

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica

Dipartimento di Energia



ANALISI SPERIMENTALE DELLE CARATTERISTICHE FLUIDODINAMICHE DI FLUSSI BI E TRIFASE IN CONDOTTI A SEZIONE VARIABILE

Relatore: Prof. Luigi P.M. Colombo

Correlatore: Prof. Giorgio M. Sotgia

Tesi di Laurea di:

Barki Simone, 817213

D'Angella Giovanni, 819130

Anno Accademico 2014-2015

RINGRAZIAMENTI

I miei più sentiti ringraziamenti vanno ai miei familiari ed in particolare ai miei genitori ed ai miei nonni che mai hanno smesso di incitarmi a fare meglio durante il mio percorso scolastico.

Un grazie speciale va ai miei fratelli.

Ringrazio tutti i Professori e gli Autori che sono stati in grado di trasmettermi la passione per la scienza ed in particolare per la fisica durante le lezioni e le letture.

Ringrazio i Professori Luigi Colombo e Giorgio Sotgia che mi hanno accompagnato ed hanno risposto attentamente ai miei quesiti con grande professionalità durante il mio percorso come tesista e studente.

INDICE DEI CONTENUTI

SOMMARIO	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUZIONE	11
1.1 OBIETTIVI	11
1.2 LETTERATURA FLUSSI BIFASE ACQUA-OLIO	11
1.3 RASSEGNA BIBLIOGRAFICA FLUSSI TRIFASE ACQUA-OLIO-ARIA	13
1.4 STRUMENTI DI MISURA IN USO	15
1.4.1 CORIOLIS FLOW METER	15
1.4.2 ELECTROMAGNETIC FLOW METER	16
1.4.3 VENTURI METER	16
1.5 SISTEMI DI MISURA COMBINATI	17
1.5.1 GAMMA RAY DENSITY METER	18
1.5.2 TEST SEPARATOR	18
2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO E PROCEDURE SPERIMENTALI	19
2.1 INTRODUZIONE	19
2.2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO	20
2.3 COMPONENTI IMPIANTO	22
2.3.1 MISURATORE DI PORTATA D'ACQUA (Water Magnetic Flow Meter)	22
2.3.2 MISURATORE PORTATA OLIO	24
2.3.3 MISURATORE PORTATA DI ARIA	25
2.3.4 MISURATORE DI TEMPERATURA	29
2.3.5 MISURATORE DI PRESSIONE	29
2.3.6 LINEE DI PRESSIONE	31
2.3.7 SISTEMA DI INIEZIONE FLUIDI	32
2.3.8 SISTEMA DI ACQUISIZIONE IMMAGINI	34
2.4 FLUIDI DI LAVORO	34
2.4.1 ACQUA	35

2.4.2 OLIO	35
2.4.3 ARIA	36
2.5 SEZIONE DI PROVA	37
2.5.1 TUBO DI VENTURI	38
2.5.2 BOCCAGLIO	39
2.6 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI	40
2.7 PROCEDURA DI ESECUZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI	42
2.7.1 ACCORGIMENTI ED OSSERVAZIONI	44
2.7.2 TEMPO DI DURATA DELLE PROVE	45
2.8 GRANDEZZE FISICHE RICORRENTI	46
3. FLUSSO BIFASE ACQUA-ARIA	48
3.1 TEST AL TRATTO CONVERGENTE DEL VENTURIMETRO	50
3.2 TEST AL TRATTO DIVERGENTE DEL VENTURIMETRO	55
3.3 CAMPAGNA CADENTE DI VALLE	57
3.4 CONFRONTO CON IL MODELLO DI LOCKHART-MARTINELLI	58
3.5 CAMPAGNA FOTOGRAFICA	62
4. FLUSSO BIFASE ACQUA-OLIO	66
4.1 CAMPAGNA BOCCAGLIO	66
4.2 CAMPAGNA CADENTE DI VALLE	69
4.3 CONFRONTO VENTURI-BOCCAGLIO	70
4.5 DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DELLE SINGOLE FASI	71
4.6 CAMPAGNA FOTOGRAFICA	73
5. FLUSSO TRIFASE ACQUA-OLIO-ARIA	78
5.1 INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA SPERIMENTALE	78
5.2 CAMPAGNA BOCCAGLIO	79
5.3 CAMPAGNA CADENTE DI VALLE	83
5.4 CAMPAGNA FOTOGRAFICA	91
5.5 LIMITI E PROBLEMATICHE LEGATE ALLA DETERMINAZIONE DELLA PORTATA TOTALE	96
6. CONCLUSIONI	97

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1- SEZIONE DI IMPIANTO PRINCIPALE PER LA CAMPAGNA DEL VENTURI	20
Figura 2.2-SCHEMA D'IMPIANTO E COMPONENTI PRINCIPALI	21
Figura 2.3-FLUSSIMETRO, POMPA, VALVOLA, REGOLATORE DI PORTATA E SERBATOIO DELL'ACQUA SULLO SFONDO	22
Figura 2.4-SCHEMATIZZAZIONE FLUSSIMETRO MAGNETICO	22
Figura 2.5-POMPA DOSATRICE E VOLANTINO DI REGOLAZIONE DELLA PORTATA	24
Figura 2.6-CURVA DI TARATURA DEL VOLANTINO DI REGOLAZIONE	25
Figura 2.7-ASAMETRO MODELLO E5-2600/H	26
Figura 2.8-SCHEMA PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	26
Figura 2.9-SETRA TRANSDUCER C230	29
Figura 2.10-CURVA DI TARATURA DEL TRASDUTTORE DI PRESSIONE SETRA	31
Figura 2.11-COLLETTORE PRESE DI PRESSIONE	31
Figura 2.12-SISTEMA DI INIEZIONE FLUIDI DI LAVORO	33
Figura 2.13-DISEGNO TECNICO DELL'INTRODOTTORE (MISURE ESPRESSE IN mm)	33
Figura 2.14-VENTURIMETRO DOTATO DEL SISTEMA DI SPECCHI DURANTE L'ACQUISIZIONE DELLE FOTOGRAFIE	34
Figura 2.15-CURVA VISCOSITA' DELL'OLIO IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA ED EFFETTO DELL'INVECCHIAMENTO	36
Figura 2.16-SCHEMA D'IMPIANTO	38
Figura 2.17-SCHEMA VENTURI E COLLEGAMENTI PRESE DI PRESSIONE	39
Figura 2.18- SCHEMA BOCCAGLIO E COLLEGAMENTI PRESE DI PRESSIONE	40
Figura 2.19-PROCESSO DI ACQUISIZIONE DATI	40
Figura 2.20-INTERFACCIA GRAFICA DEL SOFTWARE LABVIEW® DIMOSTRATIVA	41
Figura 3.1-REGIMI ACQUA-ARIA IN CONDOTTO ORIZZONTALE A SEZIONE CIRCOLARE	48
Figura 3.2-MAPPA DI FLUSSO ACQUA-ARIA PROPOSTA DA MANDHANE	49
Figura 3.3-CADUTE DI PRESSIONE AL TRATTO CONVERGENTE REGistrate IN FUNZIONE DELLA VELOCITA' SUPERFICIALE TOTALE	51
Figura 3.4-TEST DI RIPETIBILITA' PER LE CADUTE DI PRESSIONE AL TRATTO CONVERGENTE E $Jw = 0,450 - 0,899 - 1,332 [m/s]$	52
Figura 3.5-ANDAMENTO MEDIO DELLE CADUTE DI PRESSIONE AL TRATTO CONVERGENTE	53
Figura 3.6-PARITY PLOT	54
Figura 3.7- PROFILO DI PRESSIONE NEL VENTURI	55
Figura 3.8-TEST DI CADUTA DI PRESSIONE AL TRATTO DIVERGENTE PER $Jw = 0,668 -$ $0,899 - 1,107 - 1,332 [m/s]$	56
Figura 3.9-ANDAMENTO MEDIO TEST AL DIVERGENTE	56
Figura 3.10-RETTE INTERPOLANTI LE CADUTE DI PRESSIONE TRA LE PRESE PER LE VALUTAZIONE DELLE CADENTI	57
Figura 3.11-ANDAMENTO CADENTI IN FUNZIONE DELLA PORTATA DI GAS LETTA ALL'ASAMETRO	58
Figura 3.12-PARITY PLOT	61

Figura 3.13-FLUSSO A MONTE DEL VENTURIMETRO A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,383 \text{ m/s}$	62
Figura 3.14- FLUSSO A MONTE DEL VENTURIMETRO A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,383 \text{ m/s}$	63
Figura 3.15- FLUSSO A MONTE DEL VENTURI A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,766 \text{ m/s}$	63
Figura 3.16- FLUSSO A MONTE DEL VENTURI A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,766 \text{ m/s}$	64
Figura 3.17- FLUSSO A MONTE DEL VENTURI A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 1,914 \text{ m/s}$	64
Figura 3.18- FLUSSO NEL VENTURI A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,383 \text{ m/s}$	65
Figura 3.19- FLUSSO NEL VENTURI A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 2,297 \text{ m/s}$	65
Figura 4.1-ANDAMENTO QUALITATIVO PRESSIONE LUNGO IL BOCCAGLIO	66
Figura 4.2-CADUTA AL CONVERGENTE DEL BOCCAGLIO IN FUNZIONE DELLA VELOCITA' SUPERFICIALE DELL'ACQUA J_w	67
Figura 4.3- CADUTA AL CONVERGENTE DEL BOCCAGLIO IN FUNZIONE DELLA VELOCITA' SUPERFICIALE TOTALE J_{tot}	67
Figura 4.4-PARITY PLOT	68
Figura 4.5- RETTE INTERPOLANTI LE CADUTE DI PRESSIONE TRA LE PRESE PER LE VALUTAZIONI DELLE CADENTI	69
Figura 4.6-CADENTE vs ϵ_w	69
Figura 4.7-PARITY PLOT CONFRONTO DATI BOCCAGLIO E DATI VENTURI	70
Figura 4.8- PARITY PLOT DATI BOCCAGLIO	72
Figura 4.9- PARITY PLOT DATI VENTURI	72
Figura 4.10- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$ E $J_w = 1,332 \text{ m/s}$	73
Figura 4.11- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$ E $J_w = 0,899 \text{ m/s}$	74
Figura 4.12- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$ E $J_w = 0,450 \text{ m/s}$	74
Figura 4.13- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,248 \text{ m/s}$ E $J_w = 1,332 \text{ m/s}$	75
Figura 4.14- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,248 \text{ m/s}$ E $J_w = 0,899 \text{ m/s}$	75
Figura 4.15- FLUSSO NEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$ E $J_w = 0,450 \text{ m/s}$	76
Figura 4.16- FLUSSO NEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$ E $J_w = 0,899 \text{ m/s}$	77
/Figura 5.1-TEST CADUTE DI PRESSIONE AL BOCCAGLIO PER $J_o = 0,248 \text{ m/s}$	79
Figura 5.2- TEST CADUTE DI PRESSIONE AL BOCCAGLIO PER $J_o = 0,365 \text{ m/s}$	79
Figura 5.3- TEST CADUTE DI PRESSIONE AL BOCCAGLIO PER $J_o = 0,482 \text{ m/s}$	80
Figura 5.4- TEST CADUTE DI PRESSIONE AL BOCCAGLIO PER $J_o = 0,606 \text{ m/s}$	80
Figura 5.5- TEST CADUTE DI PRESSIONE AL BOCCAGLIO PER $J_o = 0,717 \text{ m/s}$	81
Figura 5.6-PARITY PLOT	82
Figura 5.7-PARITY PLOT PER $J_o = 0,482 \text{ [m/s]}$	82
Figura 5.8-CONFRONTO PARITY PLOT DATI BOCCAGLIO E DATI VENTURI	83
Figura 5.9- SCHEMA BOCCAGLIO E COLLEGAMENTI PRESE DI PRESSIONE	83
Figura 5.10-SEGNALE DURANTE TEST SULLE CADENTI A $J_o = 0,248 \text{ m/s}$ E $J_w = 0,450 \text{ m/s}$	84
Figura 5.11-CADENTE vs ϵ_g PER $J_o = 0,482 \text{ m/s}$	85
Figura 5.12-CADENTE vs ϵ_g PER $J_o = 0,248 \text{ m/s}$	85
Figura 5.13-CADENTE vs ϵ_g PER $J_o = 0,717 \text{ m/s}$	86
Figura 5.14-CADENTE vs ϵ_g , PROVA DI RIPETIBILITA' PER $J_o = 0,717 \text{ [m/s]}$ E $J_w = 1,332 \text{ [m/s]}$	87

Figura 5.15-CADENTE vs εg , PROVA DI RIPETIBILITA' PER $Jo = 0,717 m/s$ E $Jw = 0,668 [m/s]$	87
Figura 5.16-CADENTE vs $\varepsilon g l$	88
Figura 5.17-REGRESSIONE COEFFICIENTE C'	89
Figura 5.18- CADENTE vs $\varepsilon g l$	90
Figura 5.19- CADENTE vs $\varepsilon g l$	90
Figura 5.20- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $Jo = 0,717 m/s$, $Jw = 0,450 m/s$ E $Jg = 0,383 m/s$	91
Figura 5.21- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $Jo = 0,717 m/s$, $Jw = 0,450 m/s$ E $Jg = 0,766 m/s$	92
Figura 5.22- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $Jo = 0,717 m/s$, $Jw = 0,450 m/s$ E $Jg = 1,149 m/s$	92
Figura 5.23- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $Jo = 0,717 m/s$, $Jw = 0,899 m/s$ E $Jg = 1,149 m/s$	93
Figura 5.24- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $Jo = 0,306 m/s$, $Jw = 1,332 m/s$ E $Jg = 1,149 m/s$	93
Figura 5.25- FLUSSO ALL'INTERNO DEL BOCCAGLIO A $Jo = 0,717 m/s$, $Jw = 0,899 m/s$ E $Jg = 0,383 m/s$	94
Figura 5.26-FLUSSO ALL'INTERNO DEL BOCCAGLIO A $Jo = 0,717 m/s$, $Jw = 0,899 m/s$ E $Jg = 0,957 m/s$	95
Figura 5.27-FLUSSO ALL'INTERNO DEL BOCCAGLIO A $Jo = 0,717m/s$, $Jw = 0,899m/s$ E $Jg = 1,149m/s$	95
Figura 5.28-CADUTE DI PRESSIONE BIFASE E TRIFASE AL BOCCAGLIO	96
Figure 6.1-PARITY PLOT CADUTE DI PRESSIONE NEL TRATTO CONVERGENTE DEL VENTURIMETRO PER FLUSSO BIFASE ACQUA-ARIA	97
Figure 6.2-PARITY PLOT CADUTE DI PRESSIONE NEL TRATTO CONVERGENTE DEL BOCCAGLIO PER FLUSSO BIFASE ACQUA-OLIO	98
Figure 6.3-PARITY PLOT: DATI SPERIMENTALI vs PREVISIONE MODELLO	99
Figure 6.4-PARITY PLOT CADUTE DI PRESSIONE NEL TRATTO CONVERGENTE DEL BOCCAGLIO PER FLUSSO TRIFASE ACQUA-OLIO-ARIA	100
Figure 6.5- CADENTE vs $\varepsilon g l$	100

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1-CARATTERISTICHE TRASDUTTORE DI PRESSIONE SETRA	30
Tabella 2.2-TABELLA DI TARATURA TRASDUTTORE DI PRESSIONE SETRA.....	30
Tabella 2.3-TABELLA DATI ACQUA.....	35
Tabella 2.4-TABELLA VISCOSITA' DELL'OLIO IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA	35
Tabella 2.5-TABELLA DATI ARIA.....	37
Tabella 2.6-TABELLA DURATA DELLE RELATIVE OPERAZIONI DURANTE LA PROVA.....	45
Tabella 3.1-VALORI DI VELOCITA' SUPERFICIALI INDAGATE.....	49
Tabella 3.2-COEFFICIENTI C PER VALUTAZIONE DEL FRICTION FACTOR MULTIPLIER	60
Tabella 3.3-ERRORI RELATIVI.....	61
Tabella 4.1-VALORI DI VELOCITA' SUPERFICIALE DI OLIO E ACQUA INDAGATE.....	66
Tabella 5.1-VELOCITA' SUPERFICIALI INDAGATE DURANTE LA CAMPAGNA TRIFASE	78
Tabella 5.2-VELOCITA' SUPERFICIALI INDAGATE DURANTE LA CAMPAGNA DI RIPETIBILITA' TRIFASE.....	86

SOMMARIO

Questo lavoro, svolto presso il laboratorio di Termofluidodinamica Multifase del Politecnico di Milano, presenta: risultati di alcune campagne sperimentali volte a caratterizzare le cadute di pressione per flussi bi e trifase in condotti ad area variabile anche al fine di verificare la possibilità di impiegarli come strumenti di misura della portata, in analogia a quanto avviene per flussi monofase. In particolare sono stati considerati venturimetri e boccagli. Sono stati presi in considerazione flussi bifase aria-acqua e acqua-olio, e flussi trifase aria-acqua-olio. Mentre per i primi le cadute di pressione nel tratto convergente sono risultate fortemente dipendenti dalla ripartizione delle fasi, per quanto riguarda i flussi acqua-olio e acqua-olio-aria, si è riscontrato un comportamento simile a quello descritto dal modello omogeneo. In particolare, per i flussi acqua-olio è stato possibile accoppiare il modello omogeneo ad un modello delle cadenti che ha permesso la determinazione della portata totale e della portata delle singole fasi con errori inferiori al 10%. Molto lavoro resta ancora da fare sulla caratterizzazione dei flussi trifase sebbene sia stato possibile correlare le cadenti alla frazione volumica di gas in un ampio intervallo di variazione delle velocità superficiali. Completa il lavoro un'ampia rassegna fotografica dei regimi di moto che potrebbe risultare molto utile anche alla validazione di simulazioni CFD dei flussi multifase.

Parole chiave: *flusso bifase liquido-liquido olio-acqua; flusso anulare; flusso trifase liquido-liquido-gas olio-acqua-aria; cadente di pressione; Tubo di Venturi; Venturimetro; Boccaglio.*

ABSTRACT

This work was carried out at Thermal Fluid Dynamic Multiphase Laboratory of Politecnico di Milano and shows the results of some experimental campaigns aimed at the characterization of the pressure drop in variable area ducts for two and three phase flows. In particular, it is investigated the possibility of adopting devices like Venturi flowmeters and nozzles to measure the flow rate of water-air, water-oil and water-oil-air mixtures as it is usually done for single-phase flows. Compared to the homogeneous model, the behaviour of the pressure drop in the converging length results highly dependent on the volume fractions for water-air flows. Conversely, for water-oil and water-oil-air flows deviations from the homogeneous model are limited within few percent. In particular, for water-oil mixtures, the adoption of separated flow model to predict the pressure gradient in the flow upstream/downstream the variable area device, enabled calculating the flow rates of each phase with about 10% average errors. On the other hand, extensive efforts are still required for the characterization of three-phase flows even though it was possible to establish an empirical correlation between the pressure gradient and gas-to-liquid volume fraction in a wide range of superficial velocity. Eventually, a photographic collection of flow regimes completes the work, which could be also very useful for the validation of prospective CFD simulations for multiphase flows.

Key words: *two-phase flow liquid-liquid oil-water; annular flow; three-phase flow liquid-liquid-gas oil-water-air; pressure gradient; Venturimeter; Nozzle; Boccaglio.*

1. INTRODUZIONE

1.1 OBIETTIVI

L'elaborato di seguito proposto ha come scopo la descrizione di uno studio sperimentale riguardante le caratteristiche del moto e del comportamento di flussi multifase in condotte orizzontali. Si analizzano miscele bifase, composte da una fase di acqua e una di olio altamente viscoso, e trifase, a cui si aggiunge aria alle due appena enunciate.

