grado di vuoto in funzione del titolo e della portata

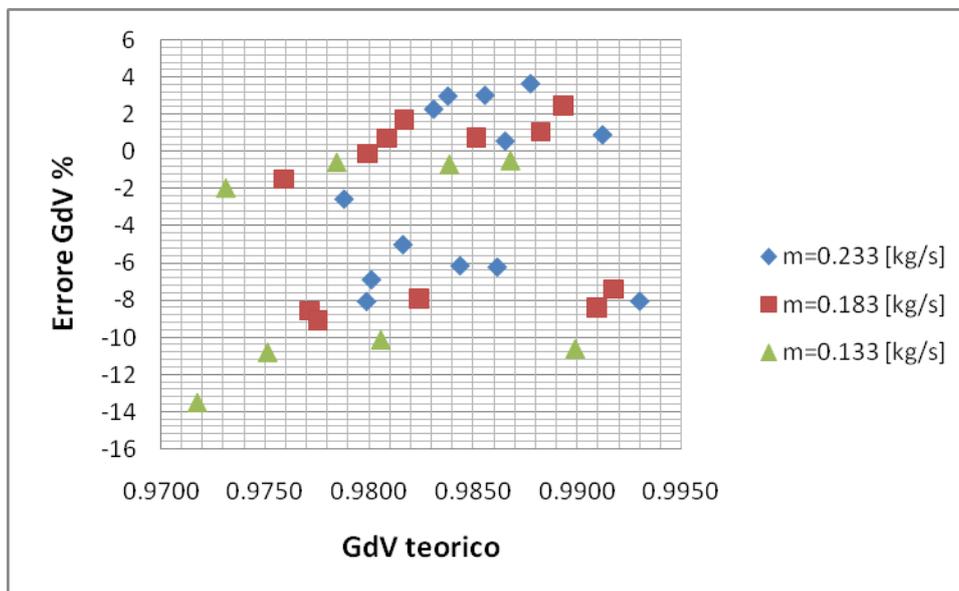


Figura 44: Errore percentuale sul grado di vuoto per serie di punti a uguale portata

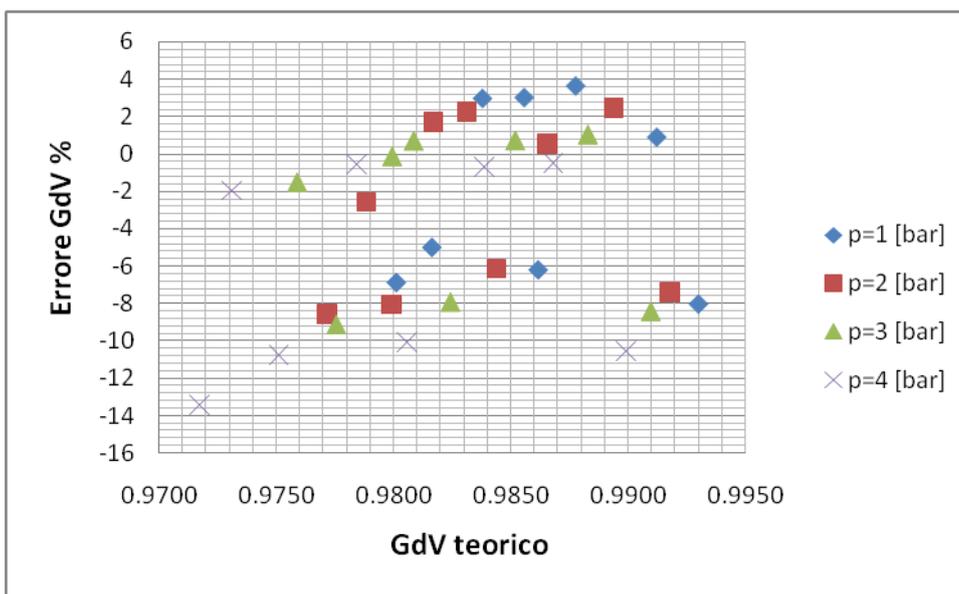


Figura 45: Errore percentuale sul grado di vuoto per serie di punti a uguale pressione

Nonostante l'errore medio sulla misura del grado di vuoto sia relativamente basso, dell'ordine del 5% rispetto al valore teorico, esso ha un notevole peso sul calcolo della densità della miscela bifase e, di conseguenza, sulla stima della portata massica bifase.

In Figura 46 è mostrato l'andamento dell'errore percentuale sulla densità in funzione dell'errore sulla stima del grado di vuoto. La densità della miscela bifase è sensibilissima alle variazioni di grado di vuoto. Per errori dell'ordine del 2-3%, l'errore sulla stima della densità arriva anche al 100% del valore effettivo.

In effetti, la densità della miscela bifase viene calcolata come la media pesata sul grado di vuoto delle densità della fase liquida e vapore, densità che mediamente si differenziano di tre ordini di grandezza.

Non stupisce allora che la stima della densità media possa variare così tanto per variazioni di grado di vuoto così piccole.

Tale problema è ineliminabile in quanto dipende dalla fisica del fenomeno.

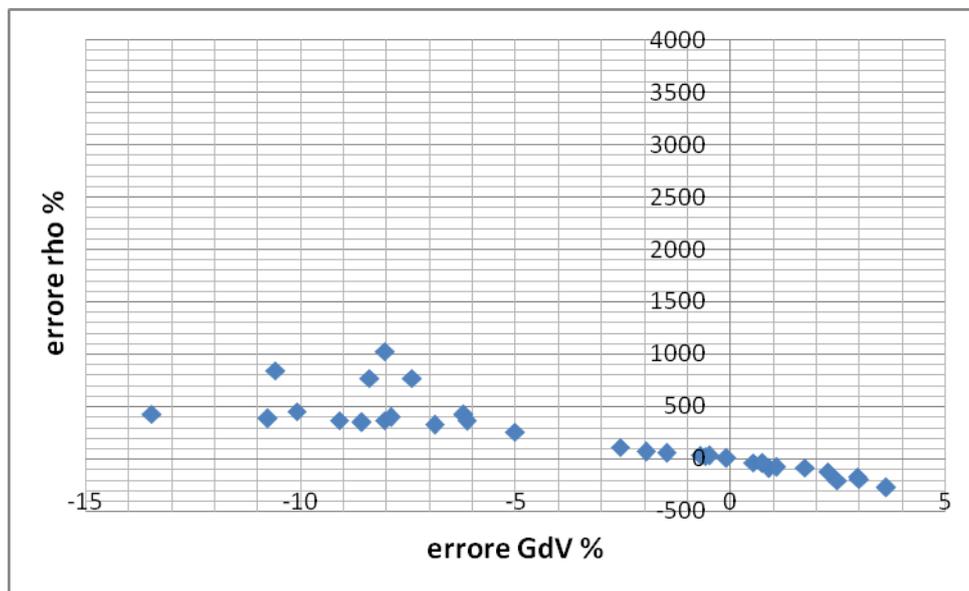


Figura 46: Errore sul calcolo della densità in funzione dell'errore sul grado di vuoto

Se confrontiamo i dati di grado di vuoto sperimentali tra le due campagne, quella con Pitot e quella senza, si nota che la deviazione standard dei dati sperimentali è molto maggiore nella seconda campagna.