La ricerca in questo campo presenta una grande varietà di applicazioni, tuttavia la principale si identifica con l'industria dei giacimenti petroliferi. Il costante aumento del fabbisogno energetico mondiale mette in primo piano l'utilità di avere la migliore conoscenza possibile sui metodi di estrazione e di trasporto di una delle fonti energetiche più importanti e rilevanti dell'ultimo secolo. Durante questi processi il petrolio è presente assieme ad altri composti, principalmente gas (gas inerti, come anidride carbonica e azoto, idrocarburi come metano, etano, butano e propano e altri ancora) e acqua.

Risulta dunque di massima importanza possedere informazioni sulla composizione del flusso durante l'estrazione, al fine di conoscere in quale quantità le fasi sono presenti nella miscela.

Questa necessità è ormai ben nota nei settori d'interesse infatti nel corso degli anni sono stati progettati e sviluppati diversi sistemi di misura per identificare i flussi di materia nelle condotte.

1.2 LETTERATURA FLUSSI BIFASE ACQUA-OLIO

Mentre è presente tantissimo in letteratura per i flussi bifase gas-liquido, molto meno possiamo trovare per i flussi bifase acqua-olio.

L'attenzione nei confronti dei flussi bifase non miscibili nasce prevalentemente dall'attività di ricerca e sviluppo del settore petrolifero, in particolare per quanto riguarda la necessità di valutare le cadute di pressione all'interno degli oleodotti, quindi le potenze di pompaggio, e per garantire la stabilità operativa degli impianti. Articoli di notevole importanza sono pubblicati fin dagli anni 50 con il fine di definire mappe di flusso e i parametri principali che regolano il fenomeno

fisico [7] [14]. In seguito, con la nascita degli impianti nucleari, la ricerca ha diretto maggiormente la sua attenzione ai flussi bifase gas-liquido. Bisogna attendere gli anni 80 per assistere alla rinascita dell'interesse nei confronti dei flussi liquido-liquido ed in particolare sullo studio del regime anulare (CAF-Core Annular Flow) che risulta estremamente favorevole in termini di riduzione delle perdite di carico con effetto tanto maggiore quanto maggiore è il rapporto delle viscosità tra le fasi. Si è osservato che le medesime metodologie teoriche e sperimentali sviluppate per i sistemi bifase gas-liquido sono estendibili anche al caso liquido-liquido, a patto di valutare correttamente le differenze nel ruolo giocato dalle principali grandezze coinvolte [18]. Gran parte delle ricerche effettuate sono rivolte allo studio, al calcolo ed alla previsione delle cadute di pressione all'interno delle condotte [7] [15] [18] [2] [28] [30]. I numerosi regimi di moto che le miscele bifase liquido-liquido possono assumere sono stati oggetto di una estesa classificazione fin degli anni 60. Gli studi più recenti hanno riguardato tubi orizzontali, flussi ascendenti verticali e il loro principale scopo è stato quello di evidenziare l'intervallo di esistenza del regime CAF oltre che la caratterizzazione delle perdite di carico e la definizione di teorie come quella della lubrificazione idrodinamica proposta da *Ooms et al. (1984)*. L'interesse è stato focalizzato particolarmente sulle singolarità in quanto i tubi lisci a sezione costante sono necessariamente collegati ad altri apparati mediante flange o raccordi e quindi è stato necessario valutare la stabilità del regime CAF in queste particolari condizioni [3] [16] [36] [4] [31] [38]. Negli anni ancora più recenti, con l'avvento di sistemi di simulazione sempre più avanzati, la ricerca ha partorito alcuni studi per quanto riguarda le simulazioni CFD del CAF [12] [20].

Il laboratorio di Termofluidodinamica Multifase del Politecnico di Milano ha contribuito a queste ricerche con numerosi lavori di cui si riportano nel seguito alcuni risultati utili ai fini di questa tesi:

- *Colombo L.P.M., Guillizzoni M., Sotgia G.M.* [11]: in questo studio è stata analizzata la transizione critica dal flusso anulare a quello stratificato ondoso entro tubi orizzontali in Plexyglass® (diametri interni di 21-26-30-40-50 mm) ed in Pyrex® (diametri interni 21,5-28-40 mm). È stato elaborato uno studio in termini di fattore di riduzione delle perdite di carico ($R = \Delta p_o / \Delta p_{w-o}$) che mostra come la transizione critica riduca di molto e repentinamente questo fattore. Si arriva inoltre all'importante conclusione che esiste un valore della velocità della miscela oltre il quale il CAF è sempre stabile. In base a questi risultati sono state definite le condizioni operative delle campagne sperimentali relative ai flussi bifase acqua-olio, onde evitare l'istaurarsi dei regimi di moto stratificati,

caratterizzati da una cattiva riproducibilità delle misure e dunque non adatti allo scopo di questo lavoro;

- *Colombo L.P.M., Guillizzoni M., Sotgia G.M., Bortolotti S., Pavan L.* [9]: In questo articolo vengono misurate le frazioni in situ (holdup) di olio a valle di una brusca contrazione (contrazione di diametro 50-40 mm). È stato evidenziato che la contrazione non modifica sostanzialmente la struttura del flusso. Le misure di holdup hanno comprovato il comportamento del regime CAF per cui il core di olio viaggia più rapidamente rispetto la fase acqua, questo comportamento è esibito anche per il regime disperso nonostante ci si aspetterebbe una maggiore affinità al flusso omogeneo.

1.3 RASSEGNA BIBLIOGRAFICA FLUSSI TRIFASE ACQUA-OLIO-ARIA

Sono presenti ancora meno esempi sul flusso liquido-liquido-gas in letteratura. Un interesse generale è quello di osservare e studiare come il CAF viene disturbato dalla fase gassosa e quindi valutare gli effetti della presenza della nuova fase all'interno del flusso. Questo interesse nasce dal fatto che per molte realtà industriali la presenza della fase gassosa è imprescindibile. La presenza del gas gioca spesso un ruolo negativo sulla dinamica del flusso, come documentato da *Açikgoz et al (1992)* [1] e *Banwart et al. (2004)* [5]. Infatti il disturbo indotto dalle “elongated bubbles” sulla stabilità del CAF può sfociare in un drammatico incremento delle perdite di carico per contatto dell'olio alla parete. *G.F. Hewitt et al. (1995)* [18] intitolano un loro lavoro “*Three Phase Liquid-Liquid-Gas Flows: a new Challenge*” dove è esposta una estesa letteratura a riguardo. Lavori di impronta teorica sono limitati al caso di regime stratificato poiché permette una più facile trattazione, *Taitel et al. (1995)* [37], *Khor et al. (1997)* [21], *Hanich and Thompson (2001)* [17]. *Bonizzi and Issa (2003)* [6] propongono un modello numerico basato su due fluidi, considerando un liquido equivalente (acqua-olio) e la fase gas. D'altra parte, questo regime di moto è un caso specifico che non è sempre rappresentativo delle reali condizioni operative degli impianti industriali.

Dal punto di vista sperimentale sono presenti numerosi lavori che passano dall'utilizzo di oli da pochi milliPascal per secondo di viscosità a centinaia di Pascal per secondo. I diametri indagati variano da pochi millimetri a decine di centimetri con pareti interne a volte idrofobiche a volte idrofile. Si consiglia la visione dei lavori di *Açikgoz et al. (2002)*, *Stapelberg and Mewes (1994)*, *Hewitt*

et al. (1995), Nakamishi (1999) [25], Oddie et al. (2003) [26] e Bannwart et al. (2004).

Dalla letteratura deriva essere di fondamentale importanza la modalità d'introduzione dei fluidi di lavoro a tal punto che risulta difficile paragonare esperimenti eseguiti con introduttori sostanzialmente diversi. La progettazione di un introduttore, le modalità di introduzione così come la sequenza di iniezione delle fasi risulta infatti un aspetto rilevante nella gestione del trasporto della miscela. *Sotgia e Tartarini (2004) [35]* considerano attentamente le condizioni di introduzione dei fluidi in vista di una ottimizzazione sulla riduzione delle perdite di carico e mostrano gli effetti derivanti dall'utilizzo di diverse geometrie dell'introduttore stesso. Un'importante osservazione viene fatta da *Oddie et al. (2003)* dove gli autori riportano come sia di estrema importanza la modalità di ingresso delle fasi in parallelo. *Bannwart et al. (2004)* evidenzia come questo parametro sia fondamentale tanto per le campagne sperimentali di laboratorio quanto per le attività industriali. Numerose tipologie di introduttore per flussi acqua-olio-aria sono presentate in letteratura. *Stapelberg and Mewes (1994)* propongono un iniettore dotato di diaframmi in accordo con le densità dei fluidi che promuovono il moto stratificato. *Hewitt et al. (1995)* utilizza un sistema coassiale per cui il flusso di olio è introdotto nella sezione centrale mentre tramite due sezioni semicircolari separate da un diaframma sono introdotte le fasi acqua e aria. Questo sistema permette lo sviluppo sia del moto anulare che stratificato. Anche *Chen and Guo (1990) [8], Nakamishi (1999), Oddie et al. (2003)* adottano specifici disegni per l'introduttore. Spesso però mancano le modalità di introduzione lasciando pensare che la sequenza di introduzione delle fasi avvenga simultaneamente. Per quanto riguarda gli esperimenti esposti in questo scritto il disegno dell'introduttore e le modalità di iniezione dei fluidi sono descritti in maniera esaustiva nel capitolo introduttivo.

Come già menzionato c'è un ridotto numero di scritti riguardanti i flussi trifase e per quelli esistenti sono notevoli le differenze tra i parametri operativi:

- Diametri delle condotte: da un valore di 19 mm (*Açikgoz et al. (2002)*) a un valore di 150 mm (*Oddie et al. (2003)*);
- Rapporto lunghezza condotta e diametro: da un rapporto di 73 (*Oddie et al. (2003)*) fino a un valore di 3500 (*Bannwart et al. (2004)*);
- Viscosità dell'olio: varia da un valore prossimo a quello dell'acqua fino ad alcune migliaia di volte superiore (*Bannwart et al. (2004), Oliemans and Ooms (1986)*);

Il rapporto delle densità olio-acqua generalmente è compreso entro 0,8 e 1. Nella maggior parte dei lavori comunque si opera con velocità superficiali minori rispetto alle condizioni operative tipiche degli impianti industriali. Si rimanda agli scritti già menzionati per i valori precisi di velocità superficiali adottate dagli autori.

1.4 STRUMENTI DI MISURA IN USO

Uno studio portato avanti da Oddie e Pearson [27] fornisce e presenta una buona catalogazione degli strumenti di misura utilizzati per i flussi bifase. Esistono diverse classificazioni per questi ultimi, le quali possono dipendere ad esempio dal tempo di misura o dal fatto che siano o meno invasivi per il flusso.

Nel caso della seguente ricerca sperimentale la condotta ha una direzione orizzontale (dunque esiste perpendicolarità tra il vettore velocità media del flusso e quello della gravità) risulta inevitabile una stratificazione dovuta alle differenti densità e le relative tecniche di misura devono adattarsi a questa configurazione.

In seguito viene esposta una breve rassegna delle tecniche e degli strumenti per misurare le componenti dei flussi di interesse.

1.4.1 CORIOLIS FLOW METER

Questo strumento si basa sulla proporzionalità diretta che esiste tra momento torcente applicato sulla condotta e la portata massica del flusso.

$$I = 1/2 M \omega a^2 \quad (1)$$

Dove M è la portata in massa espressa in chilogrammi al secondo e a il braccio rotante.

$$M = 1/4 \pi \rho D^2 \quad (2)$$

Il fluido scorre in un tubo e possiede una velocità angolare ω (causa del momento torcente), dovuta alla vorticità del flusso. Si genera in questo caso una forza, detta di Coriolis, esprimibile dal seguente prodotto scalare:

$$F = \rho \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} \quad (3)$$

Dove \mathbf{u} è il vettore velocità.

I moderni misuratori di Coriolis sono molto precisi e non invasivi: infatti sono costituiti da piccoli circuiti elettrici posizionati sulla sezione di tubo scelta.

E' implicito nel funzionamento dello strumento che il flusso debba rimanere uniforme lungo tutto il percorso, e questo lo esclude dall'utilizzo in condotte con presenza di gas, sebbene sia molto utile nei casi di studio di miscele di tipo liquido-liquido.

1.4.2 ELECTROMAGNETIC FLOW METER

Un materiale che si muove con velocità \mathbf{u} in un campo magnetico \mathbf{B} provoca la generazione di una forza elettromotrice indotta secondo la formula

$$\mathbf{E} = \mathbf{u} \times \mathbf{B} \quad (4)$$

Il funzionamento del misuratore elettromagnetico si basa sul fatto che questa tensione sia non solo misurabile ma anche proporzionale alla velocità del flusso. Il modo migliore per fare ciò è usare un condotto isolato sul quale posizionare due elettrodi in posizione diametralmente opposta l'uno dall'altro. Questi consentono di misurare il campo elettrico indotto nel caso in cui il fluido in transito sia conduttivo.

$$\mathbf{i} = r(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (5)$$

La (5) mostra chiaramente l'espressione secondo cui è definita la corrente, dove r è la resistività.

N.B. Il fatto che ci sia necessità di avere un fluido in grado di condurre elettricità esclude dall'utilizzo questi strumenti nel caso in cui sia presente olio nella miscela (quest'ultimo infatti ha una conduttività molto bassa).

1.4.3 VENTURI METER

Il Venturimetro è uno strumento che viene installato in sostituzione di una parte di condotta. E' formato da un tratto convergente e un tratto divergente in rapida successione. E' necessaria la presenza di due prese di pressione statica posizionate all'ingresso e nella gola dello strumento. Grazie ad esse è possibile misurare la

caduta di pressione al tratto convergente (il successivo divergente assicura un recupero di pressione in modo da ridurre le perdite di carico globali).

Se il Venturi è dimensionato correttamente l'andamento del flusso si dovrebbe avvicinare alla condizione ideale e quindi sarebbe rappresentabile tramite il teorema di Bernoulli sulla conservazione dell'energia meccanica.

$$\frac{p}{\rho} + 1/2 u^2 + gz = \text{const.} \quad (6)$$

La caduta di pressione è ricavabile matematicamente dopo alcuni passaggi, tenendo conto che la portata volumetrica Q è definita come il prodotto tra la velocità e la sezione di passaggio.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho J_t^2 (\sigma^2 - 1) \quad (7)$$

Dove:

- J_t è la velocità superficiale totale, definita come rapporto tra la portata fluente Q e la sezione di passaggio della condotta;
- σ è il rapporto al quadrato tra l'area della condotta e quella della sezione di gola.

1.5 SISTEMI DI MISURA COMBINATI

Gli strumenti descritti fino ad ora sono progettati e adibiti per il funzionamento in flusso monofase. Risulta molto importante evidenziare alcuni fondamentali problemi che si presentano nel caso multifase:

- I fluidi in analisi non hanno la stessa densità e quindi è necessario valutare con attenzione come si comportano le proprietà della miscela in caso di non miscibilità;
- Le fasi non viaggiano alla stessa velocità: questo fatto comporta la possibile esistenza di una grande varietà di regimi di moto al variare dei parametri operativi;
- L'analisi valida per la densità vale anche per altre proprietà reologiche dei fluidi.

Osservando i tre punti enunciati, si può capire quanto sia complesso trattare miscele di questo tipo in assenza di una vasta letteratura.

1.5.1 GAMMA RAY DENSITY METER

La massa volumica può essere ricavata tramite il misuratore di densità a raggi gamma. Una combinazione di questo e di un venturimetro sarebbe sufficiente per avere nota la portata del flusso. Infatti il primo strumento consegna all'utente le informazioni riguardanti la massa volumica, mentre il secondo porta l'indicazione riguardante la portata.

Questo tipo di soluzione è tuttora in uso in vari impianti nonostante i problemi di costo e di sicurezza della tecnologia.

1.5.2 TEST SEPARATOR

Secondo l'analisi svolta da *Gibson et al (2003)* [13] la scelta più comune al giorno d'oggi risulta essere l'inserimento di separatori in parallelo alle condotte dove una parte del flusso viene deviata tramite delle valvole. La misurazione delle portate risulta però molto influenzata dalla variabilità del flusso; infatti la portata di estrazione del giacimento non può essere costante. Tutto ciò significa che un prelievo estemporaneo non può caratterizzare del tutto la composizione della miscela, in quanto le portate, nel caso reale, possono variare in qualunque momento (Gibson segnala degli errori che si stanziano tra il 5% e il 10%).

Una volta osservato e compreso il panorama attuale sui metodi di misurazione multifase risultano chiare:

- Le difficoltà operative riscontrate;
- L'interesse che la comunità scientifica pone sul problema.

Il lavoro sperimentale svolto ha come proposito una raccolta di dati volta alla caratterizzazione sempre più precisa del comportamento di determinate miscele sotto varie condizioni operative. Le prove effettuate in laboratorio consentono di misurare valori di cadenti e cadute pressione, temperatura e di visualizzare i regimi corrispondenti, avendo come dato di input la composizione del flusso. La ricerca sperimentale sembra essere la strada migliore per ottenere dei risultati utili e validi ai fini delle applicazioni di misura finora descritte. I dati raccolti, infatti, consentono una migliore descrizione del fenomeno dal punto di vista numerico e successivamente modellistico.

2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO E PROCEDURE SPERIMENTALI

2.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo viene esposta una attenta descrizione del Laboratorio di Termofluidodinamica Multifase del Politecnico di Milano e della componentistica impiegata per le campagne sperimentali. Macchinari e sensori possono variare in tipologia ed in settaggio secondo le particolari necessità dell'esperimento, dalle finalità stesse delle campagne e quindi dalla accuratezza richiesta.

Viene inoltre proposta la procedura di esecuzione delle prove sperimentali ed il sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati.

L'apparato utilizzato è localizzato presso il laboratorio adiacente al Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano (Sede di Bovisa) in Via Lambruschini 4, Milano. All'interno dello stabile, adibito alla ricerca sperimentale, si trova il Laboratorio di Termo-Fluido Dinamica Multifase del Politecnico di Milano attivo dal 1998 per l'analisi delle proprietà fisiche di miscele bifase e trifase di olio, acqua ed aria.

È possibile operare con i seguenti flussi multifase:

- Liquido-Liquido (acqua-olio)
- Gas-Liquido (aria-acqua o aria-olio)
- Liquido-Liquido-Gas (acqua-olio-aria)

Per quanto riguarda la seguente trattazione la configurazione di movimentazione dei fluidi all'interno dei condotti è orizzontale. Oltre a questa configurazione sono possibili e utili a indagini di studio, a seconda delle necessità sperimentali, le configurazioni verticale e inclinata.

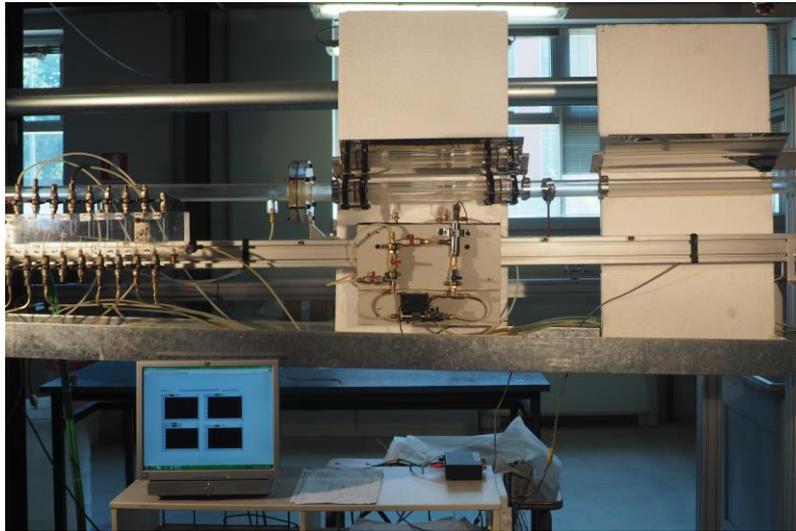


Figura 2.1- SEZIONE DI IMPIANTO PRINCIPALE PER LA CAMPAGNA DEL VENTURI

2.2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO

L'impianto può essere suddiviso come segue:

- circuito di alimentazione dell'olio;
- circuito di alimentazione dell'acqua;
- circuito di alimentazione dell'aria;
- introduttore dei fluidi e condotta di prova;
- serbatoi di raccolta
- sistema di acquisizione dei dati;

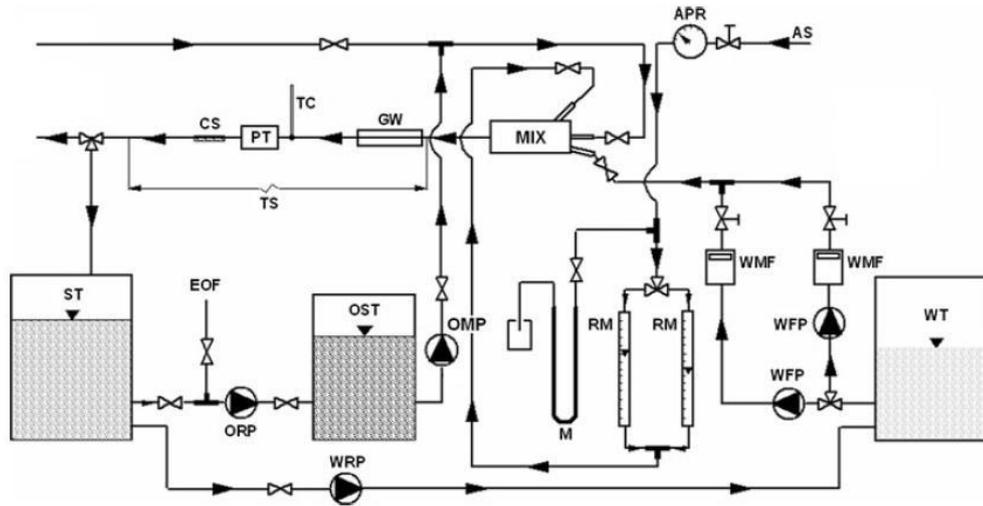


Figura 2.2-SCHEMA D'IMPIANTO E COMPONENTI PRINCIPALI

L'insieme delle componenti dell'impianto in figura 2.2 è il seguente:

- APR air pressure regulation;
- AS air supply line;
- CS capacitance sensor;
- EOF external oil feeding;
- GW glass window;
- M manometer;
- MIX phase inlet mixer;
- OMP oil metering pump;
- ORP oil recovering pump;
- OST oil supply tank ($0,5 m^3$);
- PT pressure transducer;
- RM rotameter;
- ST Phase collector/separator tank ($1,0 m^3$);
- TC thermocouple (*K type*);
- TS test section;
- WFP water feeding pump;
- WMF water magnetic flow meter;
- WRP water recovery pump;
- WT water supply tank ($5 m^3$);

2.3 COMPONENTI IMPIANTO

2.3.1 MISURATORE DI PORTATA D'ACQUA (Water Magnetic Flow Meter)

Il misuratore di portata implementato nel laboratorio è il *Promag 30 FT 15* prodotto dalla *Endress+Hauser*. Collegato alla pompa centrifuga ad asse orizzontale misura la portata dell'acqua prelevata dal serbatoio. Sono presenti una valvola di immissione e una di regolazione manuale della portata.

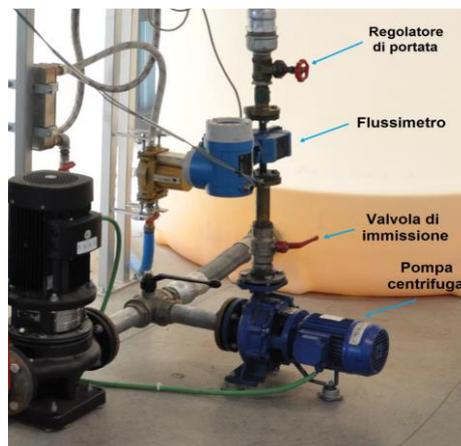


Figura 2.3-FLUSSIMETRO, POMPA, VALVOLA, REGOLATORE DI PORTATA E SERBATOIO DELL'ACQUA SULLO SFONDO

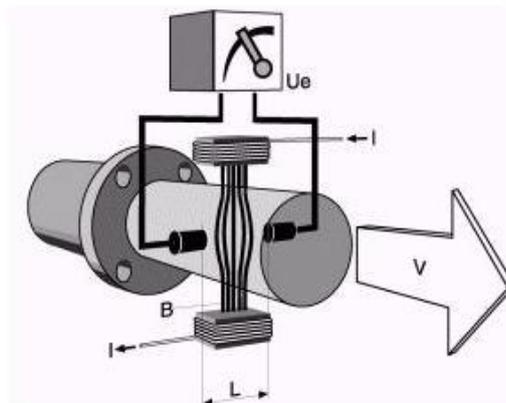


Figura 2.4-SCHEMATIZZAZIONE FLUSSIMETRO MAGNETICO

Il funzionamento di tale strumento di misura si basa sulla *legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday*; secondo la quale una forza elettromotrice viene indotta in un conduttore immerso in un campo magnetico variabile nel tempo. La variazione del campo avvertita dal conduttore può essere il risultato dell'effettivo cambio di intensità, direzione o verso oppure dal movimento del conduttore stesso. Nel principio di misura magnetico-induttivo, il fluido che scorre è il conduttore in movimento. La tensione indotta, inviata all'amplificatore di misura da una coppia di elettrodi, è proporzionale alla velocità del flusso. Nota la sezione trasversale del sensore si può agevolmente calcolare la portata volumica. Il campo magnetico viene generato da una corrente continua commutata, di polarità alternate. Ciò determina uno zero stabile, rendendo la misura indipendente dal fluido (purché abbia una conduttività minima di $5 \mu S/cm$). Le relazioni fisiche appena presentate sono:

$$U_e = B \times L \times u \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{h_2o} = u \times S \quad (9)$$

Dove:

- U_e -tensione indotta
- B-induzione magnetica
- L-distanza tra gli elettrodi
- u -velocità flusso
- S-sezione flusso
- \dot{Q}_{h_2o} -portata volumica

A seconda delle esigenze il fondo scala è regolabile tra 0,5 e 10. Poiché il sensore ha un diametro nominale (DN) di 15 mm, a tali valori di velocità del flusso corrispondono portate volumiche rispettivamente di 0,3 e 6 [m^3/h]. La portata istantanea viene visualizzata sul display digitale posto sullo strumento permettendo la correzione istantanea del valore della portata volumica tramite la chiusura o apertura di un'apposita valvola. Lo strumento tarato direttamente nello stabilimento di produzione secondo gli standard internazionali, in condizioni di riferimento presenta un'incertezza di misura dello 0,5% del valore indicato.

2.3.2 MISURATORE PORTATA OLIO

L'olio utilizzato nelle campagne non è un fluido dielettrico, pertanto non è possibile misurarne la portata con un flussometro magnetico induttivo come il precedente. La portata di olio è controllata da un volantino di regolazione che agisce sulla velocità di rotazione della pompa dosatrice ad ingranaggi.

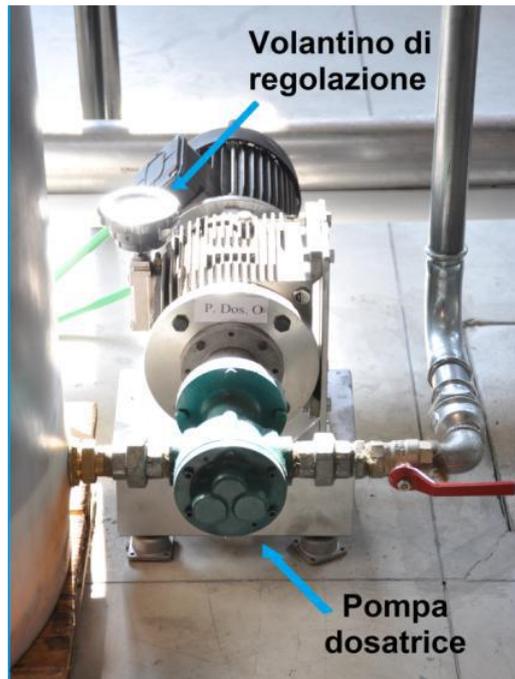


Figura 2.5-POMPA DOSATRICE E VOLANTINO DI REGOLAZIONE DELLA PORTATA

Si misura la portata mediante la relazione di *Heagen-Poiseuille* con l'ausilio del tratto di condotto munito di un *trasduttore di pressione* e di una *termocoppia tipo K*:

$$\dot{V}_o = \frac{\Delta p_{Poiss} \times \pi \times D^4}{128 \times \mu_o \times L} \quad (10)$$

Nella quale si indica con:

- μ_o -viscosità dinamica dell'olio ed è funzione della temperatura;
- Δp_{Poiss} -caduta di pressione misurata dal trasduttore sulla sezione di prova di diametro D e lunghezza L.

La validità della relazione di *Heagen-Poiseuille* è provata per condotti circolari di diametro e lunghezza noti e in presenza di moto laminare sviluppato, condizione pienamente soddisfatta nei flussi analizzati durante la campagna. Utilizzando la suddetta relazione, i valori di portata di olio ottenuti variano leggermente per ogni singola acquisizione a causa dell'incertezza di misura del trasduttore di pressione e della viscosità cinematica fortemente influenzata dal valore di temperatura. Quindi è necessaria un'operazione di taratura del volantino di regolazione che permetta di stabilire un legame di proporzionalità diretta tra la velocità superficiale dell'olio J_o e la posizione del volantino stesso. In questo modo è possibile confrontare per i punti corrispondenti alle velocità superficiali più interessanti ottenuti in periodi differenti ai quali corrispondono condizioni operative differenti (soprattutto di temperatura).

Una taratura ex-novo è stata effettuata prima delle campagne attraverso delle misure di tempo correlate con la variazione di volume del serbatoio di raccolta olio, di seguito in figura 2.6 viene proposta la conseguente curva. Con il termine volantino si intende l'apparato di regolazione manuale numerato da un valore 1 al valore massimo di 6 al quale tramite l'apposita taratura è possibile ottenere il valore di portata in m^3/h .

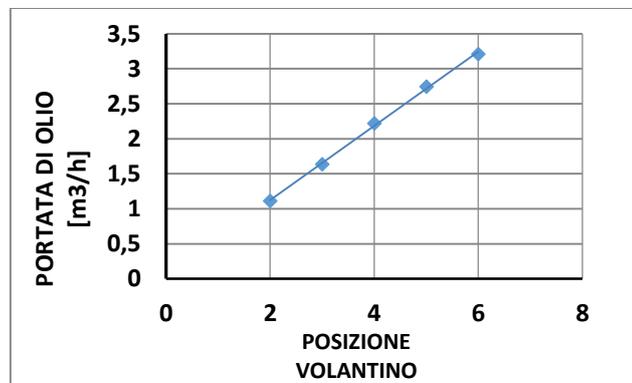


Figura 2.6-CURVA DI TARATURA DEL VOLANTINO DI REGOLAZIONE

2.3.3 MISURATORE PORTATA DI ARIA

La portata di aria in pressione introdotta nell'impianto viene misurata attraverso un flussometro, modello *ASAMETRO E5-2600/H*, prodotto dalla ASA. Una prima condotta, di sezione regolabile per flussi da 60 a 600 l/h tarata a 3 bar, e una in parallelo, utilizzabile per portate comprese tra 600 e 6000 l/h e tarata a 1 bar, sono

implementate nel medesimo strumento. La pressione massima ammissibile nello strumento è di 21 bar. Il flussometro è un dispositivo di misura costituito appunto da due condotte verticali all'interno delle quali scorre il fluido la cui portata è la grandezza oggetto di misurazione. Nella singola sezione dello strumento è presente un galleggiante: la lettura della misura è la quota dello stesso nella condotta. Attraverso questa indicazione si ricava la portata del flusso di aria. Viene ora illustrato il principio fisico che governa il funzionamento dello strumento.



Figura 2.7-ASAMETRO MODELLO E5-2600/H

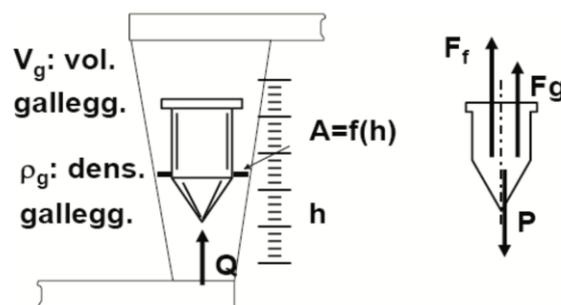


Figura 2.8-SCHEMA PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

L'espressione della forza fluidodinamica è data da:

$$F_f = \frac{1}{2} \times \rho \times w^2 \times A_{gall} \times C_R \quad (11)$$

Essendo l'area del galleggiante (A_{gall}) invariante ed anche il coefficiente di resistenza (C_R) almeno all'interno di un campo di Reynolds sufficientemente ampio da contenere tutti i regimi analizzati, si evince che la forza idrodinamica è proporzionale a w^2 (velocità locale). Pertanto con un'adeguata operazione di taratura sarà possibile ricavare una relazione lineare tra la quota del galleggiante h ed il valore della portata d'aria fluente nel condotto. Tuttavia, per ottenere la portata reale, vanno effettuate due correzioni. In primo luogo va tenuto presente che i valori registrati sulla scala graduata sono stati ricavati in fase di taratura ad una certa pressione assoluta che agiva sullo strumento (p_{tar}). In secondo luogo è necessario prestare attenzione alla pressione effettiva del fluido nello strumento (pari alla pressione indicata dal manometro a monte del dispositivo) e successivamente a quella del fluido della condotta di prova (pari alle perdite di carico misurate dal trasduttore sommate alla pressione atmosferica).

Se, come esposto precedentemente in equazione (11), tale forza deve essere pari alla forza peso del galleggiante $M \times g$, risulta che la velocità della corrente fluida è pari a:

$$w = \sqrt{\frac{M \times g}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times C_R}} \quad (12)$$

Alla pressione di taratura di 3 bar si avrà:

$$w_{tar} = \sqrt{\frac{M \times g}{\frac{1}{2} \times \rho_{tar} \times A \times C_R}} \quad (13)$$

Mentre alla pressione effettiva di utilizzo:

$$w_{eff} = \sqrt{\frac{M \times g}{\frac{1}{2} \times \rho_{eff} \times A \times C_R}} \quad (14)$$

Essendo poi:

$$\dot{V} = S \times w \quad (15)$$

Dove si indica con:

- S – sezione di passaggio della corrente fluida, approssimata a costante nelle varie condizioni (*flussometro perfettamente cilindrico*);
- \dot{V} – portata volumetrica.

Si ha che:

$$\frac{\dot{V}_{eff}}{\dot{V}_{tar}} = \frac{w_{eff}}{w_{tar}} = \sqrt{\frac{\rho_{tar}}{\rho_{eff}}} = (\text{ipotesi gas ideale}) \sqrt{\frac{p_{tar}}{p_{eff}}} \quad (16)$$

Quindi:

$$\dot{V}_{eff} = \dot{V}_{tar} \times \sqrt{\frac{p_{tar}}{p_{eff}}} \quad (17)$$

$$\dot{V}_{eff} = \dot{V}_{tar} \times \sqrt{\frac{p_{tar}}{p_{eff}}} \quad (18)$$

Nota la portata volumetrica nel flussometro è possibile risalire alla portata reale nel condotto utilizzando la legge dei gas perfetti (considerata la temperatura costante) in corrispondenza del dispositivo e della condotta.

Risulta quindi che:

$$p_{eff} \times \dot{V}_{eff} = p_{condotto} \times \dot{V}_{condotto} \quad (19)$$

Da cui:

$$\dot{V}_{condotto} = \dot{V}_{eff} \times \frac{p_{eff}}{p_{condotto}} = \dot{V}_{tar} \times \sqrt{\frac{p_{tar}}{p_{eff}}} \times \frac{p_{eff}}{p_{condotto}} \quad (20)$$

$$\dot{V}_{condotto} = \dot{V}_{tar} \times \sqrt{\frac{p_{tar} \times p_{eff}}{p_{condotto}^2}} \quad (21)$$

2.3.4 MISURATORE DI TEMPERATURA

Temperature d'interesse:

- T_{amb} -temperatura ambiente;
- T_{misc} –temperatura miscela;
- T_{oil} -temperatura olio.

Per monitorare costantemente le temperature d'interesse vengono utilizzate *termocoppie di tipo K (Nichel- 10% Cromo (+) vs Nichel- 6% Alluminio (-))*. Essendo la viscosità dell'olio fortemente influenzata dalla temperatura è necessario prestare particolare attenzione, inoltre negli anni la stessa subisce variazioni causate dall'invecchiamento del fluido stesso. Per questa ragione la taratura delle medesime deve essere garantita prima dell'inizio delle campagne sperimentale. Una opportuna taratura è stata garantita presso il centro S.I.T. del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano, con un'incertezza di misura pari a 0,2 °C.

2.3.5 MISURATORE DI PRESSIONE

Per la rilevazione delle cadute di pressione viene impiegato il trasduttore di pressione differenziale piezo-resistivo *C230* prodotto dalla *Setra System*.



Figura 2.9-SETRA TRANSDUCER C230

USCITA IN TENSIONE [V]	RANGE [PSID]
0,05 : 5,05	0 : 1

Tabella 2.1-CARATTERISTICHE TRASDUTTORE DI PRESSIONE SETRA

Antecedentemente l'inizio delle campagne è necessaria una verifica della taratura del trasduttore di pressione. L'obiettivo della taratura è ricavare una relazione di proporzionalità diretta tra la pressione misurata e la tensione in uscita dai morsetti del trasduttore per una corretta rilevazione e interpretazione dei dati sperimentali a partire dal software *LabVIEW®*.

Applied Pressure (PSID)	Transducer output (VDC)	Nonlinearity errors %FS
0,0091	0,0978	-0,081
0,1099	0,6052	-0,011
0,2061	1,0894	0,052
0,3056	1,5882	0,081
0,4091	2,1051	0,068
0,5075	2,5959	0,051
0,606	3,086	-0,005
0,7099	3,6044	-0,028
0,8083	4,0957	-0,037
0,9099	4,6027	-0,05
1,0079	5,0913	-0,081

Tabella 2.2-TABELLA DI TARATURA TRASDUTTORE DI PRESSIONE SETRA

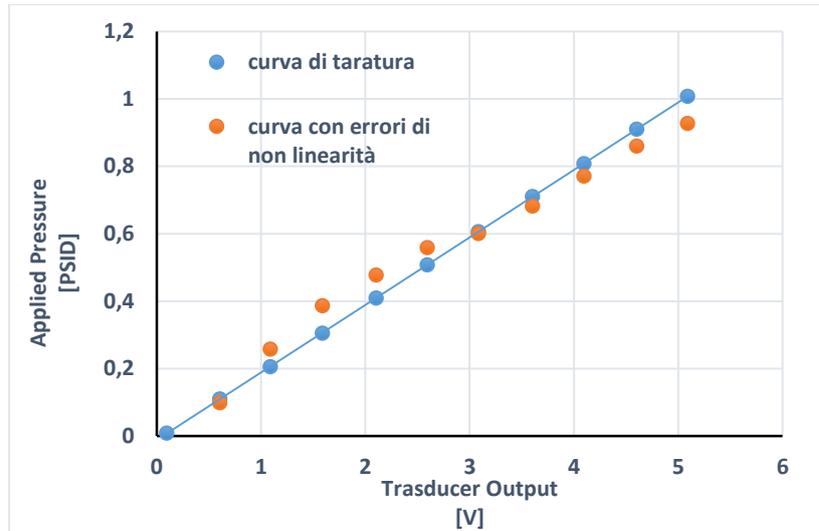


Figura 2.10-CURVA DI TARATURA DEL TRASDUTTORE DI PRESSIONE SETRA

2.3.6 LINEE DI PRESSIONE

Al fine di misurare le cadute di pressione i tubi sono dotati, sia a monte che a valle, di prese di pressione poste a distanza nota le une dalle altre e con passo all'incirca cadenzato. Le prese confluiscono tramite appositi tubi capillari in un collettore (figura 2.11) grazie al quale, tramite l'apertura di apposite valvole, è possibile la messa in comunicazione del segnale di pressione con il trasduttore differenziale.