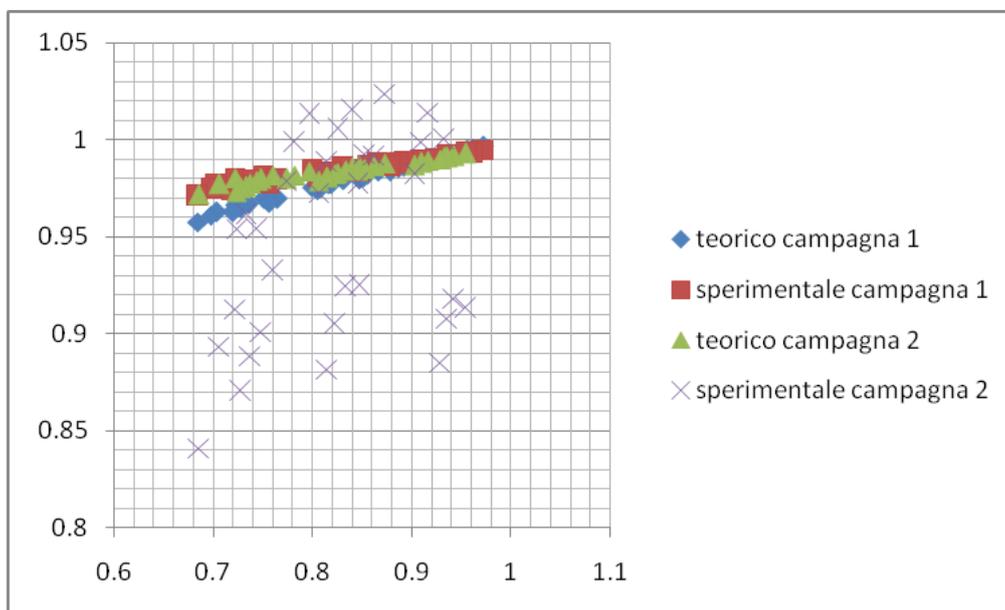


Figura 47: Confronto tra i dati di grado di vuoto teorici e sperimentali delle due campagne di prove

La maggiore dispersione di dati sperimentali dipende dalla presenza del tubo di Pitot a monte della sonda capacitiva. Il tubo di Pitot, pur avendo uno spessore di soli 8 mm rispetto al diametro di 80 mm della tubazione della sezione di prova, disturba notevolmente il flusso.

Consideriamo, per esempio, i punti sperimentali alla portata di 0.233 [kg/s] alla pressione della sezione di prova di 1.2 bar mostrati in Figura 48.

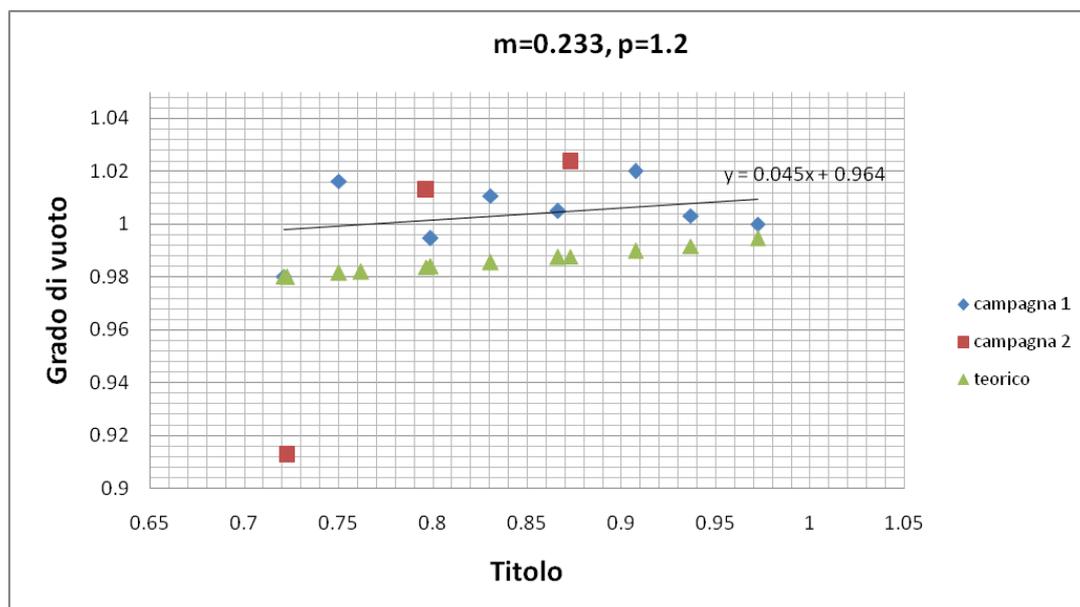


Figura 48: grado di vuoto vs titolo punti a $m=0.233$ [kg/s], $p=1.2$ [bar]

I punti verdi rappresentano i valori teorici di grado di vuoto ottenuti applicando l'Equazione di Zuber-Findlay (17), i punti blu sono i corrispondenti valori sperimentali ottenuti con la sonda capacitiva nella configurazione dello spool piece senza tubo di Pitot mentre i punti rossi sono i valori sperimentali ottenuti dalla sonda capacitiva nella configurazione con il tubo di Pitot.

I punti considerati, in ordine di titolo crescente, sono rispettivamente i punti 9, 5 e 1, le cui caratteristiche sono riassunte nella tabella 10.

Prova	Portata [kg/s]	Pressione [bar]	GdV sp.	GdV teo	GdV corretto
9	0.234	1.375	0.913	0.9801	1.005
5	0.233	1.4	1.013	0.9838	1.012
1	0.233	1.44	1.024	0.9877	1.023

Tabella 10: punti sperimentali seconda campagna

I punti 1 e 5 si avvicinano all'andamento teorico del grado di vuoto in funzione del titolo e presentano un trend simile, il punto 9 invece, risulta molto distante, sia dall'andamento teorico, sia dall'omologo punto nelle stesse condizioni di portata, pressione e titolo della prima campagna sperimentale.

Per capire la ragione di questo scostamento è opportuno analizzare il segnale normalizzato per diverse coppie di elettrodi e in diverse posizioni angolari in modo da cercare di risalire al regime di flusso della prova specifica attraverso un'analisi tomografica.

Nei grafici 49, 50 e 51 sono riportati i segnali normalizzati per i tre diversi punti sperimentali, per diverse coppie di elettrodi angolate di 180°, 90° e 45°.

Il grafico 49 riporta le coppie di elettrodi orientate a 180° 1-9, 3-11, 5-13 e 7-15. Il grafico 50 riporta le coppie orientate a 90° 1-5, 5-9, 9-13 e 13-1; il grafico 51 le coppie 1-3, 3-5, 5-7, 7-9, 9-11, 11-13, 13-15 e 15-1 a 45°.

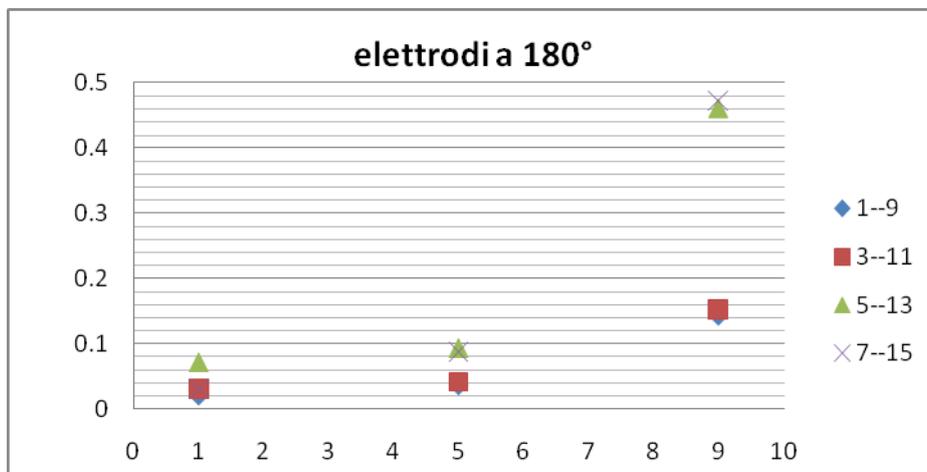


Figura 49: Segnale normalizzato elettrodi a 180° vs prove (in legenda coppie di elettrodi di misura)

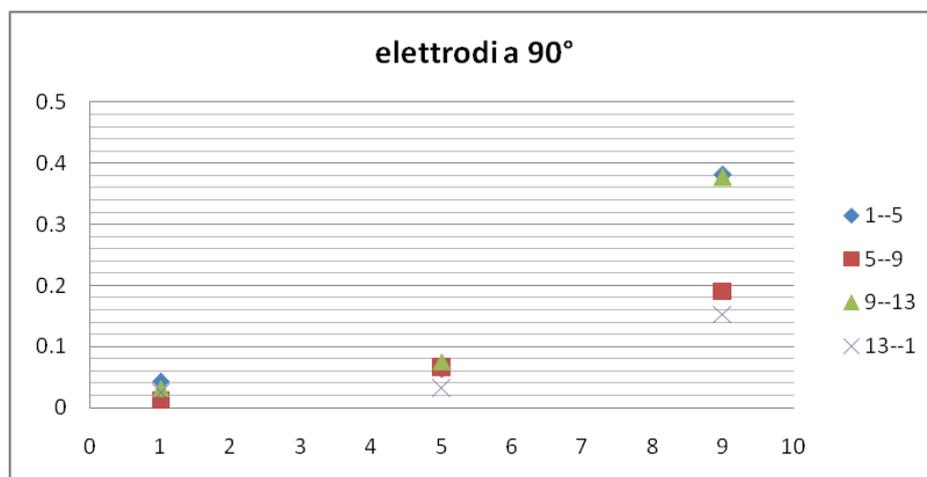


Figura 50: Segnale normalizzato elettrodi a 90° vs prove (in legenda coppie di elettrodi di misura)

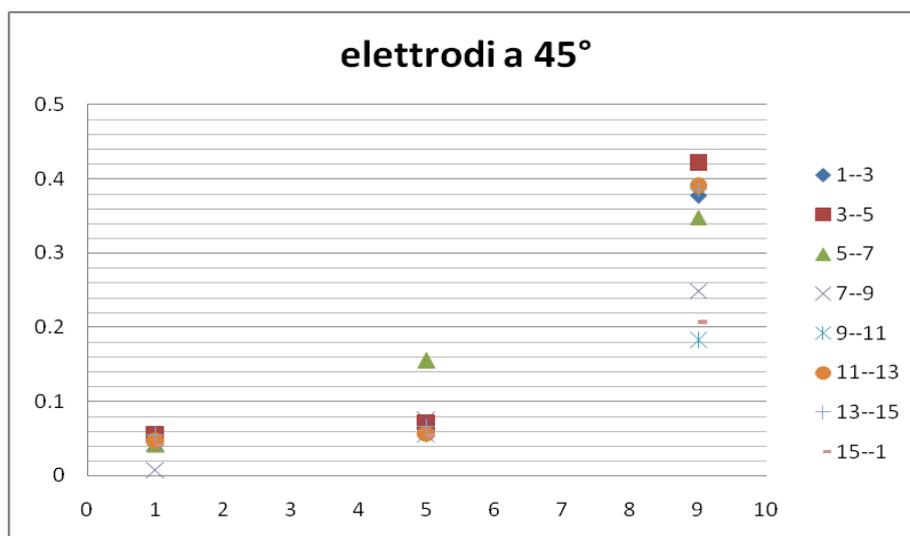


Figura 51: Segnale normalizzato elettrodi a 45° vs prove (in legenda coppie di elettrodi di misura)

I grafici mostrano una diversa distribuzione delle fasi liquida e vapore nella prova 9 rispetto alle prove 1 e 5. Gli istogrammi mostrati in Figura 52 riassumono graficamente le informazioni contenute nelle figure precedenti.

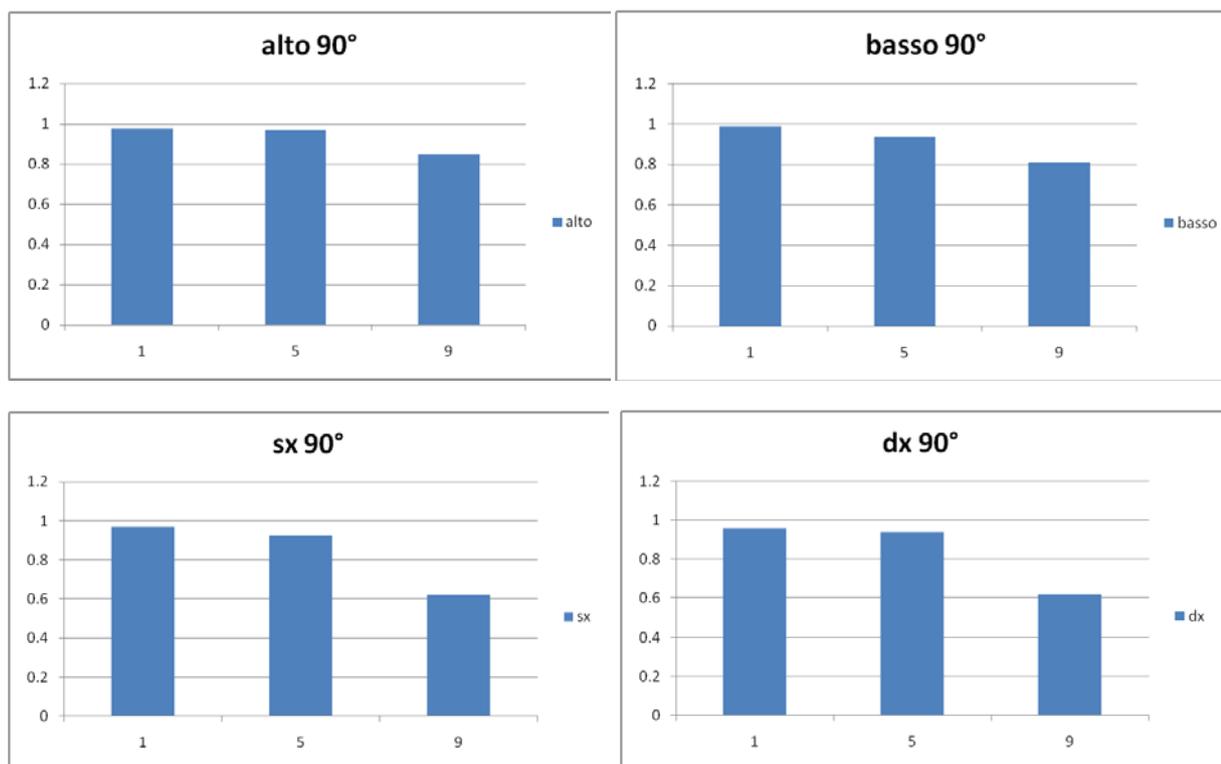


Figura 52: distribuzione fase vapore nella sezione della sonda per le prove 1, 5 e 9

Nelle prove sperimentali 1 e 5, che presentano misure di grado di vuoto simili ai valori teorici, la concentrazione di liquido è uniformemente distribuita lungo tutta la sezione della sonda capacitiva.

Gli istogrammi in Figura 52, infatti, mostrano una percentuale di vapore molto simile per le diverse zone della sezione di prova (alto, basso, sinistra e destra).

Il grado di vuoto nelle quattro zone, per le prove 1 e 5, varia tra il 94 e il 98 %.

La zona a maggior tenore di liquido è quella compresa tra gli elettrodi 5-9 e 7-9, ovvero la zona bassa della sezione di prova (Figura 50 e 51). Le altre zone presentano valori di grado di vuoto, seppur minori, confrontabili con la zona bassa.