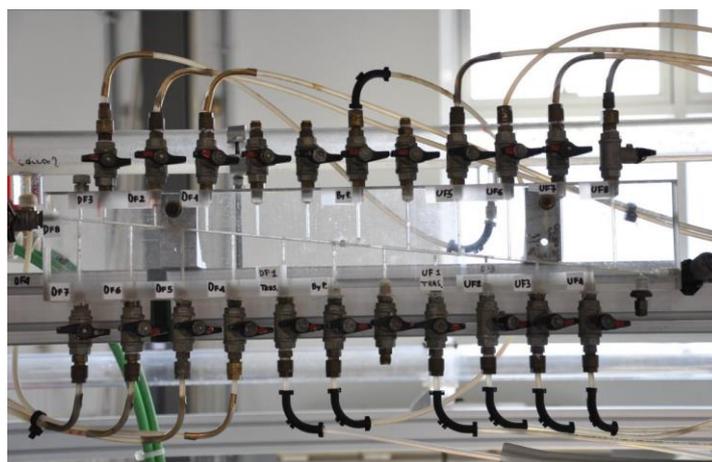


Figura 2.11-COLLETTORE PRESE DI PRESSIONE

Il collettore è dotato di 23 canali, due dei quali sono solitamente occupati dalle prese collegate ai trasduttori di pressione, i restanti 21 canali sono liberamente selezionabili per l'accoppiamento delle prese di pressione di monte e valle. Il numero di prese disponibili ed effettivamente impiegate non è necessariamente uguale per ciascun tubo. In generale per una adeguata valutazione delle cadenti si è impiegato un numero minimo di 4 prese per sezione di tubazione.

Si ricorda che per una corretta analisi delle cadenti il flusso deve essere pienamente sviluppato e che quindi la sezione con le prese di pressione deve trovarsi ad una sufficiente distanza dall'iniezione del flusso o della singolarità.

2.3.7 SISTEMA DI INIEZIONE FLUIDI

Una corretta introduzione dei fluidi di lavoro all'interno del condotto è alla base di una buona riuscita della prova sperimentale. Per questo è necessario che l'olio non entri a contatto con le pareti e che il sistema di introduzione influenzi il meno possibile sulla lunghezza di sviluppo del flusso.

L'introduttore di plexiglass utilizzato per l'immissione dei fluidi è rappresentato in figura 2.13 ed è costituito dalle seguenti parti:

- Ingresso olio attraverso condotto a sezione circolare ad asse orizzontale;
- Ingresso acqua attraverso condotto a sezione circolare ad asse inclinato di 25°;
- Zona centrale dove l'acqua si muove in un anello coassiale alla sezione circolare dove scorre l'olio;
- Zona di introduzione dell'aria;
- Raccordo con il condotto di prova tramite un convergente/divergente in base al diametro di prova. Si constata che l'utilizzo di questo accoppiamento non provoca apprezzabili variazioni nei regimi di moto.

L'ottimizzazione dell'introduttore, di cui si riporta la sezione in figura 2.13, è stata realizzata da *Coslovi e Relvini (2003)*.



Figura 2.12-SISTEMA DI INIEZIONE FLUIDI DI LAVORO

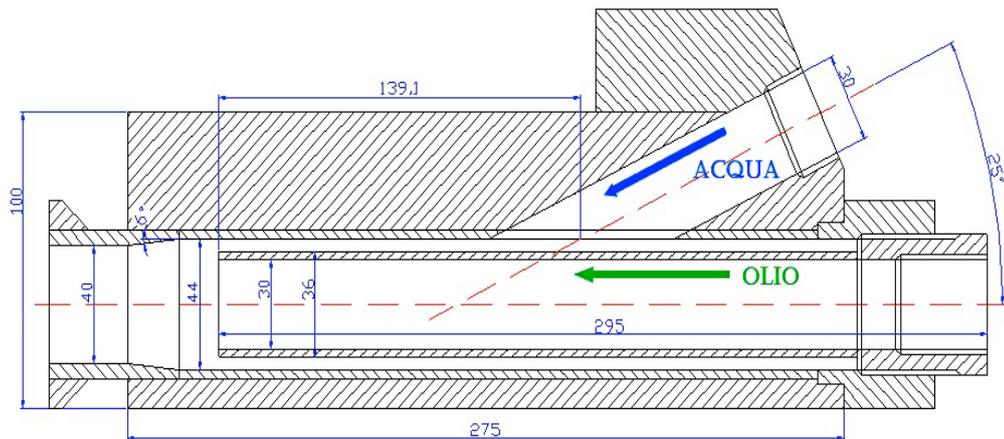


Figura 2.13-DISEGNO TECNICO DELL'INTRODUTTORE (MISURE ESPRESSE IN mm)

L'introduzione dei fluidi nel condotto svolge un ruolo fondamentale riguardo allo sviluppo di flusso e dei relativi regimi di moto. In particolare si è osservato che operando con condizioni di miscelamento delle due fasi non prossime all'isocinetismo si ha la formazione di un regime di moto più emulsionato.

2.3.8 SISTEMA DI ACQUISIZIONE IMMAGINI

Una importante fase del lavoro corrisponde all'acquisizione delle immagini relative al regime di moto che si instaura nella sezione di prova a seguito dell'introduzione dei fluidi. In questo modo sarà possibile conoscere a posteriori la struttura del flusso note le velocità superficiali delle fasi che lo compongono e studiare a fermo immagine le particolarità non osservabili ad occhio nudo durante gli esperimenti.

La sezione dell'impianto che risulta essere oggetto dell'acquisizione fotografica è dotata di uno specchio inclinato di 45° affinché all'osservatore frontale l'immagine riflessa dallo stesso mostri la vista dall'alto. Utilizzando una scatola a parallelepipedo piena di acqua si eviterebbero eventuali distorsioni ottiche, ma per semplicità operativa si è adottato il sistema degli specchi.

La fotocamera impiegata è una *Olympus E-M10* a tempo di esposizione di $1/4000$ s e distanza focale di 25 mm.

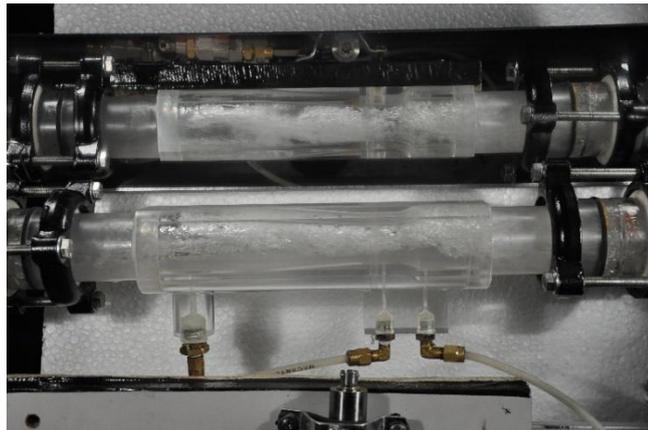


Figura 2.14-VENTURIMETRO DOTATO DEL SISTEMA DI SPECCHI DURANTE L'ACQUISIZIONE DELLE FOTOGRAFIE

2.4 FLUIDI DI LAVORO

In particolare per quanto riguarda la viscosità dinamica dell'olio, di fondamentale importanza risulta essere la conoscenza delle caratteristiche fisico-reologiche dei fluidi di lavoro. Si presta attenzione alla correzione di temperatura per confrontare risultati ottenuti in momenti diversi con diverse condizioni ambientali.

2.4.1 ACQUA

L'acqua usata nelle prove sperimentali è estratta dalla rete comunale. Come dati caratteristici sono stati assunti:

MASSA VOLUMICA [kg/m^3]	VISCOSITA' DINAMICA [$Pa \cdot s$]
1000	0,001

Tabella 2.3-TABELLA DATI ACQUA

2.4.2 OLIO

L'olio utilizzato è il "Milpar 220" della società Oleotecnica S.P.A. (Segrate, Milano). Si tratta di un olio lubrificante a viscosità medio-alta, con punto di infiammabilità a 270 °C. Le proprietà fisiche e reologiche dell'olio sono state misurate nel 2013 dalla Stazione Sperimentale per le Industrie degli Oli e dei Grassi (SSOG) di Milano, secondo gli standard *ASTM D 445/2010* e *ASTM d 4052/1996*. La massa volumica ρ_0 è pari a 890 [kg/m^3] a 25°C risulta poco variabile con la temperatura, almeno nell'intervallo d'interesse. La viscosità cinematica ν_0 invece varia esponenzialmente con la temperatura, in tabella è riportata anche la viscosità dinamica μ_0 :

T [°C]	μ_0 [Pa s]
20	1,21
25	0,83
30	0,58
40	0,30

Tabella 2.4-TABELLA VISCOSITA' DELL'OLIO IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA

E' possibile dunque ricavare la relazione che lega la viscosità dinamica alla temperatura attraverso una regressione esponenziale, come prescritto dalle vigenti normative (equazione (22)).

$$\mu_0 = 4,757e^{-0.694T} \quad (22)$$

L'olio in esame è in utilizzo da diversi anni nel Laboratorio di Termo-fluido dinamica Multifase, nel corso degli esperimenti esso forma con l'acqua una emulsione dalle caratteristiche molto simili a quelle dell'olio. Nel tempo questo ha causato una lieve variazione di viscosità (figura 2.15), mentre la massa volumica è rimasta pressoché invariata, è pertanto consigliabile eseguire periodicamente dei controlli atti a stimare le proprietà del fluido di lavoro. Il campione analizzato dal SSOG nel 2013 ha presentato un contenuto di acqua del 22,7% [m/m] rilevato con il metodo Karl Fischer secondo la normativa ASTM D 6304.

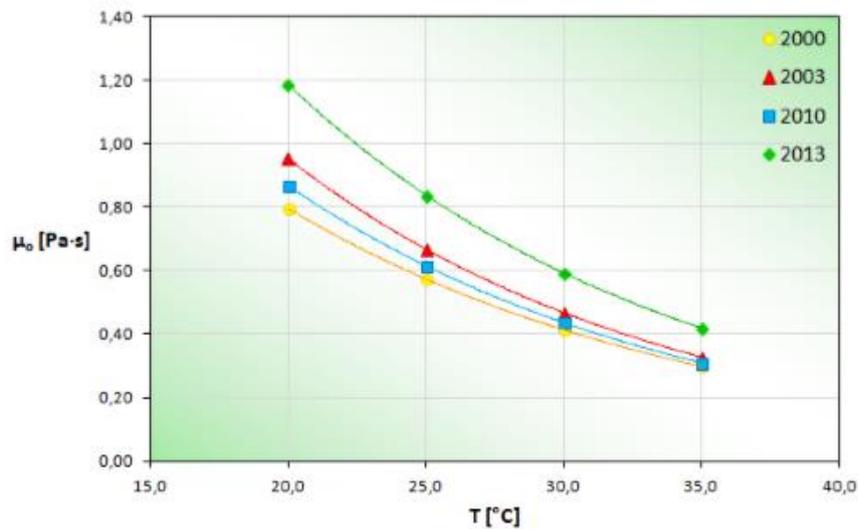


Figura 2.15-CURVA VISCOSITA' DELL'OLIO IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA ED EFFETTO DELL'INVECCHIAMENTO

2.4.3 ARIA

La fase gassosa adoperata è aria ambiente compressa e distribuita dalla linea del Dipartimento di Energetica.

Essa può essere con buona approssimazione ritenuta un gas perfetto pertanto il suo comportamento viene descritto dalla relativa equazione di stato. In questo modo utilizzando i valori misurati di temperatura come dati di input è possibile implementare la formula. Si è deciso di scegliere un valore di pressione pari a quella ambiente nonostante questo non coincida con la realtà operativa: la pressione del gas all'interno della condotta è sicuramente più elevata.

Questa differenza può essere comunque trascurata. Sono state infatti effettuate delle valutazioni sul valore massimo di pressione che si ottiene durante le prove (per fare ciò è sufficiente correlare le cadenti [kPa/m] con la lunghezza della condotta). Anche nel caso peggiore, dunque, risulta che la variazione di densità è minima. E' opportuno aggiungere e sottolineare, infine, che le masse volumiche di entrambe le fasi liquide sono in modulo superiori di due ordini di grandezza rispetto a quella gassosa. L'influenza della stessa è quindi molto poco rilevante nello svolgimento dell'analisi dei dati.

MASSA VOLUMICA [kg/m ³]	VISCOSITA' DINAMICA [Pa · s]
1,18	1,82 × 10 ⁻⁵

Tabella 2.5-TABELLA DATI ARIA

2.5 SEZIONE DI PROVA

La posizione della sezione di prova può essere impostata a piacimento e con semplicità in base alle esigenze dell'operatore. I materiali stessi possono differire dal vetro alla plastica fino ai condotti metallici. Nella seguente campagna sperimentale sono state utilizzate condotte circolari di diametro costante di 40 mm collegati da flange munite di guarnizioni e accoppiate con attenzione per mantenere la continuità di flusso. Il materiale impiegato per le prove è il *Plexiglass*® ed essendo trasparente consente la visualizzazione dei regimi in maniera immediata.

I componenti principali della sezione di prova implementati durante le prove sono stati:

- Tubo di venturi
- Boccaglio
- Condotto a D 40mm completo di prese di pressione statica

Lo schema adottato per le campagne sperimentali può essere schematizzato in figura 2.16.

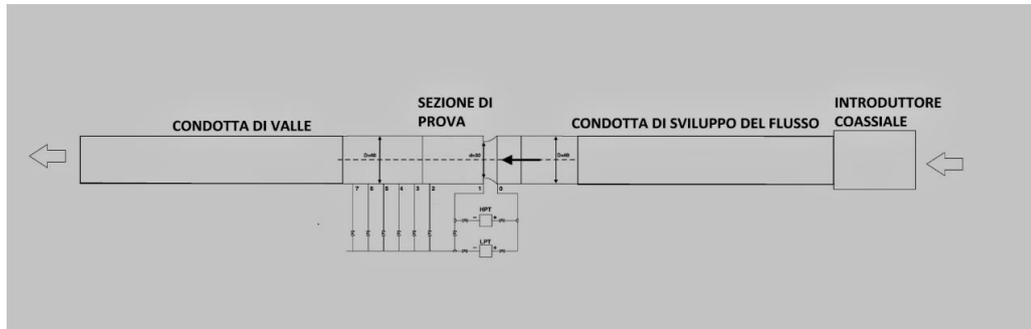


Figura 2.16-SCHEMA D'IMPIANTO

Dopo l'introduzione dei fluidi mediante il mixer coassiale descritto in precedenza è predisposta una condotta avente lunghezza di circa 7 metri dedicata allo sviluppo del flusso, necessaria affinché le misurazioni non avvengano in fase di transitorio. Lungo la stessa è presente la sezione di campionamento fotografico di monte. Nel caso di diametro di 40 millimetri non è stata necessaria una sezione di accoppiamento tra condotta e introduttore poiché di stesso diametro.

Segue la sezione di prova che comprende la componentistica che è interessata dalle misurazioni. Generalmente al componente Tubo di Venturi o Boccaglio è accoppiata, a monte o a valle dello stesso, la tubazione con le prese di pressione statica. Nella campagna in esame le prese di pressione, per la valutazione del parametro cadente, sono installate a valle. Possono essere rilevate fotografie predisponendo gli specchi anche a valle.

Dopo la sezione di prova è presente la condotta che sfocia al serbatoio di recupero dei fluidi tramite uno sbocco divergente finale.

2.5.1 TUBO DI VENTURI

Il Tubo di Venturi (o Venturimetro, o più semplicemente Venturi) è uno strumento di misura di portata che ha acquistato interesse nel mondo delle miscele bifase e trifase per la sua caratteristica di interferire in minima parte con la struttura del flusso. Si evince che dopo il Venturimetro il regime di moto non subisce trasformazioni e recupera la struttura iniziale quasi immediatamente. In principio il Venturi è stato messo a punto dall'omonimo nel 1796 per la misura del flusso monofase data la caduta del tratto convergente.

Lo strumento è caratterizzato, oltre che da un primo tratto convergente, da un secondo tratto divergente che permette il recupero parziale della pressione, per questo motivo il coefficiente di portata si avvicina all'unità nel caso monofase. Il Venturi in esame è stato progettato dal Dipartimento di Energia e costruito da una officina specializzata esterna secondo le normative (*ISO 5167*).

Lo strumento è dotato di prese di pressione statica a monte (0), nella gola (1) e a valle del divergente (2) per l'acquisizione dei valori delle cadute di pressione come si può vedere dalla figura 2.17.

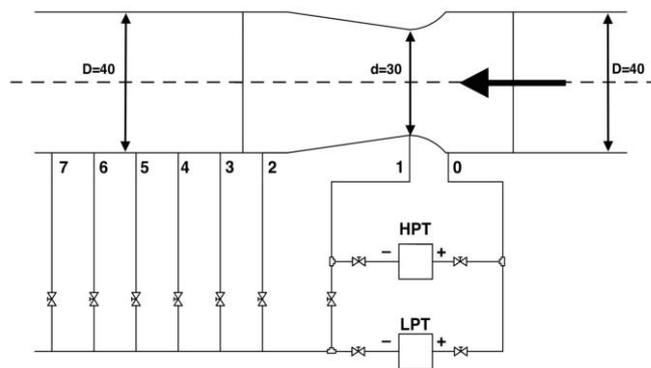


Figura 2.17-SCHEMA VENTURI E COLLEGAMENTI PRESE DI PRESSIONE

2.5.2 BOCCAGLIO

Il Boccaglio a differenza del Venturi presenta solo un primo canale convergente geometricamente uguale a quello del Venturi, a meno delle incertezze dell'ordine del decimo di millimetro dovute alla lavorazione del pezzo in fase di tornitura. Il tratto convergente è seguito da una brusca espansione dove il flusso viene disturbato per un certo tratto fino a recuperare la struttura iniziale. Il principale vantaggio è la semplicità costruttiva e l'ingombro leggermente minore. Anche il boccaglio è dotato di prese: una di monte (0) e una di gola (1).

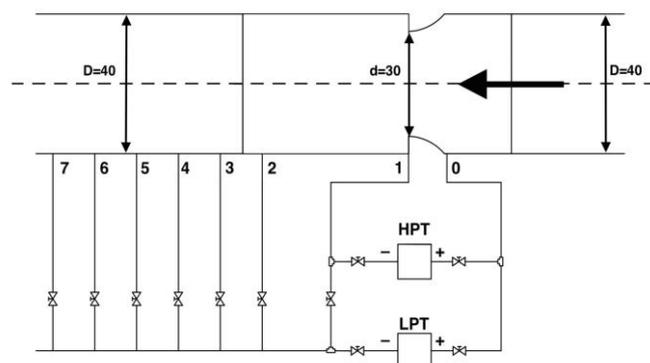


Figura 2.18- SCHEMA BOCCAGLIO E COLLEGAMENTI PRESE DI PRESSIONE

Il vantaggio principale di questi apparati è evidente nella loro robustezza e bassa invasività. A differenza dei misuratori elettromagnetici non presentano un così ampio intervallo di valori di portata misurabili mentre possono essere applicati per fluidi dielettrici.