Si deduce che il moto sia disperso uniformemente distribuito, leggermente stratificato nella parte basse della sonda.

La prova 9 invece, mostra valori di grado di vuoto molto differenti da una zona all'altra della sonda.

La Figura 52 mostra che il liquido è disposto in una zona bene precisa della sonda e precisamente lungo la direttrice orizzontale, ovvero lungo la congiungente degli elettrodi 3 e 11.

Lungo la verticale (zona alto-basso) il grado di vuoto si aggira intorno all'80-85%, mentre lungo la direttrice orizzontale il grado di vuoto scende intorno al 60%.

La Figura 50 mostra che le zone a maggior tenore di liquido, per il punto sperimentale 9, sono quelle comprese tra gli elettrodi 1-5 e 9-13, ovvero quelle rispettivamente a centro-destra e centro-sinistra del condotto.

Inoltre, rispetto agli altri punti sperimentali, in cui il rapporto tra i segnali normalizzati nella zona orizzontale rispetto a quella verticale è circa 1, per il punto sperimentale 9 il rapporto è all'incirca 2. Significa che nella

zona orizzontale la percentuale di liquido è all'incirca doppia rispetto a quella localizzata nella zona alta e bassa della sonda.

Considerazioni analoghe possono essere ripetute per tutti gli altri punti sperimentali con comportamenti "anomali" rispetto al valore teorico di grado di vuoto o comunque rispetto ai valori di grado di vuoto che, a parità di condizioni termoidrauliche, hanno assunto gli omologhi punti sperimentali nella prima campagna di prove.

Pertanto si può concludere che la maggiore dispersione dei valori sperimentali di grado di vuoto rispetto ai valori teorici, sia dovuta al regime di moto non uniforme che assume il fluido nella maggior parte delle prove della seconda campagna sperimentale.

Il diverso regime di moto, con alte concentrazioni della fase liquida in zone ben precise della sonda capacitiva, non viene correttamente interpretato dal modello sperimentale alla base della misura del grado di vuoto, ricavato a partire dall'ipotesi di distribuzione uniforme.

Il regime di moto non uniforme, presente nella campagna sperimentale 2, non può che essere dovuto alla presenza del tubo di Pitot a monte della sonda capacitiva. Il tubo di Pitot, nonostante la sua ridotta dimensione, influisce fortemente sulla distribuzione delle fasi all'interno della sezione di prova e genera l'errore mostrato in Figura 47.

8.4.2 Calcolo portata massica bifase

L'obiettivo finale dei test è quello di confrontare la portata massica bifase, calcolata attraverso il modello matematico riportato nel capitolo 6 a partire dalle misure dello spool piece, con la portata nota in ingresso misurata con il flussimetro ad effetto Coriolis.

Le grandezze misurate con lo spool piece sono il flusso della quantità di moto, il grado di vuoto e la velocità della fase vapore.

Siccome il drag disk non ha dato risultati soddisfacenti, si considereranno i punti sperimentali della seconda campagna, ovvero quelli in cui è stato utilizzato il tubo di Pitot per la misura del flusso della quantità di moto. I gradi di vuoto associati a tali punti sperimentali però, sono affetti da un errore dovuto al disturbo causato dalla presenza del tubo di Pitot nel tratto di calma a monte della sonda capacitiva. Pertanto, si è scelto di effettuare un'extrapolazione dai dati di grado di vuoto della prima campagna sperimentale corrispondenti ai titoli dei punti sperimentali della seconda campagna.

I valori di velocità della fase vapore sono quelli della seconda campagna sperimentale.

In tabella 10 sono riportati, per ogni prova della seconda campagna, i valori della grandezze misurate con gli strumenti facenti parte dello Spool Piece: la misura del grado di vuoto con la sonda capacitiva, il flusso della quantità di moto con il tubo di Pitot e la velocità della fase vapore con il Vortex.

Prova	Portata [kg/s]	P sonda [bar]	Titolo [-]	GdV sp. [-]	GdV teo. [-]	GdV Err. [%]	Segnale Pitot [V]	M sp. [Pa]	M corretto [Pa]	Segnale Vortex [V]	Velocità vapore [m/s]
134	0.132	1.17	0.841	1.02	0.986	3.01	1.106	530	715.13	2.87	32.51
130	0.133	1.18	0.933	1.00	0.991	0.88	1.14	700	849.6	3	34.51
135	0.132	2.1	0.825	1.01	0.983	2.26	1.03	150	414.55	1.97	18.68
131	0.133	2.35	0.917	1.01	0.989	2.50	1.04	200	454.1	1.98	18.83
136	0.132	3	0.815	0.99	0.981	0.74	1.01	50	335.45	1.6	12.99
137	0.132	4	0.806	0.97	0.978	-0.58	1	0	295.9	1.45	10.69
125	0.183	1.27	0.760	0.93	0.982	-5.01	1.19	950	1047.35	3.26	38.51
117	0.183	1.3	0.955	1.01	0.993	1.60	1.29	1450	1442.85	3.64	44.35
121	0.185	1.3	0.847	1.00	0.986	1.80	1.24	1200	1245.1	3.43	41.12
126	0.183	2.16	0.744	0.97	0.979	-0.46	1.08	400	612.3	2.23	22.68
127	0.183	3.13	0.732	0.96	0.976	-1.49	1.04	200	454.1	1.76	15.45
128	0.183	4.1	0.723	0.96	0.973	-1.48	1.01	50	335.45	1.55	12.22
109	0.234	1.375	0.723	1.01	0.980	2.54	1.32	1600	1561.5	3.56	43.12
105	0.233	1.4	0.796	1.01	0.984	2.96	1.36	1800	1719.7	3.73	45.73
113	0.234	1.4	0.762	0.96	0.982	-1.84	1.36	1800	1719.7	3.64	44.35
101	0.233	1.44	0.873	1.02	0.988	3.63	1.42	2100	1957	3.85	47.57
102	0.233	2.2	0.862	1.00	0.987	1.56	1.23	1150	1205.55	2.85	32.20
106	0.233	2.3	0.782	1.00	0.982	2.15	1.19	950	1047.35	2.68	29.59
110	0.234	2.3	0.706	0.99	0.977	1.26	1.15	750	889.15	2.44	25.90
107	0.233	3.1	0.773	0.98	0.980	-0.09	1.11	550	730.95	2.05	19.91
115	0.234	3.1	0.737	0.95	0.978	-2.54	1.09	450	651.85	2.03	19.60

Tabella 11: Segnali Spool Piece

La tabella 11 invece, mostra alcune grandezze secondarie ricavate a partire dalle misura dello spool piece:

- ρ_v : densità del vapor saturo.
- ρ_L : densità liquido saturo.
- ρ_{sp} : densità media della miscela calcolata con l'Eq.(20) a partire dal grado di vuoto sperimentale.
- ρ_{teo} : densità media della miscela calcolata con l'Eq (20) a partire dal grado di vuoto teorico.
- S_{sp} : slip factor calcolato con l'Eq. (23).
- S_{teo} : slip factor teorico calcolato con l'Eq.(24) a partire dai valori di grado di vuoto e titolo teorici.
- V_{sp} : velocità della fase liquida sperimentale calcolata con l'Eq. (21).

- V_l teo: velocità della fase liquida teorica calcolata con l'Eq.(21) a partire dalla velocità della fase vapore e lo slip factor teorici.
- V_{vap} teo: velocità della fase vapore teorica.

Prova	portata [kg/s]	Psonda [bar]	rhoV [kg/m ³]	rhoL [kg/m ³]	rho sp. [kg/m ³]	rho teo. [kg/m ³]	errore %	S sp. [-]	S teo [-]	VI sp. [m/s]	VI teo [m/s]	V vap teo [m/s]
134	0.132	1.17	0.68	955.41	0.68	14.44	-95.27	-	107.8	-	0.30	32.293
130	0.133	1.18	0.69	955.23	0.69	9.06	-92.39	-	170.0	-	0.21	35.817
135	0.132	2.1	1.18	941.68	1.18	17.05	-93.07	-	64.5	-	0.28	18.335
131	0.133	2.35	1.31	938.70	1.31	11.28	-88.36	-	84.4	-	0.22	18.473
136	0.132	3	1.65	931.81	12.72	19.44	-34.56	5.6	48.4	2.33	0.27	12.962
137	0.132	4	2.16	922.88	27.27	22.02	23.89	7.2	39.1	1.49	0.25	9.787
125	0.183	1.27	0.74	953.65	65.08	18.22	257.15	59.8	76.6	0.64	0.49	37.497
117	0.183	1.3	0.75	953.14	0.75	7.41	-89.82	-	187.8	-	0.25	46.079
121	0.185	1.3	0.75	953.14	0.75	13.91	-94.58	-	97.8	-	0.42	41.308
126	0.183	2.16	1.21	940.94	25.31	21.11	19.91	52.9	48.8	0.43	0.46	22.335
127	0.183	3.13	1.72	930.55	37.56	24.09	55.89	12.0	36.6	1.29	0.42	15.520
128	0.183	4.1	2.21	922.07	40.19	26.96	49.08	17.6	30.0	0.69	0.40	11.890
109	0.234	1.375	0.80	951.89	0.80	19.69	-95.96	-	63.2	-	0.67	42.312
105	0.233	1.4	0.81	951.49	0.81	16.20	-95.01	-	75.8	-	0.60	45.663
113	0.234	1.4	0.81	951.49	35.03	17.89	95.87	19.0	68.9	2.33	0.64	43.869
101	0.233	1.44	0.83	950.85	0.83	12.44	-93.33	-	97.2	-	0.50	48.737
102	0.233	2.2	1.23	940.46	1.23	13.85	-91.09	-	64.7	-	0.50	32.369
106	0.233	2.3	1.29	939.28	1.29	18.45	-93.03	-	48.9	-	0.58	28.177
110	0.234	2.3	1.29	939.28	11.18	22.72	-50.78	13.8	41.0	1.87	0.62	25.553
107	0.233	3.1	1.70	930.84	21.18	20.33	4.21	10.5	38.1	1.90	0.55	21.048
115	0.234	3.1	1.70	930.84	45.58	22.54	102.26	24.3	35.2	0.81	0.57	20.163

Tabella 12: Grandezze ricavate

Come detto, l'errore sulla stima della densità media della miscela è molto alto, mediamente dell'80%. I punti in cui non compare lo slip factor e la velocità della fase liquida sperimentale sono quelli in cui il grado di vuoto misurato dalla sonda capacitiva è maggiore o uguale a uno.

La tabella 12 riporta, per ogni punto sperimentale, i valori di portata massica sperimentale ($m_{sp.}$), calcolata con L'Eq (27), la portata massica teorica ($m_{teorico}$) misurata con il Coriolis e la portata massica calcolata considerando tutte le misure effettuate con lo spool piece a parte quella della sonda capacitiva.

Prova	Portata [kg/s]	P sonda [bar]	Titolo [-]	m sp. [kg/s]	m teo. [kg/s]	m senza sonda [kg/s]	Errore m [%]	Errore m senza sonda [%]
134	0.132	1.17	0.841	0.112	0.130	0.110	-14.129	-15.366
130	0.133	1.18	0.933	0.120	0.132	0.118	-9.333	-10.128
135	0.132	2.1	0.825	0.111	0.130	0.109	-14.508	-15.951
131	0.133	2.35	0.917	0.124	0.132	0.123	-5.550	-6.554
136	0.132	3	0.815	0.236	0.129	0.314	82.520	142.751
137	0.132	4	0.806	0.301	0.129	0.262	133.140	103.145
125	0.183	1.27	0.760	0.342	0.180	0.197	90.232	9.609
117	0.183	1.3	0.955	0.168	0.182	0.167	-7.460	-8.107
121	0.185	1.3	0.847	0.156	0.182	0.154	-14.535	-15.716
126	0.183	2.16	0.744	0.187	0.179	0.178	4.250	-0.468
127	0.183	3.13	0.732	0.361	0.179	0.276	102.242	54.319
128	0.183	4.1	0.723	0.263	0.178	0.219	47.867	22.956
109	0.234	1.375	0.723	0.172	0.229	0.169	-24.872	-26.364
105	0.233	1.4	0.796	0.186	0.229	0.183	-18.920	-20.233
113	0.234	1.4	0.762	0.576	0.230	0.378	150.493	64.288
101	0.233	1.44	0.873	0.199	0.230	0.196	-13.746	-14.800
102	0.233	2.2	0.862	0.200	0.230	0.197	-13.082	-14.250
106	0.233	2.3	0.782	0.191	0.229	0.188	-16.327	-17.858
110	0.234	2.3	0.706	0.259	0.229	0.366	13.332	60.033
107	0.233	3.1	0.773	0.353	0.228	0.345	54.625	51.111
115	0.234	3.1	0.737	0.338	0.229	0.249	47.899	8.727

Tabella 13: portata massica

In Figura 53 sono riassunti i risultati.