2.6 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI

Sia il flussometro magnetico-induttivo che i trasduttori di pressione e le termocoppie utilizzati nell'impianto convertono le grandezze fisiche in segnali elettrici analogici. Una scheda di acquisizione dati *NI-LAB-PCI200* prodotta dalla *National Instruments* provvede alla conversione *A/D* (analogico/digitale). Prima della conversione in digitale, i segnali delle termocoppie, di basso livello, vengono filtrati e amplificati da un modulo di condizionamento. L'intero processo è descritto in figura 2.19.

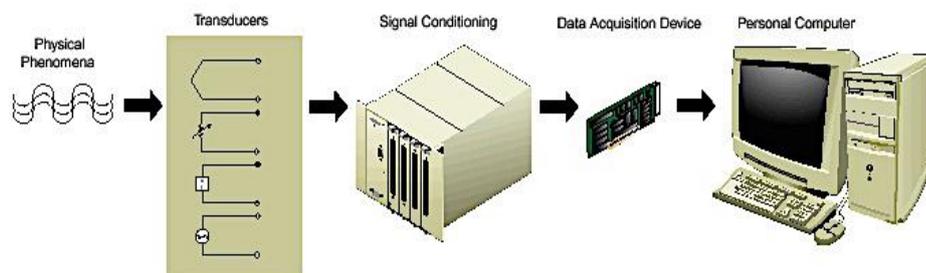


Figura 2.19-PROCESSO DI ACQUISIZIONE DATI

La procedura per l'acquisizione automatica dei dati è stata implementata avvalendosi di un linguaggio di programmazione grafica, il *LabVIEW®* prodotto dalla *National Instruments*. Tale codice, assimilabile al Visual Basic, permette all'utente di creare ciò che viene definito come uno "strumento virtuale", ovvero un'interfaccia grafica che consente, tramite una pulsantiera e una serie di pannelli di visualizzazione, la gestione di tutti gli strumenti ad essa collegati attraverso la scheda di acquisizione dati. La schermata visualizzata sul monitor del calcolatore durante le prove sperimentali, vedi la figura 2.20, consente di monitorare in tempo reale, sia dal punto di vista grafico che dal punto di vista numerico, tutte le grandezze oggetto della misurazione, in modo da controllare l'andamento del fenomeno. Al termine dell'acquisizione, la cui durata può variare in base alle necessità sperimentali, i valori medi delle grandezze istantanee vengono visualizzati e salvati su un file *Excel®*. Il tempo di acquisizione idoneo permette di ottenere valore medi stabilizzati, condizione necessaria per ottenere la ripetibilità della misura. L'operazione di media è stata eseguita per neutralizzare oscillazioni dei segnali dai vari trasduttori dovuti principalmente alla natura irregolare propria del fenomeno in analisi.

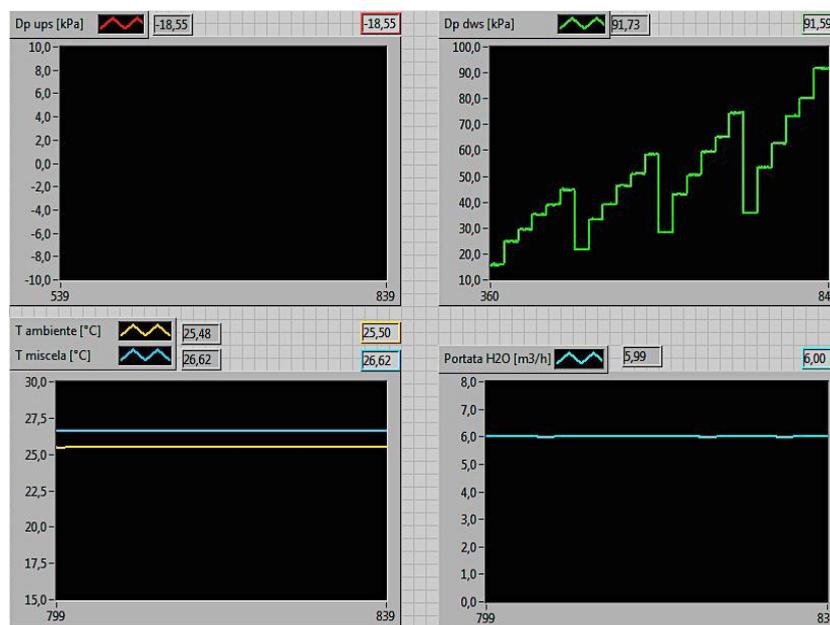


Figura 2.20-INTERFACCIA GRAFICA DEL SOFTWARE LABVIEW® DIMOSTRATIVA

2.7 PROCEDURA DI ESECUZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI

L'esperienza maturata dal Laboratorio di Fluido Dinamica Multifase ha permesso di mettere a punto procedure d'esecuzione delle campagne secondo criteri di efficienza in termini di tempo impiegato per gli esperimenti che di consumo energetico degli stessi. La qualità dei risultati rimane certamente al cardine della ottimizzazione del laboratorio.

La procedura standard può essere così schematizzata:

- Avvio del programma di acquisizione *LabVIEW®*;
- Posizionamento del volantino di regolazione della portata d'olio sul valore desiderato; in tutti i casi la prova viene eseguita a portata d'olio costante;
- Apertura della valvola di immissione dell'acqua a ridosso dell'introduttore;
- Avvio della pompa centrifuga di erogazione dell'acqua;
- Pulizia dell'impianto con abbondante flusso di acqua in modo tale da eliminare eventuali tracce di olio dalle pareti del condotto; una tantum, contemporaneamente a questa fase, si può procedere all'operazione di flussaggio con acqua dei tubi capillari e del collettore delle prese di pressione in modo da rimuovere l'eventuale presenza di bolle d'aria che periodicamente possono essere intrappolate e che potrebbero causare un disturbo del segnale di pressione;
- Nel caso di un'espansione dovuta all'introduzione di una sezione di prova di geometria particolare, la variazione di sezione genera la presenza di zone ricche d'aria ristagnante immediatamente a valle della sezione. Per rimuoverla è sufficiente incrementare, per un breve periodo di tempo, la portata di acqua fino al valore massimo; questa operazione è svolta contemporaneamente alla precedente;
- Apertura della valvola di immissione dell'olio posta a ridosso dell'introduttore;
- Avvio della pompa dosatrice dell'olio;
- Apertura della valvola di immissione dell'aria e successiva regolazione della portata tramite l'apposito flussometro;
- Riduzione della portata d'acqua fino ad ottenere il valore desiderato, la portata viene così mantenuta costante per tutta la durata dell'esperimento;

- Non appena il regime di moto appare stabile si aprono, una alla volta, le opportune valvole poste sul collettore delle prese di pressione così da ottenere un segnale al trasduttore differenziale corretto; ad ogni apertura di un canale deve corrispondere l'avvio di una lettura in *LabVIEW®*;
- Si prosegue la prova fino a che non si osserva l'esaurimento dell'acqua disponibile all'esecuzione dell'esperimento e si procede dunque al termine dello stesso;
- Chiusura della valvola di immissione dell'olio posta a ridosso dell'introduttore;
- Incremento della portata di acqua, per quanto possibile, in maniera tale da effettuare già un pre-lavaggio del tubo per la prova successiva; in questa fase è opportuno prestare attenzione all'olio che, in una certa quantità, si trova in sospensione sopra il livello dell'acqua e che potrebbe così entrare nel circuito di prova sporcando gravemente le pareti delle tubazioni; se così accadesse sarebbe necessario perdere tempo per il lavaggio completo dell'intera sezione di prova; per questa operazione all'acqua viene iniettata anche dell'aria che, aumentando la turbolenza del flusso, favorisce la pulizia;
- Chiusura della valvola di immissione dell'acqua posta a ridosso dell'introduttore;
- Si collezionano i dati e si procede alla loro elaborazione;
- Separazione per gravità dei fluidi nel serbatoio di raccolta; le fasi descritte in seguito prevedono che i fluidi abbiano decantato sufficientemente e che quindi non si abbia una emulsione visibile;
- Apertura della valvola di recupero dell'acqua;
- Avvio della pompa di recupero dell'acqua; è necessario prestare attenzione nel corso dell'operazione in quanto il livello di acqua nel serbatoio di raccolta se scende sotto un certa soglia rischia di pompare olio nel serbatoio di sola acqua perdendo così del fluido per la prova successiva;
- Arresto della pompa di recupero e relativa chiusura della valvola;
- Apertura della valvola di recupero dell'olio;
- Avvio della pompa di recupero dell'olio;
- Recuperato l'olio si procede all'arresto della pompa e alla chiusura della rispettiva valvola; è importante osservare che è sempre opportuna chiudere le valvole delle pompe solo dopo averle arrestate, in particolare per le pompe ad ingranaggi.

2.7.1 ACCORGIMENTI ED OSSERVAZIONI

Oltre agli accorgimenti esposti nella procedura standard di esecuzione delle prove, vi sono altri aspetti su cui prestare attenzione per il raggiungimento di una adeguata esecuzione del test:

- Quando i liquidi decantano per molto tempo, per esempio quando l'impianto non è in funzione per qualche giorno, si nota una stratificazione marcata dell'olio. Si presenta una fase pura più leggera dell'olio originario e una seconda fase di olio emulsionato intermedio alla prima e all'acqua. L'esperienza di laboratorio tuttavia suggerisce che l'utilizzo dell'olio puro o di olio emulsionato non è vincolante per l'ottenimento di risultati corretti. Infatti i risultati con olio puro o con emulsione sono molto simili. Nonostante ciò si procede alla miscelazione delle due fasi oleose per avere una unica fase durante le prove;
- Durante le fasi di recupero inevitabilmente un certo quantitativo di olio finisce nel serbatoio dell'acqua e viceversa una certa quantità di acqua finisce nel serbatoio dell'olio. Se i livelli minimi concessi sono rispettati non avremo pompaggio di fluido indesiderato nel circuito durante la prova. Infatti i bocchettoni delle pompe sono disposti strategicamente in modo tale da "pescare" i fluidi con un certo grado di sicurezza. Quando invece il liquido indesiderato si avvicina al bocchettone delle pompe è invece auspicabile eliminarlo secondo due strategie adottate:
 1. La rimozione dell'acqua dal fondo del serbatoio dell'olio è semplice e richiede unicamente di aprire una apposita valvola che permette il deflusso secondo un canale di spurgo grazie all'ausilio di una pompa di aspirazione che invia l'acqua al suo serbatoio di raccolta;
 2. La rimozione dell'olio dal serbatoio dell'acqua invece è più laboriosa. Si procede all'azionamento della pompa centrifuga con lo scopo di svuotare interamente il serbatoio WT. I fluidi sono dunque scaricati nel serbatoio di raccolta dove è sufficiente attendere la decantazione per procedere al recupero dei fluidi come già descritto precedentemente;
- Se si verificano trafiletti di fluido dalle guarnizioni si procede al cambio della guarnizione, se necessario, o si risolve il problema stringendo adeguatamente le flange di accoppiamento. Se invece il trafiletto deriva dagli incollaggi per esempio delle prese di pressione

lungo il tubo bisogna sigillare nuovamente la sezione ricorrendo all'utilizzo di una colla speciale in base al materiale adoperato e ai tempi di seccaggio della colla. Se la perdita si evince nelle giunzioni metalliche filettate presenti nel collettore delle prese di pressione o nelle prese stesse si ricorre a un nuovo strato di teflon.

2.7.2 TEMPO DI DURATA DELLE PROVE

Il tempo di durata dell'esecuzione delle prove varia principalmente in funzione delle portate dei fluidi e dalle capacità dei serbatoi stessi. Un altro fattore importante è la proporzione di olio che si trova nel serbatoio di raccolta a fine prove, infatti più olio immetto rispetto all'acqua più sarà il tempo di decantazione del fluido raccolto. Viene stimato il tempo medio che intercorre tra una prova e l'altra di 45 minuti.

TIPO DI OPERAZIONE	DURATA
Operazioni preliminari (avvio e impostazione di LabVIEW®, regolazione volontario, controllo tubi capillari e collegamenti al collettore delle prese, zero del trasduttore di pressione)	1 minuto
Pulizia iniziale del tubo	30 secondi
Misurazioni	Fino a 5 minuti
Pulizia finale del tubo	15 secondi
Decantazione fluidi	Fino a 30 minuti
Recupero dell'acqua	2 minuti
Recupero completo dell'olio	15 minuti
Decantazione acqua nel serbatoio WT	4-5 minuti

Tabella 2.6-TABELLA DURATA DELLE RELATIVE OPERAZIONI DURANTE LA PROVA

2.8 GRANDEZZE FISICHE RICORRENTI

Altre grandezze fisiche d'interesse sono introdotte in questo paragrafo:

- D -diametri caratteristici del sistema (diametro interno del condotto di prova, diametro di valle del venturi o boccaglio);
- L -lunghezze caratteristiche del sistema (lunghezza della sezione di prova, distanza tra le prese di pressione, lunghezze condotti convergenti (boccaglio e venturi), lunghezza del divergente (venturi));
- $S = \frac{\pi D^2}{4}$ -sezione del condotto se D è il diametro del condotto di prova in $[m^2]$;
- \dot{V}_g -portata volumica di aria (gas) espressa solitamente in $[\frac{m^3}{h}]$;
- \dot{V}_w -portata volumica di acqua (water) espressa solitamente in $[\frac{m^3}{h}]$;
- \dot{V}_o -portata volumica di olio (oil) espressa solitamente in $[\frac{m^3}{h}]$;
- $J_g = \frac{\dot{V}_g}{S}$ -velocità superficiale dell'aria espressa in $[\frac{m}{s}]$;
- $J_w = \frac{\dot{V}_w}{S}$ -velocità superficiale dell'acqua espressa in $[\frac{m}{s}]$;
- $J_o = \frac{\dot{V}_o}{S}$ -velocità superficiale dell'olio espressa in $[\frac{m}{s}]$;
- $J_{tot} = J_g + J_w + J_o$ -velocità superficiale totale del flusso $[\frac{m}{s}]$;
- $\varepsilon_g = \frac{J_g}{J_{tot}}$ -frazione volumica di input di aria;
- $\varepsilon_w = \frac{J_w}{J_{tot}}$ -frazione volumica di input di acqua;
- $\varepsilon_o = \frac{J_o}{J_{tot}}$ -frazione volumica di input di olio;
- $\varepsilon_g + \varepsilon_w + \varepsilon_o = 1$
- $J_L = J_w + J_o$ -velocità superficiale del liquido $[\frac{m}{s}]$;
- $\varepsilon_{g-L} = \frac{J_g}{J_L}$ -frazione volumica di input rispetto al solo liquido di aria;
- $\varepsilon_{w-L} = \frac{J_w}{J_L}$ -frazione volumica di input rispetto al solo liquido di acqua;
- $\varepsilon_{o-L} = \frac{J_o}{J_L}$ -frazione volumica di input rispetto al solo liquido di olio;
- $1 + \varepsilon_{g-L} = \frac{J_{tot}}{J_L}$ -frazione del volume totale rispetto al volume del solo liquido;
- Δp_w -caduta di pressione della sola acqua $[kPa]$;

- Δp_o -caduta di pressione del solo olio [kPa];
- Δp_{w-o} -caduta di pressione della miscela bifase olio-acqua [kPa];
- Δp_{w-o-g} -caduta di pressione della miscela trifase olio-acqua-gas [kPa];
- $\frac{\Delta p}{L}$ -parametro noto come cadente [$\frac{kPa}{m}$]
- $slip = \frac{v_i}{v_k}$ -rapporto tra le velocità di due fasi differenti;
- $H_i = V_i/V_{tot}$ -rapporto tra il volume “in situ” di una fase i-esima e il volume totale, parametro noto come *holdup*.

3. FLUSSO BIFASE ACQUA-ARIA

Come prima fase della campagna sperimentale si è proceduto con lo studio del comportamento del tubo di Venturi e delle cadenti di pressioni a valle del medesimo operando in condizioni di flusso bifase acqua-aria. La configurazione della sezione di prova dell'impianto è essenzialmente la seguente:

- Introduttore;
- Sezione di monte (~7 m);
- Tubo di Venturi;
- Canale di valle con relative prese di pressione (~2 m);
- Sezione di sbocco (~3 m).

Seguendo le procedure standard d'esecuzione prove, descritte nel paragrafo introduttivo, vengono esaminati i flussi d'interesse e quindi l'effetto dell'introduzione di una fase gassosa in flusso monofase di sola acqua all'interno del Venturimetro e a valle dello stesso. Il verificarsi di un particolare regime dipende dalla portata, dalle caratteristiche fisiche, dalle condizioni termodinamiche cui sono sottoposte le singole fasi oltre che dalle caratteristiche fisiche dell'impianto nelle quali scorrono. Una classificazione dei regimi è la seguente:

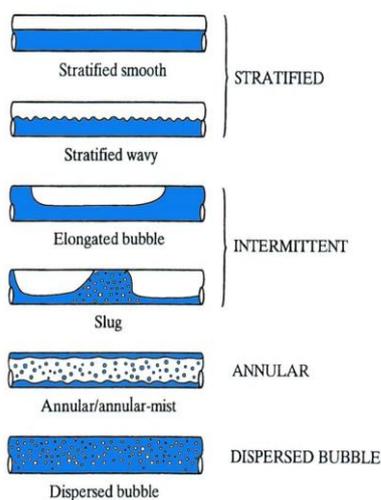


Figura 3.1-REGIMI ACQUA-ARIA IN CONDOTTO ORIZZONTALE A SEZIONE CIRCOLARE

Per la determinazione dei diversi regimi risulta utile la mappa di flusso aria-acqua proposta da *Mandhane et al.* [23] in figura 3.2; come si può notare dalla figura 3.1 i regimi si distinguono principalmente dalla distribuzione delle fasi.

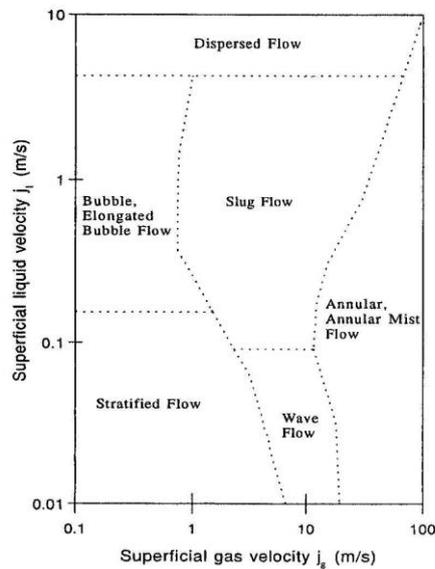


Figura 3.2-MAPPA DI FLUSSO ACQUA-ARIA PROPOSTA DA MANDHANE

Il campo bifase indagato durante la campagna è il seguente:

J_g	J_w
[m/s]	[m/s]
0	0,450
0,383	0,668
0,766	0,899
1,149	1,107
1,531	1,332
1,914	-
2,297	-

Tabella 3.1-VALORI DI VELOCITA' SUPERFICIALI INDAGATE

Si può quindi notare come le velocità superficiali indagate appartengano ad un campo di moto intermittente:

- Slug flow;
- Plug flow;

Questi sono regimi simili che si differenziano poiché all'interno della fase liquida nel flusso a slug sono disperse molte bollicine d'aria che sono invece assenti nel flusso a plug.

3.1 TEST AL TRATTO CONVERGENTE DEL VENTURIMETRO

Il singolo test è eseguito per portata d'acqua costante e a velocità superficiali dell'aria, da 0 [m/s] (monofase acqua) a 2,297 [m/s] in sei passi. Per ogni flusso di acqua-aria fissato vengono acquisiti valori medi delle cadute di pressione al tratto convergente del Venturimetro in un intervallo d'acquisizione pari a 15 secondi. Questa durata è stata scelta valutando la ripetibilità dei valori medi risultanti da diverse prove con diversi intervalli di tempo d'acquisizione. Le fluttuazioni del segnale dovute all'intermittenza del passaggio dei tappi d'aria necessitano infatti un sufficiente tempo d'acquisizione per avere valori medi adeguatamente stabilizzati. I valori medi convergono con errori relativi inferiori all' 1%, già dopo 10 secondi.

È stata effettuata, prima dell'acquisizione, una verifica della stabilità dei regimi di moto nell'impianto nel tempo confrontando le letture di caduta di pressione con altre misure analoghe ripetute. Non si è riscontrata una sostanziale differenza tra i valori letti nelle diverse prove. In questo modo è stato possibile concludere che l'impianto opera stabilmente e che gli stessi regimi lo sono.

Le misure di Δp sono riportate in un piano bidimensionale in funzione della velocità superficiale totale.

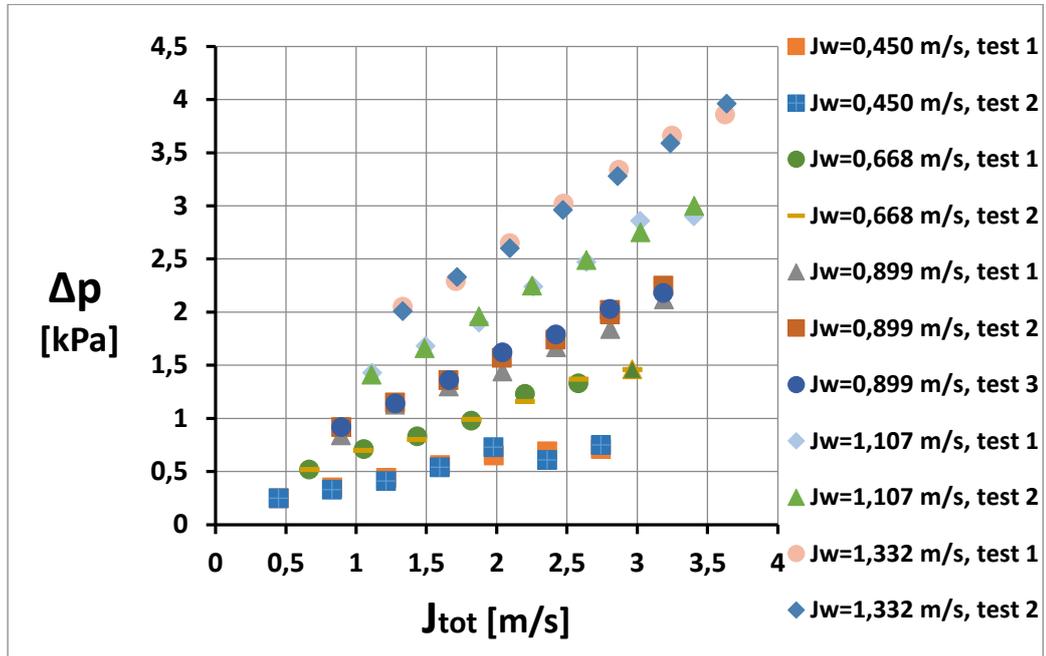


Figura 3.3-CADUTE DI PRESSIONE AL TRATTO CONVERGENTE REGISTRATE IN FUNZIONE DELLA VELOCITA' SUPERFICIALE TOTALE

Si nota dalla figura 3.3 come ogni test ad acqua costante sia crescente a partire dal rispettivo caso monofase (J_{tot} minima della serie). Introducendo aria conseguentemente la caduta cresce fino al punto più alto corrispondente al flusso di aria massimo. I test a portata d'acqua costante risultano avere un comportamento regolare pressoché lineare e sono ben spazati l'uno dall'altro verso l'alto al variare crescente discreto della portata d'acqua.

Per stabilire la ripetibilità dell'esperimento vengono eseguiti 10 test per ciascuna portata d'acqua di 2-4-6 [m^3/h] in cui risultati sono mostrati graficamente nella figura 3.4.

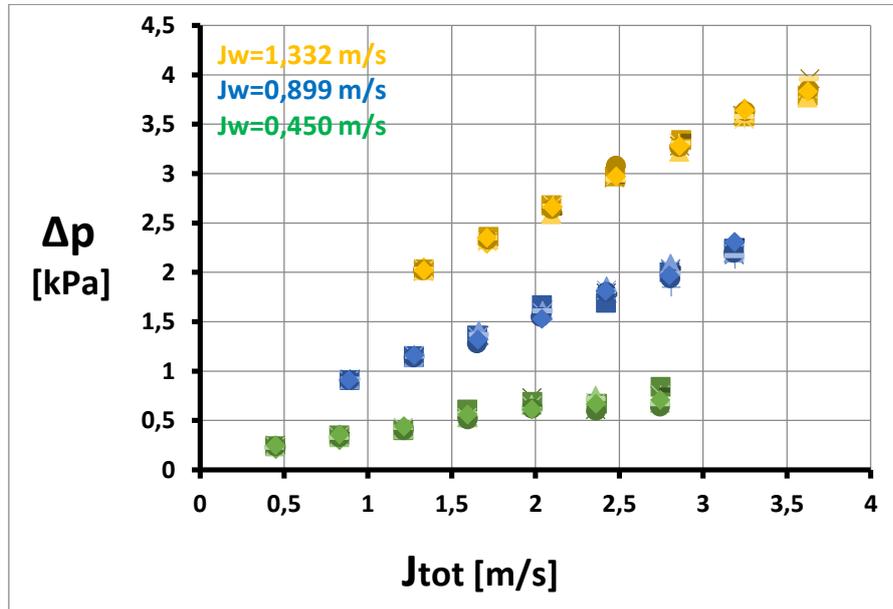


Figura 3.4-TEST DI RIPETIBILITA' PER LE CADUTE DI PRESSIONE AL TRATTO CONVERGENTE E
 $J_w = 0,450 - 0,899 - 1,332 \left[\frac{m}{s} \right]$

Per il calcolo della deviazione standard relativa alla media viene innanzitutto calcolato il valore medio della caduta di pressione fissata la portata di acqua e di aria (per i punti sul grafico che risultano sovrapposti). Considerando le 10 prove viene applicata la seguente relazione:

$$DEV.ST.rel = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{10} \left(\frac{\Delta p_n}{\overline{\Delta p}} - 1 \right)^2}{n - 1}} \quad (23)$$

- n - numero di prove (nel nostro caso 10);
- $\overline{\Delta p}$ - caduta media a portata aria-acqua fissata;
- Δp_n - valore della caduta misurato per la singola portata aria-acqua fissata durante il test n-esimo;

Viene quindi esposto nella figura 3.5 il grafico delle cadute di pressione medie con le relative barre di errore (le deviazioni standard relative alla media sono sempre minori al 10%). I risultati ottenuti sono molto soddisfacenti considerando le imprecisioni operative dovute alle regolazioni manuali delle portate, all'incertezza di misura degli strumenti e alla vicinanza di alcuni valori di Δp alla sensibilità del trasduttore.

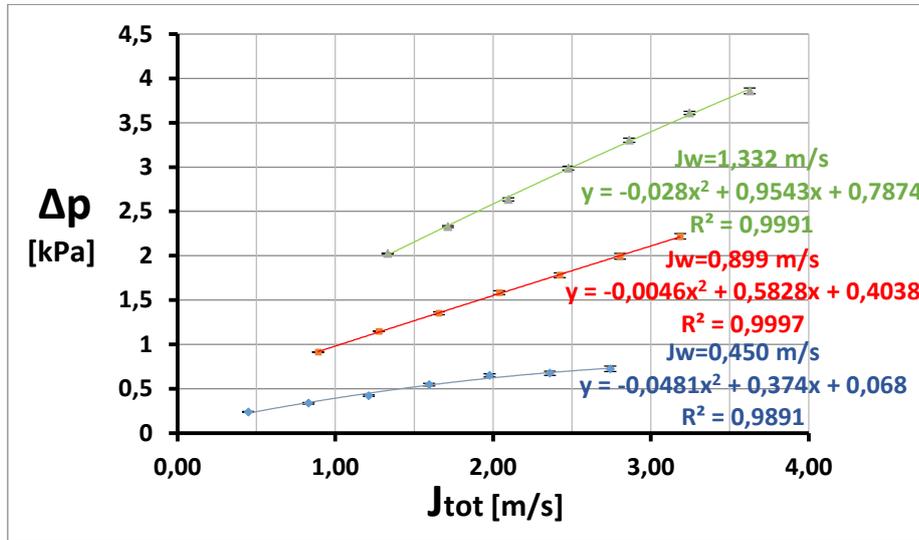


Figura 3.5-ANDAMENTO MEDIO DELLE CADUTE DI PRESSIONE AL TRATTO CONVERGENTE

È interessante confrontare i risultati sperimentali con le previsioni del modello omogeneo. Quest'ultimo considera velocità uniforme uguale per ogni fase (slip ratio uniforme) e proprietà medie pesate. In particolare la densità omogenea è data dalla relazione:

$$\rho_h = \rho_w \times \varepsilon_w + \rho_g \times \varepsilon_g \quad (24)$$

Applicando il teorema di Bernoulli a un deflusso orizzontale si ha:

$$p + \frac{1}{2} \rho_h v^2 = \text{const.} \quad (25)$$

Dove ρ_h è la densità del fluido omogeneo sopra definita, p la pressione media e v la velocità media del flusso. La variazione di pressione fra la sezione di ingresso e la sezione di uscita (gola) è dunque:

$$p_0 - p_1 = \frac{1}{2} \rho_h (v_1^2 - v_0^2) \quad (27)$$

Considerando la variazione dell'area della sezione e applicando il principio di conservazione della massa, si ottiene:

$$\Delta p_{hm} = \frac{1}{2} \times \rho_h \times J_{tot}^2 \times (\sigma^4 - 1) \quad (28)$$

Dove σ rappresenta il rapporto fra le aree delle sezioni di ingresso e di uscita (gola).

I valori di Δp predetti dal modello omogeneo risultano generalmente inferiori ai valori misurati, come si evince dal parity plot di figura 3.6. Si osserva, inoltre, che lo scostamento dal modello omogeneo è tanto più elevato quanto è maggiore la portata d'aria. In particolare, lo scostamento relativo dato dalla relazione (29) è inferiore al 10% per flusso monofase di sola acqua mentre cresce fino al 50% per flussi bifase con valori massimi delle portate di aria.

$$S_{rel,i} = \frac{|\Delta p_{hm,i} - \Delta p_{meas,i}|}{\Delta p_{hm,i}} \quad (29)$$

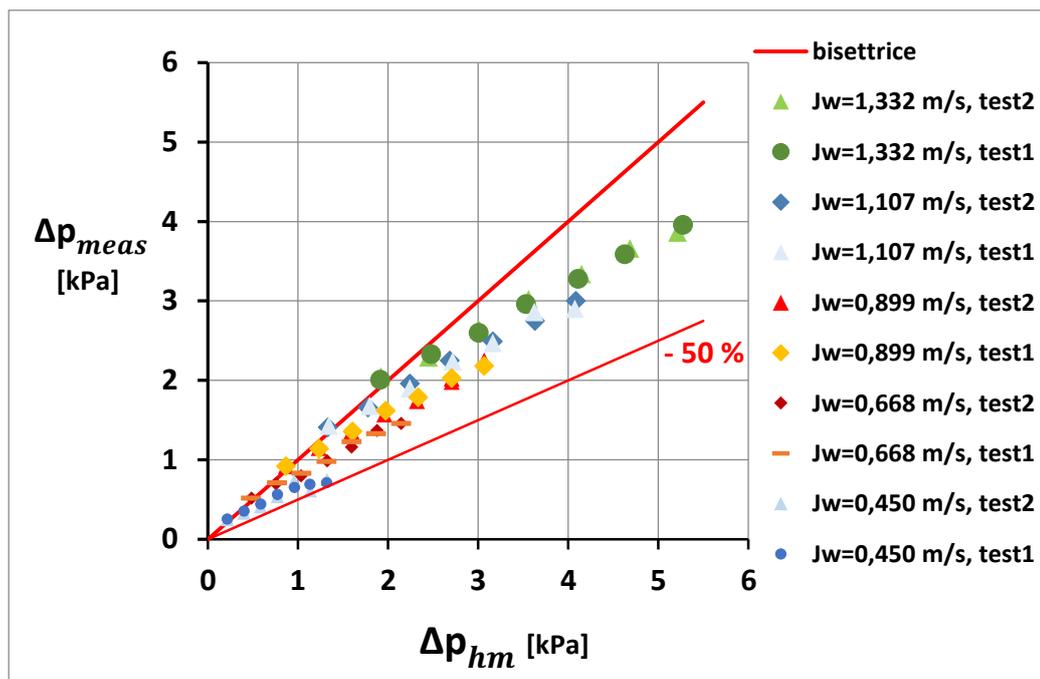


Figura 3.6-PARITY PLOT

Una spiegazione plausibile della riduzione della caduta di pressione risiede nella diversa velocità delle fasi dato che l'aria tende a muoversi ad una velocità maggiore rispetto all'acqua, essa occupa una sezione di area minore rispetto a quella che occuperebbe in base al modello omogeneo. Dunque la fase liquida

scorre in una sezione di passaggio di area maggiore, risultando più lenta e comportando una riduzione generale della caduta di pressione rispetto al modello omogeneo.

In ogni caso, il confronto con il modello omogeneo mostra che non è auspicabile impiegare il Venturimetro per la misura della portata del flusso bifase acqua-aria.

3.2 TEST AL TRATTO DIVERGENTE DEL VENTURIMETRO

I parametri calcolati durante la campagna sono i medesimi della campagna sul tratto convergente, ma le variazioni di pressione in questo caso sono in realtà “recuperi” in quanto, secondo il teorema di conservazione dell’energia meccanica con ipotesi analoghe alla trattazione del convergente, ad una diminuzione della velocità corrisponde un aumento della pressione.

In questo caso le sezioni in esame sono quella di gola (1) e quella a valle del canale divergente (2).

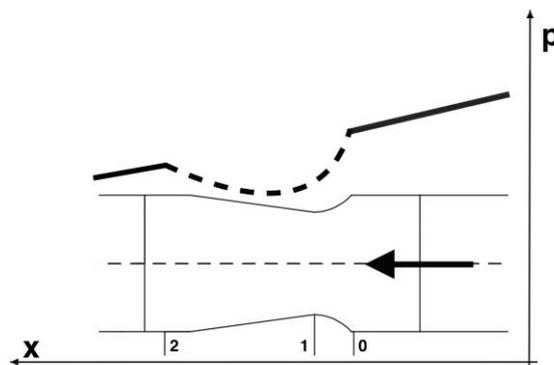


Figura 3.7- PROFILO DI PRESSIONE NEL VENTURI

I test si ripetono con le stesse modalità dei test al convergente, cioè fissando una portata di acqua e portando il flusso da monofase acqua a bifase acqua-aria con portata massima di gas.

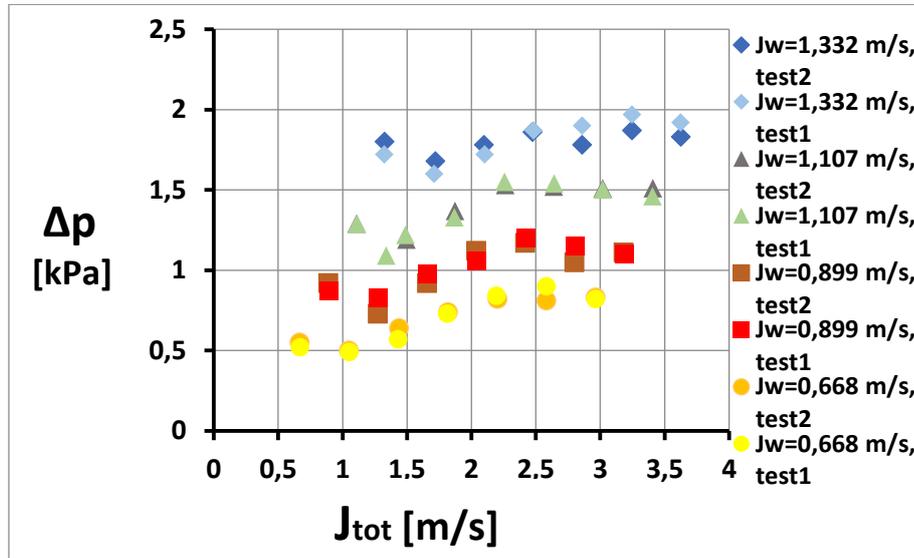


Figura 3.8-TEST DI CADUTA DI PRESSIONE AL TRATTO DIVERGENTE PER $J_w = 0,668 - 0,899 - 1,107 - 1,332$ [m/s]

Rispetto al tratto convergente, gli andamenti risultano meno regolari e con una tendenza ad appiattirsi al crescere della velocità superficiale della miscela. Le misure sono ripetibili con deviazioni standard relative al valor medio, calcolate in modo analogo a quelle del tratto convergente sempre inferiori al 10%. In figura 3.9 è mostrato l'andamento medio dei Δp su 10 test per i flussi di acqua di 3-4-6 [m³/h].

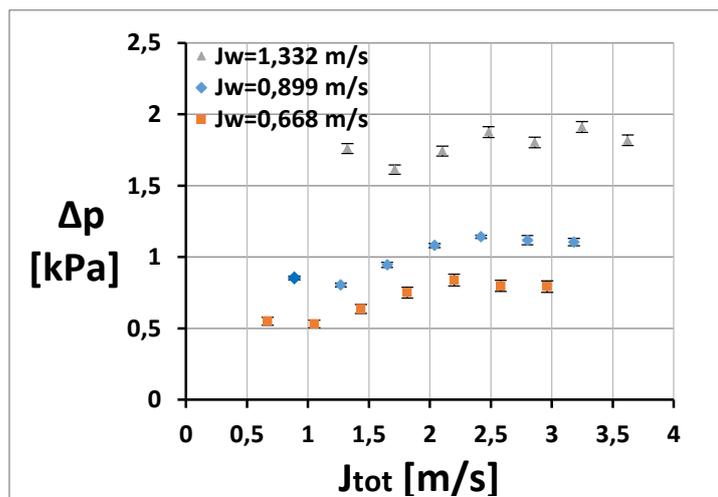


Figura 3.9-ANDAMENTO MEDIO TEST AL DIVERGENTE

3.3 CAMPAGNA CADENTE DI VALLE

Per valutare le cadenti di pressione a valle dello strumento si procede ad una distanza sufficiente rispetto alla sezione (2) affinché il flusso abbia recuperato la sua struttura originale in una condizione di regime pienamente sviluppato. Le osservazioni visive suggeriscono che il Venturimetro non altera significativamente la struttura del flusso a valle, che pare del tutto analogo a quello di monte.

Le velocità superficiali acqua-aria indagate sono le stesse delle campagne precedenti. Analoghe sono le modalità di esecuzione dei test.

Le cadenti di pressione sono valutate mediante regressione lineare delle cadute di pressione rispetto alla presa più a monte. Come si evince dal grafico di figura 3.10, l'andamento delle cadute di pressione è con ottima approssimazione lineare, perciò la caduta è assunta pari al coefficiente angolare della retta di regressione.