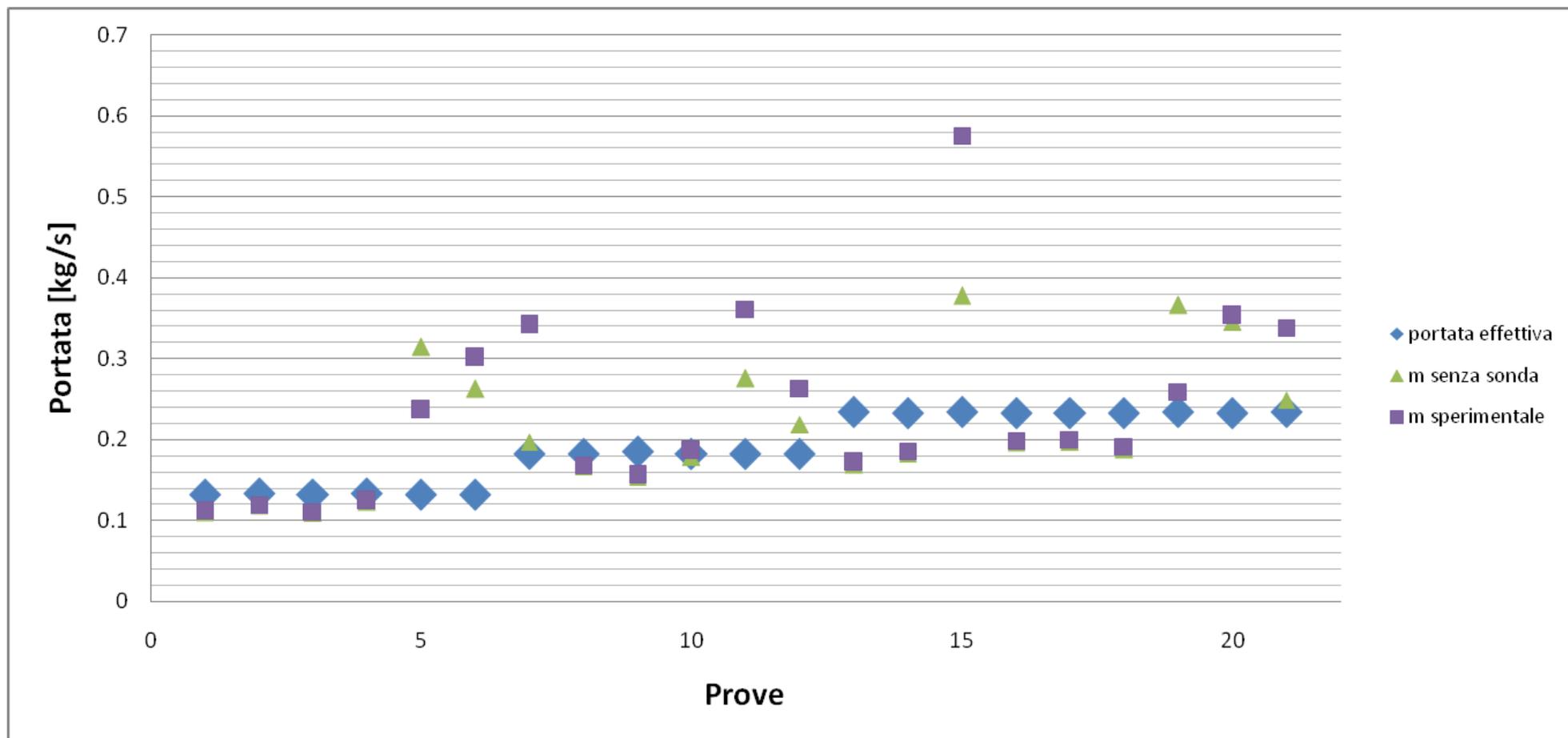


Figura 53: Portata effettiva, teorica, sperimentale

L'errore medio commesso sulla misura della portata massica bifase è dell'ordine del 40% rispetto al valore nominale. Considerando i valori di grado di vuoto teorici, l'errore medio sulla portata massica si abbassa al 32%. L'errore, come si può vedere dai grafici 54 e 55, non è correlabile al titolo né alla pressione ma è fortemente legato, come detto in precedenza, all'errore sulla stima del grado di vuoto.

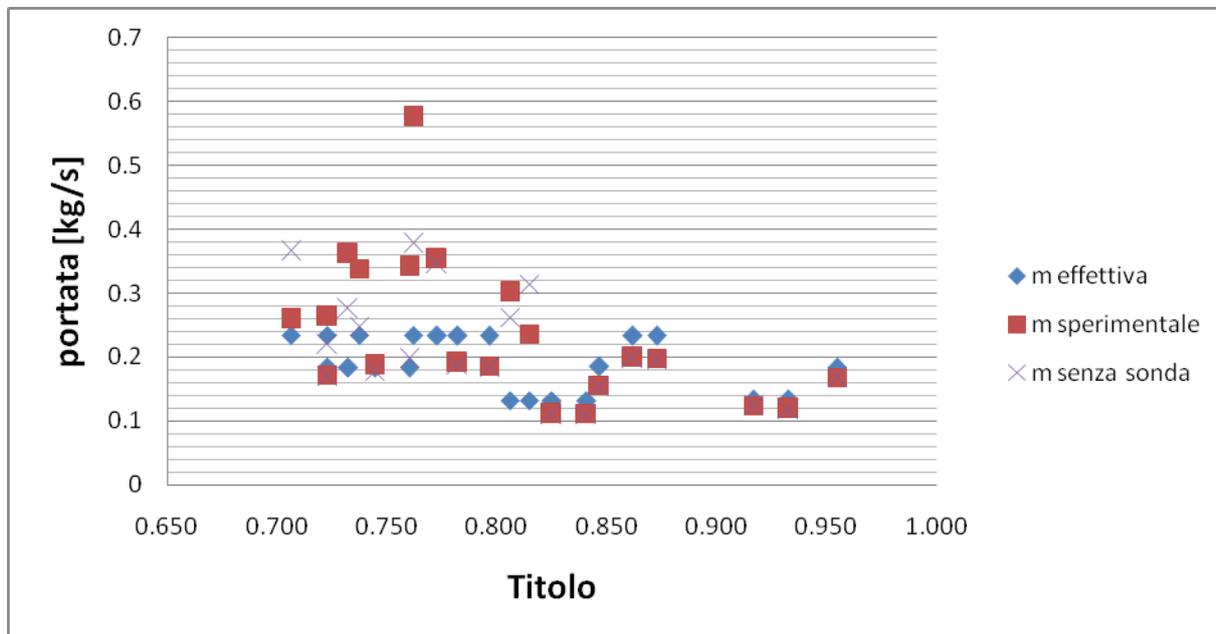


Figura 54: portata [kg/s] vs titolo

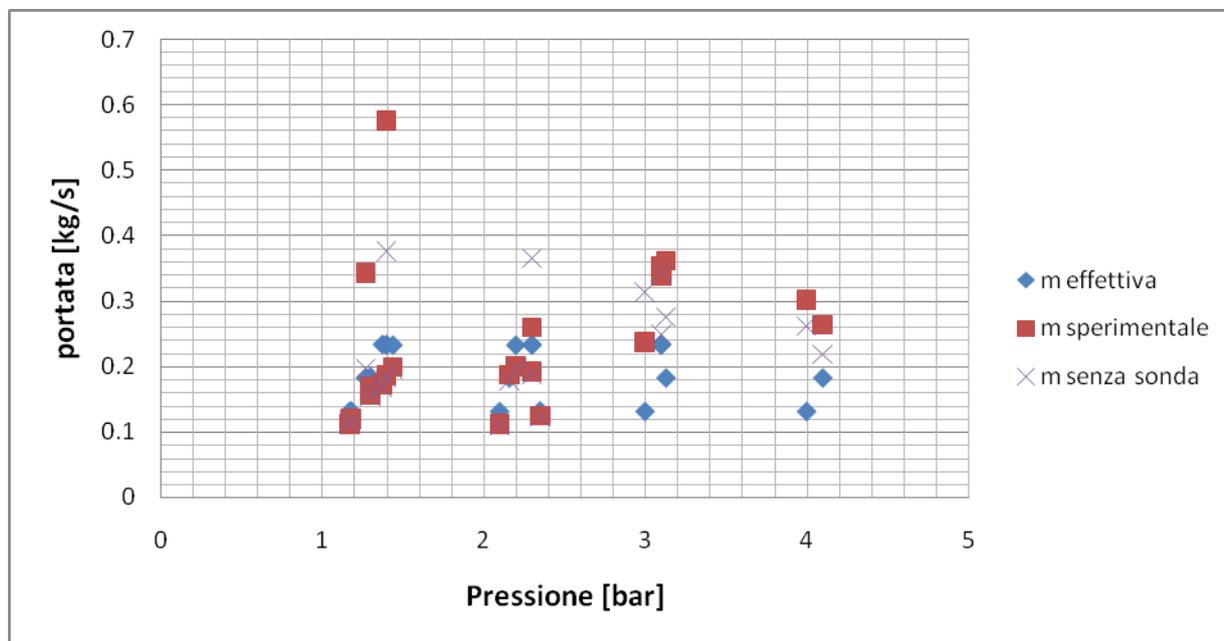
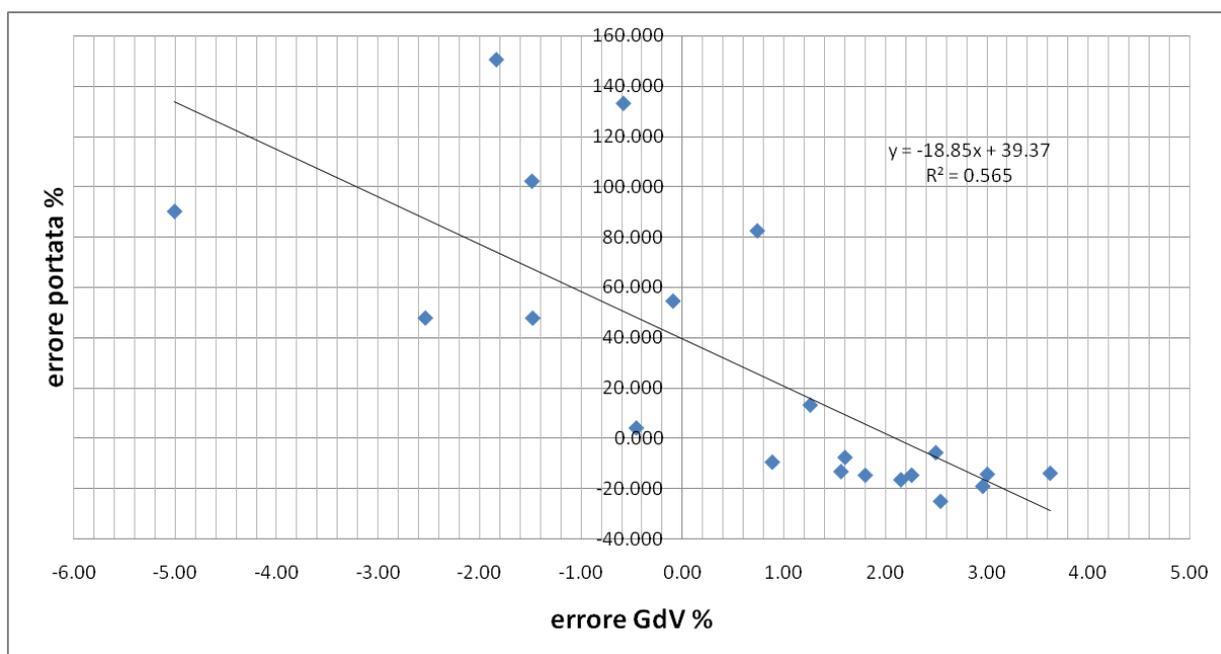