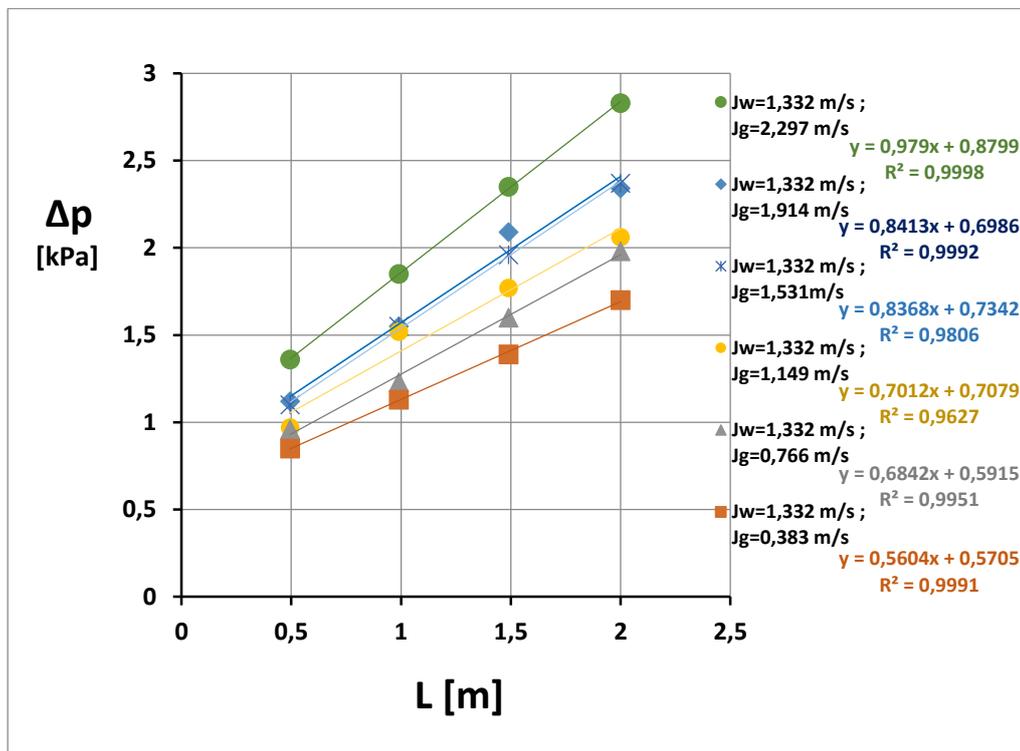


Figura 3.10-RETTE INTERPOLANTI LE CADUTE DI PRESSIONE TRA LE PRESE PER LE VALUTAZIONE DELLE CADENTI

La figura 3.10 mostra andamenti rappresentativi di tutta la campagna sperimentale. Si nota come, a parità di velocità superficiale dell'acqua, la cadente cresce con la velocità superficiale dell'aria.

D'altra parte l'andamento delle cadenti al variare della portata d'aria fissata quella di acqua è mostrato nella figura 3.11, dove si nota un andamento crescente pressoché lineare all'aumentare del gas introdotto.

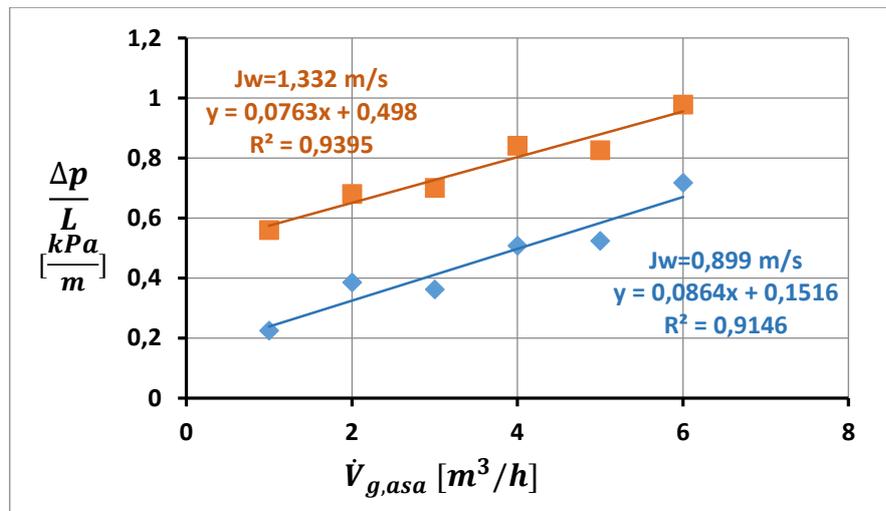


Figura 3.11-ANDAMENTO CADENTI IN FUNZIONE DELLA PORTATA DI GAS LETTA ALL'ASOMETRO

3.4 CONFRONTO CON IL MODELLO DI LOCKHART-MARTINELLI

In questo paragrafo viene applicato il modello di *Lockhart-Martinelli* per valutare le cadenti di pressione del flusso bifase liquido-gas e si analizzano gli scostamenti del modello dalle misure. Per questo confronto vengono indagate le portate d'acqua di 4 – 6 [m^3/h] e le rispettive portate d'aria di 2,346 – 6,928 – 10,392 [m^3/h]. Per il flusso di acqua di 6 [m^3/h] viene eseguito anche un test a flusso d'aria pari a 1,732 [m^3/h].

Le assunzioni su cui si basa il modello sono:

- Velocità uniforme, ma non uguale per la fase vapore e la fase liquida;
- Fasi in equilibrio termodinamico;

- Definizione di un fattore di incremento della caduta di pressione, detto moltiplicatore, rispetto al flusso monofase, correlato empiricamente alle proprietà del flusso.

Innanzitutto è necessario calcolare il numero di Reynolds per le due fasi distinte assumendo che fluiscono sole nel condotto:

- $Re_w = \frac{\rho_w J_w D}{\mu_w}$ (30)

- $Re_g = \frac{\rho_g J_g D}{\mu_g}$ (31)

A questo punto è possibile valutare il fattore d'attrito in base al fatto che il moto sia turbolento o laminare, valutando il numero di Reynolds delle singole componenti. Per geometria interna e condotto cilindrico:

- $Re_i < 2000$ *laminare*;
- $Re_i > 10000$ *turbolento*;

In regime laminare, il fattore d'attrito (di Fanning) è:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (32)$$

In un regime turbolento ci si può riferire alla relazione di Blasius:

$$f = 0,316 Re^{-0,25} \quad (33)$$

In un cilindro di diametro interno pari a D la caduta di pressione di un flusso monofase viscoso risulta:

$$\frac{\Delta p}{L} = 2f\rho \frac{J^2}{D} \quad (34)$$

Vengono in questo modo calcolate le cadenti monofase:

- $\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_g$
- $\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_w$

I moltiplicatori bifase sono definiti come segue:

$$\phi_w^2 = \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{w-g} / \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_w \quad (35)$$

$$\phi_g^2 = \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{w-g} / \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_g \quad (36)$$

Definito un parametro X^2 come rapporto tra le cadenti monofase,

$$X^2 = \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_w / \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_g \quad (37)$$

I moltiplicatori risultano ben correlati dalle espressioni:

$$\phi_w^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (38)$$

$$\phi_g^2 = 1 + CX + X^2 \quad (39)$$

Dove il coefficiente C viene scelto in base alla seguente tabella:

Liquid	Gas	C
Turbolento	Turbolento	20
Laminare	Turbolento	12
Turbolento	Laminare	10
Laminare	Laminare	5

Tabella 3.2-COEFFICIENTI C PER VALUTAZIONE DEL FRICTION FACTOR MULTIPLIER

La figura 3.12 riporta il confronto fra le misure e la predizione del modello. L'accordo è discreto e si osservano deviazioni maggiori al crescere della portata di acqua e di gas, come mostrato nella tabella 3.3 dove si riporta l'errore relativo in funzione della portata di gas per la portata di acqua più alta.

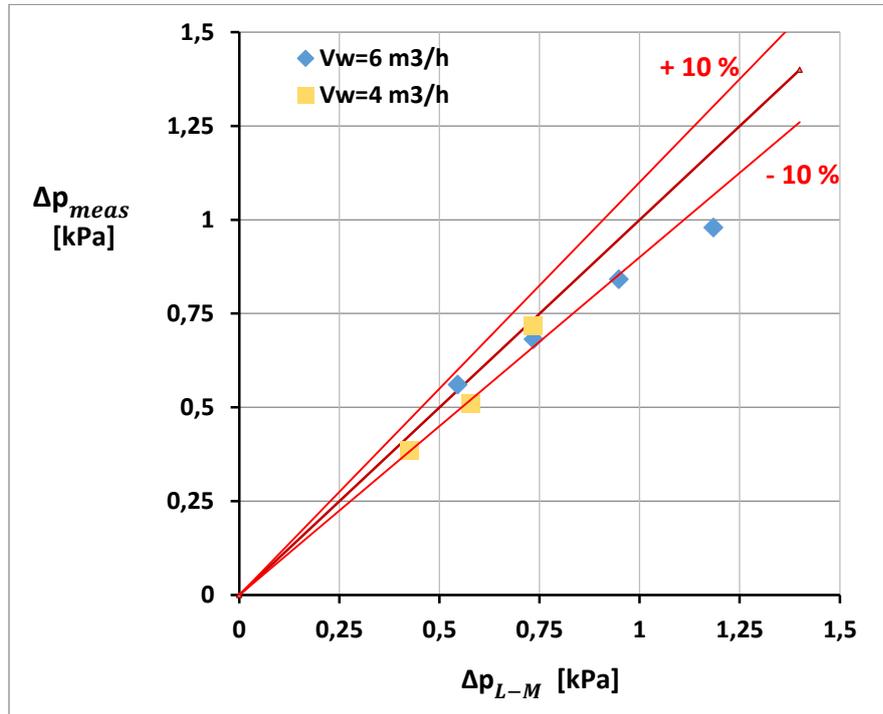


Figura 3.12-PARITY PLOT

$\dot{V}_{g,asa}$ [m ³ /h] $\dot{V}_w = 6$ [m ³ /h]	<i>errore relativo</i>
1	-2,58%
2	7,92%
4	12,77%
6	20,91%

Tabella 3.3-ERRORI RELATIVI

Tali valori dell'errore relativo sono comunque allineati alla capacità predittiva della correlazione riportata in letteratura.

3.5 CAMPAGNA FOTOGRAFICA

In questo paragrafo vengono mostrate le immagini acquisite tramite la fotocamera. L'osservazione della struttura del flusso è importante poiché non sono ancora disponibili modelli in grado di predire i regimi di moto note le condizioni operative. Le immagini catturate sono riferite al flusso a monte del Venturimetro. Come già osservato a valle la struttura del flusso rimane sostanzialmente invariata. Dalle figure 3.13 e 3.14, a portata d'aria minima di $1,732 [m^3/h]$ e di acqua di $5 [m^3/h]$, si nota la tipica struttura a “elongated bubbles” caratterizzata da una interfaccia acqua-aria ben definita. D'altra parte la lunghezza bolle è piuttosto variabile.

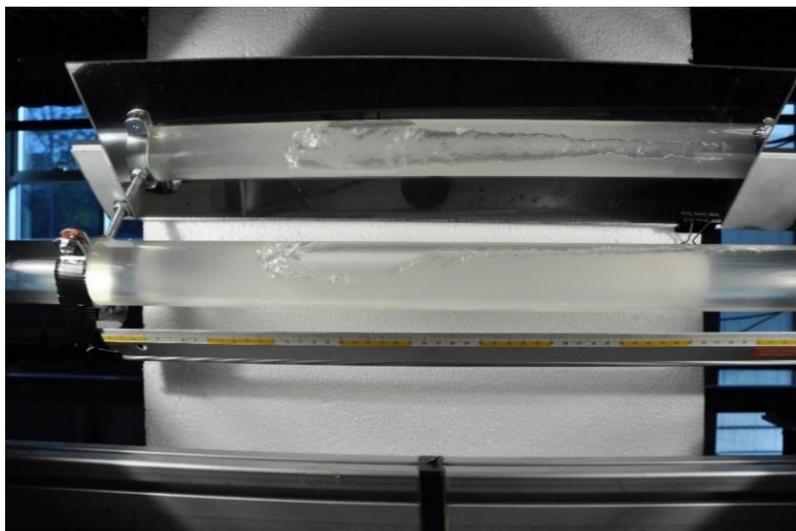


Figura 3.13-FLUSSO A MONTE DEL VENTURIMETRO A $J_w = 0,606 m/s$ E $J_g = 0,383 m/s$

Aumentando la portata d'aria a $2,346 [m^3/h]$, mantenendo costante quella d'acqua le bolle tendono sempre più ad allungarsi ed a occupare una sezione di passaggio sempre maggiore come illustrato nella figura 3.15. Nella figura 3.16, si nota la transizione da plug flow a slug flow, con la comparsa di numerose bollicine specialmente sul fronte e sulla coda delle bolle allungate.

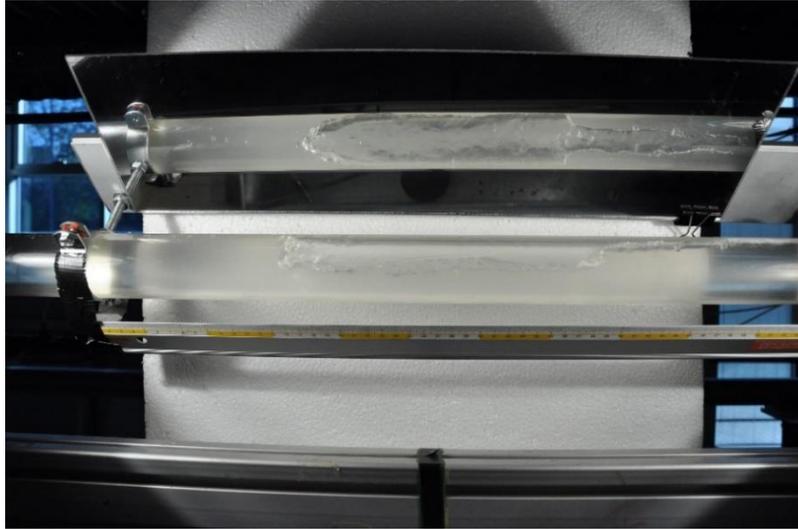


Figura 3.14- FLUSSO A MONTE DEL VENTURIMETRO A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,383 \text{ m/s}$

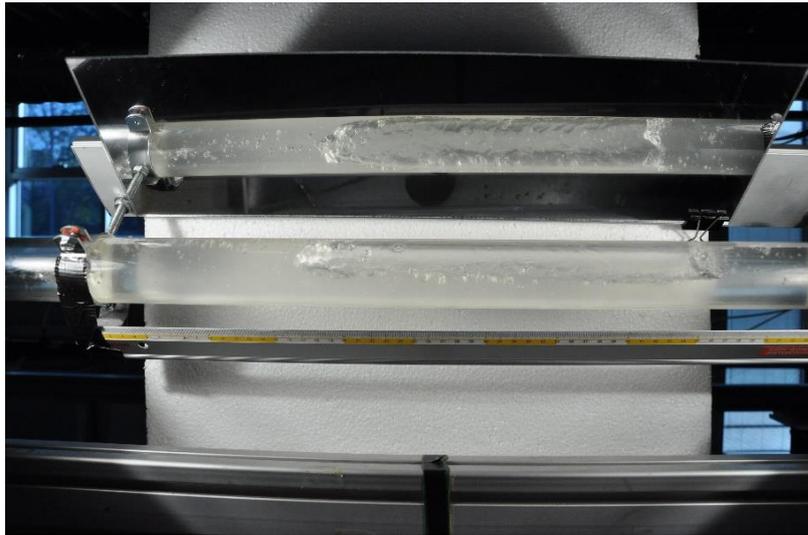


Figura 3.15- FLUSSO A MONTE DEL VENTURI A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,766 \text{ m/s}$

Tenendo sempre fissa la portata d'acqua e incrementando ulteriormente la porta di aria si ottiene una transizione completa. Infatti la figura 3.17 mostra un classico regime “slug flow”.

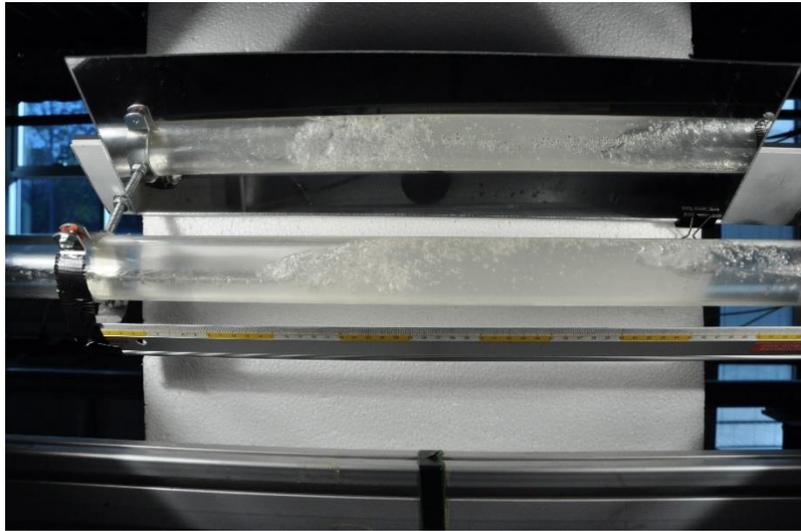


Figura 3.16- FLUSSO A MONTE DEL VENTURI A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,766 \text{ m/s}$

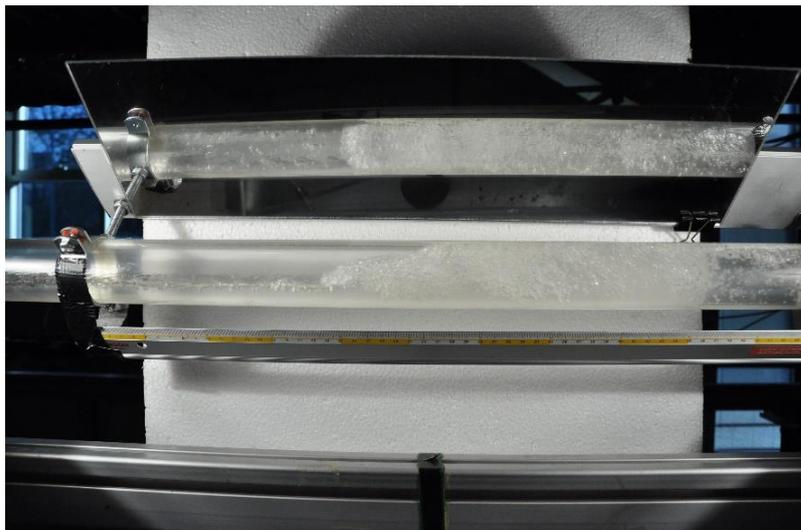


Figura 3.17- FLUSSO A MONTE DEL VENTURI A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 1,914 \text{ m/s}$

All'interno del Tubo di Venturi si possono osservare chiaramente, come da figura 3.19, l'effetto di accelerazione del flusso nel convergente e il successivo rallentamento guidato dal convergente: il flusso acqua-aria tende ad assumere una configurazione pressoché anulare all'interno del Venturimetro a causa dell'accelerazione dovuta al tratto convergente.

La successiva decelerazione favorisce invece la rottura dell'anello liquido e l'istaurarsi di un moto caotico di bollicine. Tuttavia, pochi diametri più a valle, si ripristina un regime del tutto analogo a quello di monte.