Figura 55: portata [kg/s] vs pressione [bar]

La Figura 56, mostra l'errore sulla stima della portata bifase in funzione dell'errore sulla misura del grado di vuoto. Per errori del 3-4 % sulla stima del grado di vuoto, l'errore sulla stima della portata può variare dal 20 al 100%



Infine, nella tabella 13, si riportano i valori massimi e minimi delle principali grandezze termoidrauliche a valle delle valvole di rottura dell'impianto SPES-3 e i valori delle stesse grandezze raggiunti durante i test sulla strumentazione speciale.

Grandezze termoidrauliche	unità di misura	linee di rottura SPES-3		sperimentazione PAR 2012	
		Min	Max	Min	Max
Temperatura	[°C]	36	216	99.6	144.5
Pressione	[bar]	1	20	1	4.1
Grado di vuoto	[%]	0.93	1	0.93	1
Flusso della quantità di moto	[Pa]	0	900700	0	1600
Velocità fase vapore	[m/s]	0	400	0	48
Portata bifase	[kg/s]	0	4.5	0	0.277

Tabella 14: Massimi e minimi valori grandezze termoidrauliche

9. CONCLUSIONI

La misura della portata massica bifase nelle linee di rottura dell'impianto SPES-3 sarà effettuata con l'ausilio di un set eterogeneo di strumenti chiamato Spool Piece. Le misure necessarie per stimare la portata massica bifase sono tre: la misura di grado di vuoto, la misura di flusso della quantità di moto e la misura di velocità della fase vapore.

L'obiettivo dell'attività prevista nel PAR 2012 consisteva nella messa a punto finale della strumentazione speciale.

Lo spool piece è stato integrato con uno strumento per la misura della velocità della fase vapore, un flussimetro a generazione di vortici.

La sperimentazione finale sullo spool piece è stata realizzata su un impianto in grado di erogare vapore con potenze termiche dell'ordine di alcune centinaia di kW. Sono stati effettuati test con portate comprese tra 0.133 e 0.233 [kg/s], pressioni comprese tra 1 e 4 [bar] e titoli compresi tra 0.7 e 1.

Le prove hanno messo in evidenza alcune problematiche relative sia alla strumentazione che al modello matematico per il calcolo della portata bifase.

In primo luogo il drag disk, lo strumento realizzato presso i laboratori SIET per misurare il flusso della quantità di moto, si è rivelato essere poco sensibile alle variazioni di pressione cinetica del fluido. Questo perché, il segnale efficace del drag disk risulta, per i bassi flussi della quantità di moto generati, dell'ordine dell'1% del fondo scala dello strumento (20 kg).

Per questo motivo si è deciso di ripetere la campagna sperimentale sostituendo il drag disk con un tubo di Pitot collegato ad un trasmettitore differenziale di pressione. Questo sistema si è rivelato essere più sensibile e ha dato risultati soddisfacenti. L'errore medio sulla misura del flusso della quantità di moto è dell'ordine dell'8% rispetto al valore nominale.

Il sistema basato sul drag disk potrà essere comunque utilizzato nelle prove previste sull'impianto SPES-3. I flussi di quantità di moto maggiori, previsti nelle simulazioni dei transitori incidentali, faranno diminuire il rapporto disturbo/segnale dello strumento.

Tuttavia, il posizionamento del Tubo di Pitot a monte della sonda capacitiva ha generato dei problemi sulla misura del grado di vuoto. Il tubo di Pitot infatti, nonostante le modeste dimensioni, disturba il flusso della miscela bifase generando regimi di moto non uniformi. La non uniforme distribuzione delle fasi all'interno del volume di controllo della sonda capacitiva provoca forti errori sulla stima del grado di vuoto. Per questa ragione si è deciso di estrapolare i gradi di vuoto nelle diverse prove sperimentali, dalle misure precedentemente effettuate nella prima campagna sperimentale.

Il vortex invece ha fornito delle misure soddisfacenti con un errore medio dell'ordine del 2.5%.

La portata bifase calcolata a partire dalle misure degli strumenti dello spool piece presenta un errore dell'ordine del 40%. Nonostante gli strumenti facenti parte dello spool piece siano abbastanza precisi, il modello numerico risulta estremamente sensibile alle variazioni di densità media della miscela. Errori dell'ordine del 2% sulla misura del grado di vuoto, generano errori dell'ordine del 100% sulla stima della densità media di miscela.

Per migliorare la misura di portata bifase, in futuro, sarà necessario:

- Spostare il tubo di Pitot a valle della sonda capacitiva per evitare che disturbi il flusso.
- Per migliorare la misura della sonda capacitiva si potrebbe inserire un ulteriore elettrodo, disposto all'interno del contenitore ma distante dalla zona di influenza degli elettrodi periferici per depurare in tempo reale il segnale degli elettrodi di effetti parassiti dovuti alle condizioni ambientali.
- Effettuare la caratterizzazione del segnale degli elettrodi in funzione della conducibilità dell'acqua utilizzata nei test.
- Effettuare test con valori di flusso della quantità di moto più elevati.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] SIET document 01 489 RT 09 Rev.0: SPES3-IRIS facility RELAP5 base case transient analyses for design support, April 2009.
- [2] SIET document 01 423 RT 08 Rev.0: SPES3-IRIS facility nodalization for RELAP5 Mod.3.3 code and steady state qualification, January 2009.
- [3] SIET document 01 525 ST 09 Rev.0: SPES3 - Two-phase Mass Flow Measurements: Technical Specifications, July 2010.
- [4] SIET document 01 605 ST 10 Rev.0: Strumentazione speciale per l'impianto sperimentale SPES3, July 2010.
- [5] SIET document 01 572 ST 09 Rev.0: SPES3 - Two-phase Mass Flow Measurements for SPES3 facility: Spool piece mathematical correlations, July 2010.
- [6] SIET document 01 651 ST 10 Rev.0: Progettazione di una sonda capacitiva per la misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscele bifase aria-acqua, 24/09/2010.
- [7] SIET document 01 768 ST 11 Rev.0: Progettazione, sviluppo e prove di sonde capacitive per la misurazione del grado di vuoto 12/09/2011.
- [8] SIET document 01 877 RT 12 Rev.0: Spool piece per la misura di portata di fluido bifase: misura di quantità di moto e di velocità, 31 luglio 2012.
- [9] SIET document 01 876 RP 12 Rev.0: Prove a caldo di una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto in miscela bifase, Agosto 2012.
- [10] N.Zuber, J. Findlay – Average volumetric concentration in two –phase flow system – Journal Heat Transfert, Trans. ASME C, Vol. 87, 1965.
- [11] Carlo Lombardi - Impianti Nucleari, Cusl, aprile 2004.

Taratura portata con aggiustamento

10602421-3019283

44036892

Numero d'ordine

IT-3004995314-10 / Endress+Hauser Flowtec AG

Numero d'ordine produzione/Fabbricante

72F80-SE0AA1AAA4AW

Codice d'acquisto strumento

PROWIRL 72 F DN80

Trasmettitore/Sensore

H4139B02000

Numero di serie

-

Tag N°

FCP-7.1.4

Banco di taratura

38.39436 dm³/s (± 100%)

Taratura fondo scala

Interfaccia service

Uscita tarata

2.8484 Imp./dm³

Fattore di taratura

23.8 °C

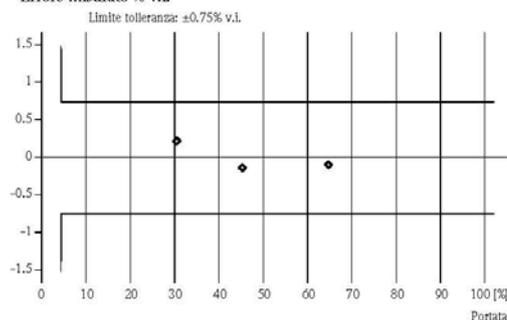
Temperatura acqua

Portata [%]	Portata [dm ³ /s]	Durata [s]	V teorico [dm ³]	V misurato [dm ³]	Δ v.i.* [%]	Usc.** [mA]
30.1	11.6	35.1	405.754	406.668	0.23	8.83
45.1	17.3	30.0	519.774	519.081	-0.13	11.20
64.5	24.8	30.1	744.584	743.900	-0.09	14.31
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

*v.i.: del campo

**Valore calcolato (4 - 20 mA)

Errore misurato % v.i.



Vedere il capitolo "Prestazioni", della specifica tecnica (TI), per i dati relativi alle specifiche di uscita del dispositivo in prova.

E' garantita la tracciabilità secondo gli standard nazionali di tutti gli strumenti di prova impiegati per la taratura.

I centri di taratura accreditati di Endress+Hauser Flowtec di Reinach (CH), Cernay (FR), Greenwood (USA), Aurangabad (IN) e Suzhou (CN) operano secondo ISO/IEC 17025.

15.05.2013

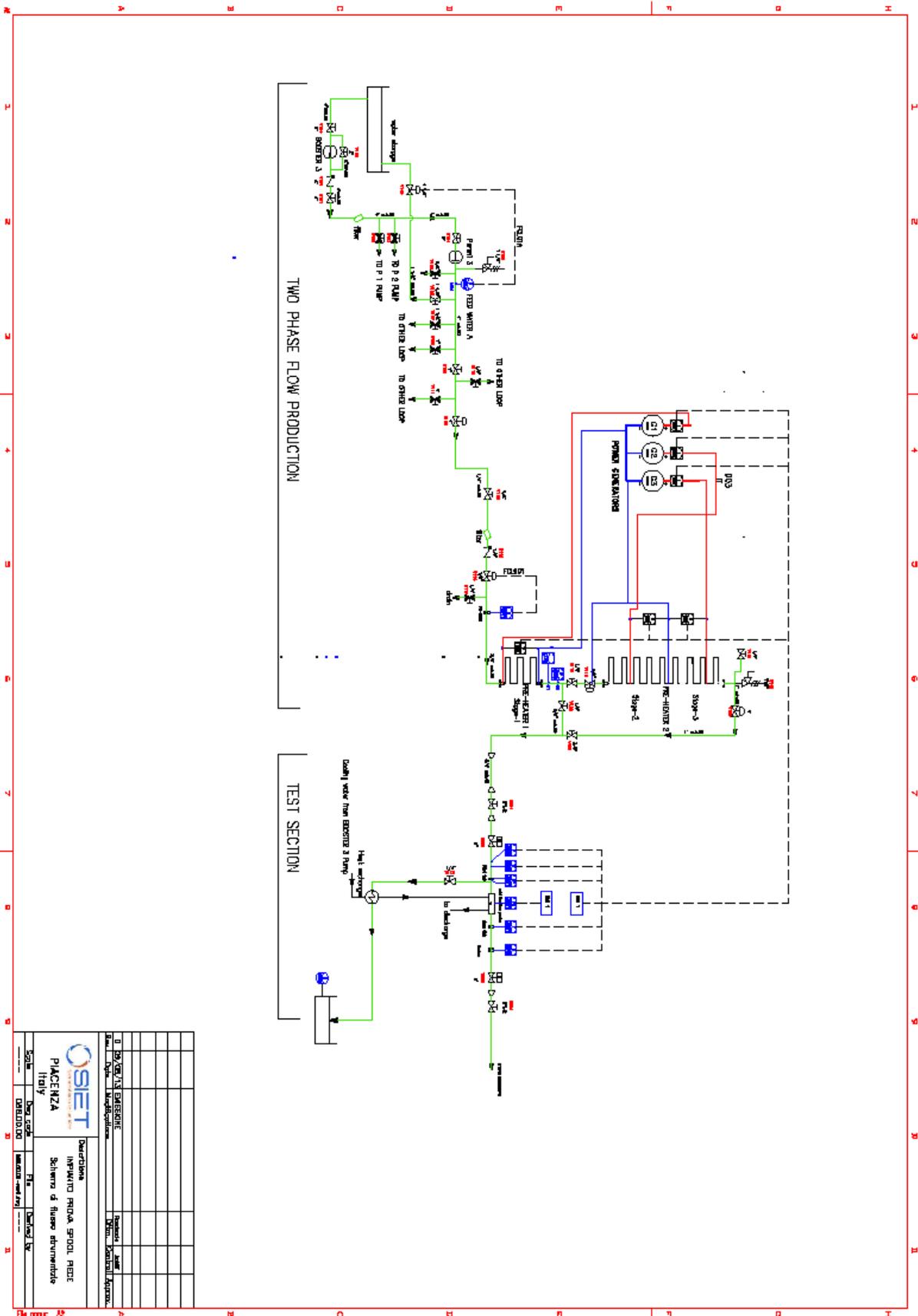
Data di taratura

Endress+Hauser Flowtec AG
Kägenstrasse 7 / Rue de l'Europe 35
CH-4153 Reinach / F-68700 Cernay

M. Mancuso

Operatore

Certificato secondo
ISO 9001



		Descrizione: Impianto PIPA SPOL. PIETRE Schema di flusso strumentale	
Nome: _____ Data: _____ Verificato da: _____	Disegnato da: _____ Verificato da: _____ Data: _____	Progettato da: _____ Verificato da: _____ Data: _____	Approvato da: _____ Verificato da: _____ Data: _____