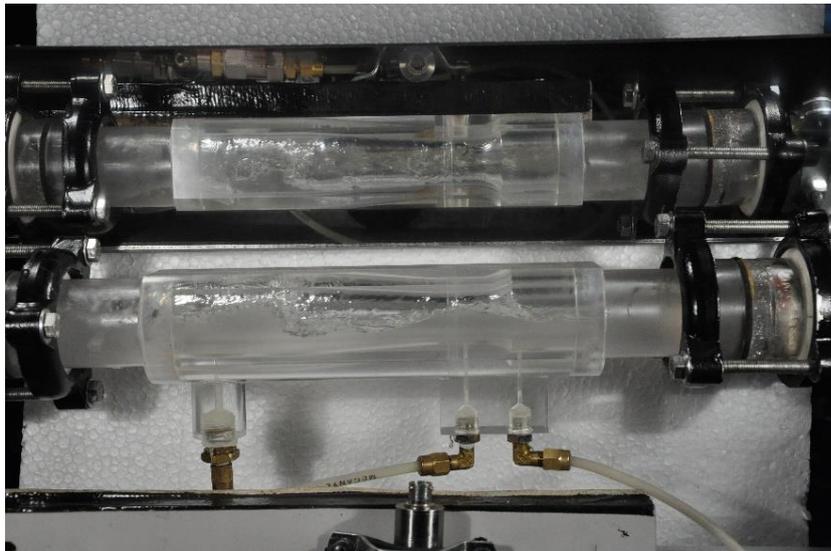


Figura 3.18- FLUSSO NEL VENTURI A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,383 \text{ m/s}$

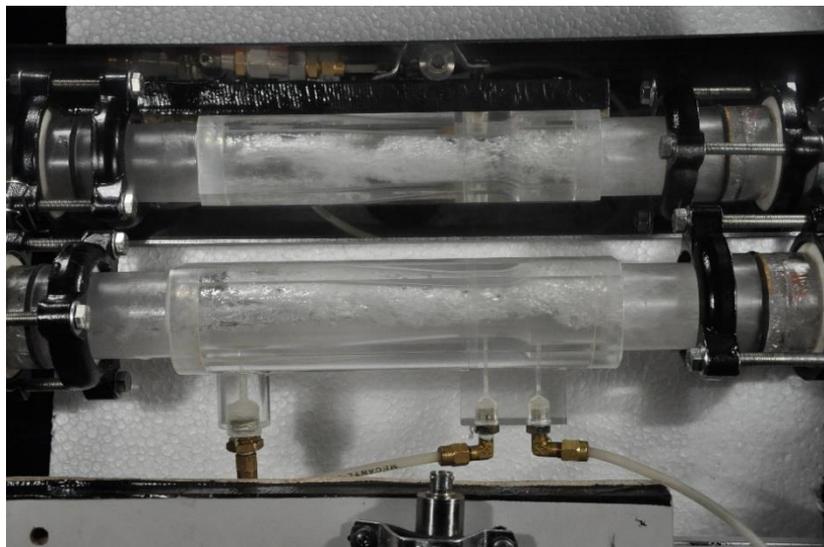


Figura 3.19- FLUSSO NEL VENTURI A $J_w = 0,606 \text{ m/s}$ E $J_g = 2,297 \text{ m/s}$

4. FLUSSO BIFASE ACQUA-OLIO

4.1 CAMPAGNA BOCCAGLIO

A differenza della campagna precedente è stato installato il Boccaglio nella medesima posizione della sezione di prova in cui era posizionato Venturimetro. Il tratto convergente del Boccaglio ha geometria e dimensioni prossime a quelle del Venturi. Dopo pochi diametri il flusso recupera la struttura iniziale senza quindi essere influenzato significativamente dallo strumento a monte.

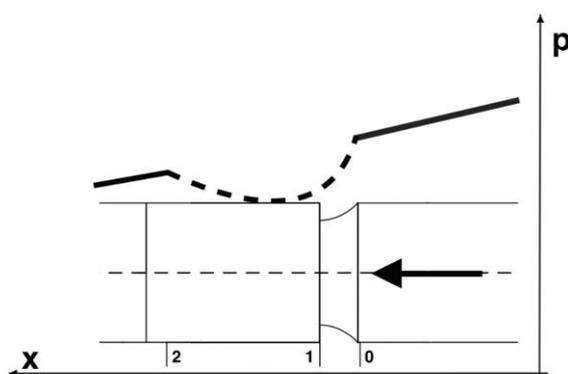


Figura 4.1-ANDAMENTO QUALITATIVO PRESSIONE LUNGO IL BOCCAGLIO

I test in questa campagna vengono svolti a portata di olio costante e variando l'acqua dal valore di portata minimo fino al massimo della serie (tabella 4.1). Nella figura 4.2 sono mostrati i risultati delle cadute di gola per quattro posizioni del volantino di regolazione corrispondenti alle velocità superficiali di 0,365 – 0,482 – 0,606 – 0,717 m/s in funzione della velocità superficiale dell'acqua.

$J_o \left[\frac{m}{s} \right]$	$J_w \left[\frac{m}{s} \right]$
0,248	0,450
0,365	0,668
0,482	0,899
0,606	1,107
0,717	1,332

Tabella 4.1-VALORI DI VELOCITA' SUPERFICIALE DI OLIO E ACQUA INDAGATE

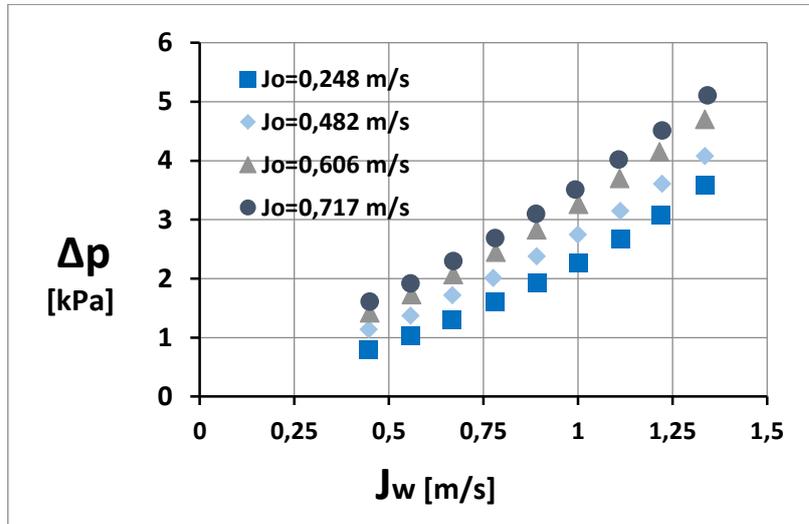


Figura 4.2-CADUTA AL CONVERGENTE DEL BOCCAGLIO IN FUNZIONE DELLA VELOCITA' SUPERFICIALE DELL'ACQUA J_w

Notiamo un andamento crescente delle cadute di pressione con la velocità superficiale dell'olio. Inoltre le curve dei singoli test risultano ben spaziate l'una dall'altra. Se invece le medesime cadute di pressione sono riportate in funzione della velocità totale del flusso J_{tot} notiamo un unico andamento quadratico per i tutti i punti (figura 4.3).

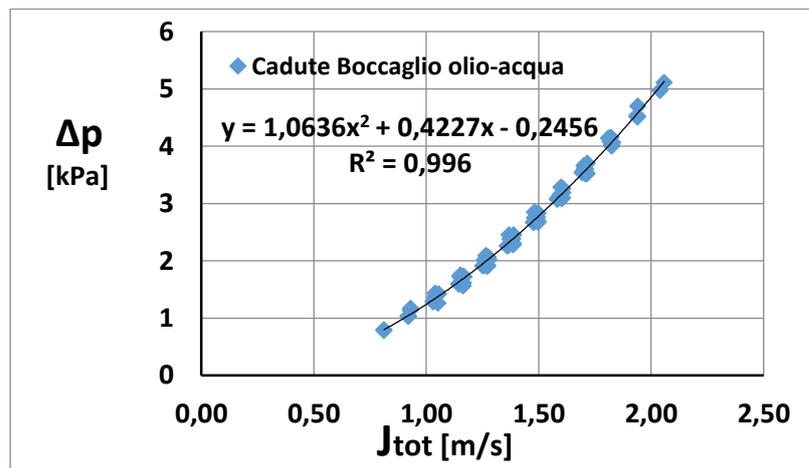


Figura 4.3- CADUTA AL CONVERGENTE DEL BOCCAGLIO IN FUNZIONE DELLA VELOCITA' SUPERFICIALE TOTALE J_{tot}

Un altro risultato interessante è dato dal confronto delle misure con la previsione del modello omogeneo. Riportando i risultati in un parity plot, figura 4.4, è possibile notare che i punti sperimentali si dispongono verso l'alto rispetto la bisettrice.

Confrontando le misure con il modello omogeneo, si osserva che la caduta di pressione viene sovrastimata mediamente di circa il 15%. Il comportamento è molto diverso da quello di un flusso bifase aria-acqua che esibisce un forte scostamento dal modello omogeneo. Ciò potrebbe essere giustificato dal rapporto di scorrimento (slip) che, data la massa volumica simile delle due fasi, dovrebbe assumere valori prossimi all'unità.

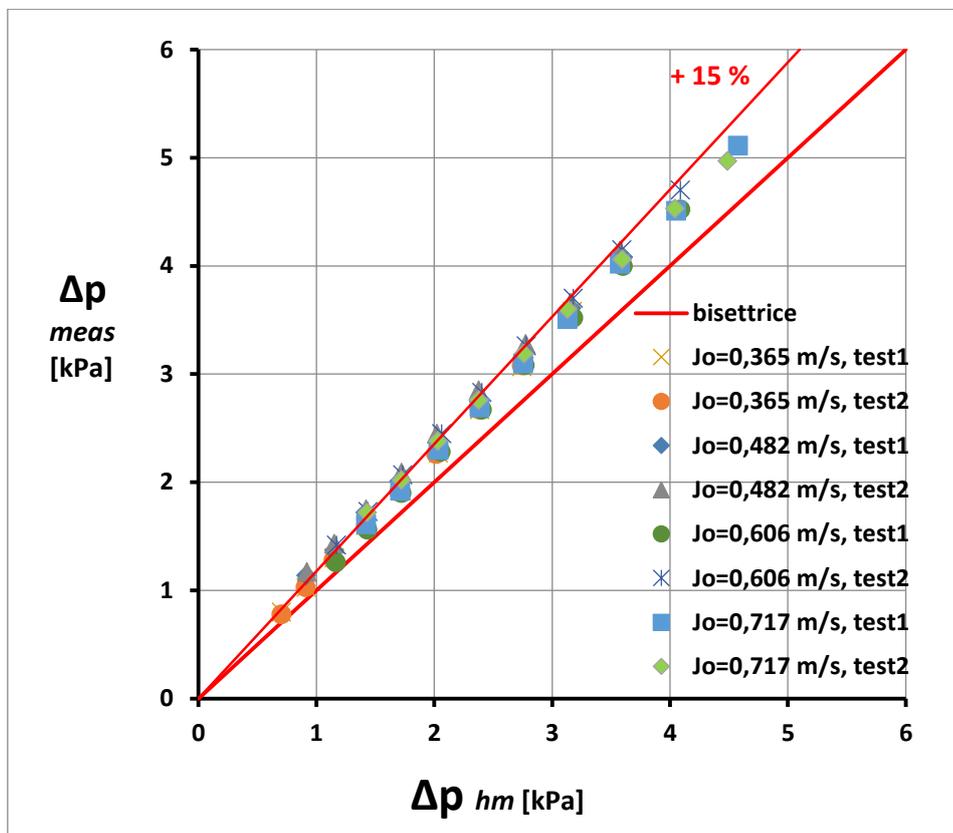


Figura 4.4-PARITY PLOT

4.2 CAMPAGNA CADENTE DI VALLE

I risultati, che mostrano andamenti lineari delle cadute di pressione (figura 4.5), sembrerebbero suggerire che il boccaglio non perturba eccessivamente il regime di moto a valle. Come ci si attende, le cadenti risultano crescenti con la frazione di acqua a parità di velocità dell'olio (figura 4.6).

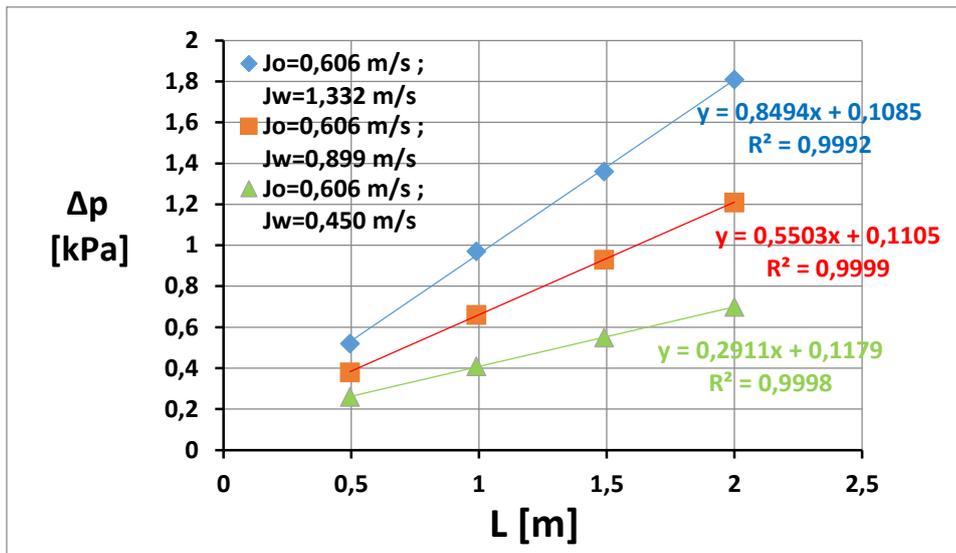


Figura 4.5- RETTE INTERPOLANTI LE CADUTE DI PRESSIONE TRA LE PRESE PER LE VALUTAZIONE DELLE CADENTI

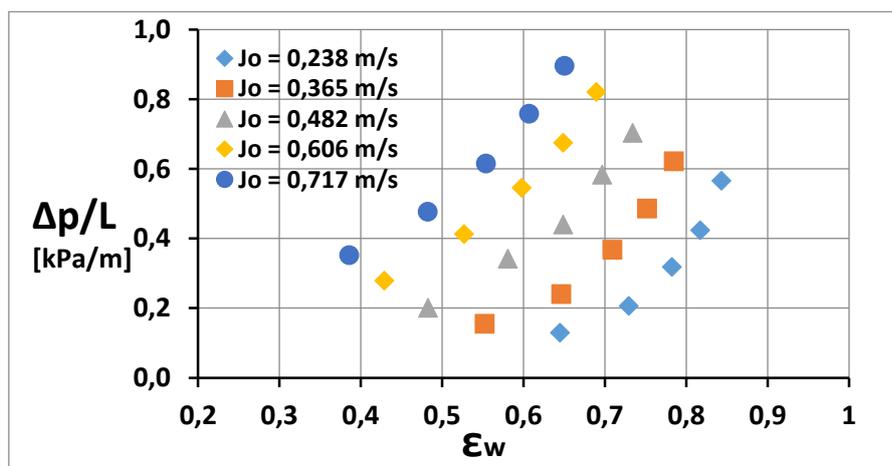


Figura 4.6-CADENTE vs ϵ_w

4.3 CONFRONTO VENTURI-BOCCAGLIO

In questo paragrafo viene effettuato un confronto coi dati raccolti in un lavoro precedente nel medesimo Venturimetro usato per i flussi acqua-olio sopra descritti.

La figura 4.9 mostra che il comportamento dei due strumenti è leggermente differente presumibilmente a causa della brusca espansione a valle del boccaglio. Gli scostamenti sono tuttavia contenuti entro il 15% per il 90% dei dati sebbene sia evidente come il Venturimetro mostri un comportamento più vicino al modello omogeneo.

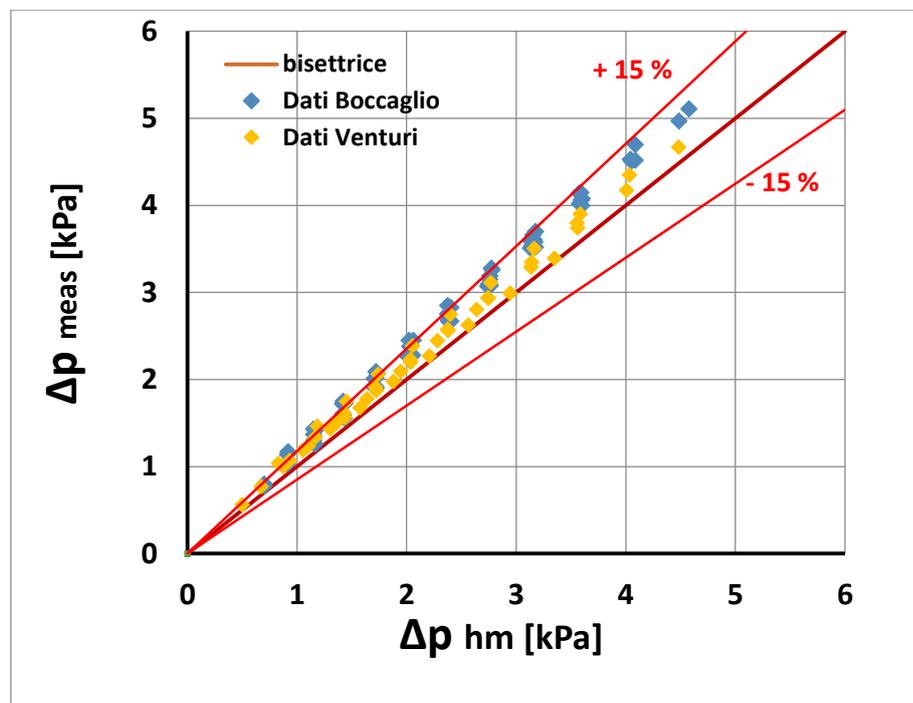


Figura 4.7-PARITY PLOT CONFRONTO DATI BOCCAGLIO E DATI VENTURI

4.5 DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DELLE SINGOLE FASI

Le portate delle singole fasi possono essere determinate mediante un modello semiempirico, precedentemente sviluppato nel laboratorio di Termofluidodinamica Multifase ora in corso di pubblicazione. Il calcolo è basato sul modello a flussi separati per un regime di moto anulare che fornisce un legame fra la cadente in un condotto orizzontale di sezione costante e la frazione volumica in situ (holdup) dell'acqua:

$$H_w = \left[\frac{C_w \left(\frac{DJ_w}{v_w} \right)^{-n_w} \rho_w J_w^2}{\left(-\frac{dp}{dx} \right) \frac{D}{2}} \right]^{0,5} \quad (40)$$

Dove C_w e n_w dipendono dal regime di moto. D'altra parte l'holdup dell'acqua è empiricamente legato alla frazione volumica all'ingresso, ε_w , dalla correlazione di Arney:

$$H_w = \varepsilon_w [1 + 0,35(1 - \varepsilon_w)] \quad (41)$$

Si può dunque impostare il seguente algoritmo:

- 1) Dalla misura di Δp nel boccaglio si determina J_{tot} dall'andamento riportato in figura 4.5;
- 2) Dalla misura della cadente si risolve iterativamente il sistema di equazioni 40 e 41 sostituendo ε_w con J_w/J_{tot} ;
- 3) Si calcola J_o per differenza fra J_{tot} e J_w .

La figura 4.8 e 4.9 riportano il confronto tra la velocità superficiale (proporzionale alla portata) calcolata dal modello e i valori imposti nella varie prove sia per il Venturimetro sia per il boccaglio. Si osserva un accordo molto buono, ciò che consente di concludere in favore della possibilità di utilizzo del Venturimetro non solo per la determinazione della portata totale fluente, ma anche per la misura della portata delle singole fasi.

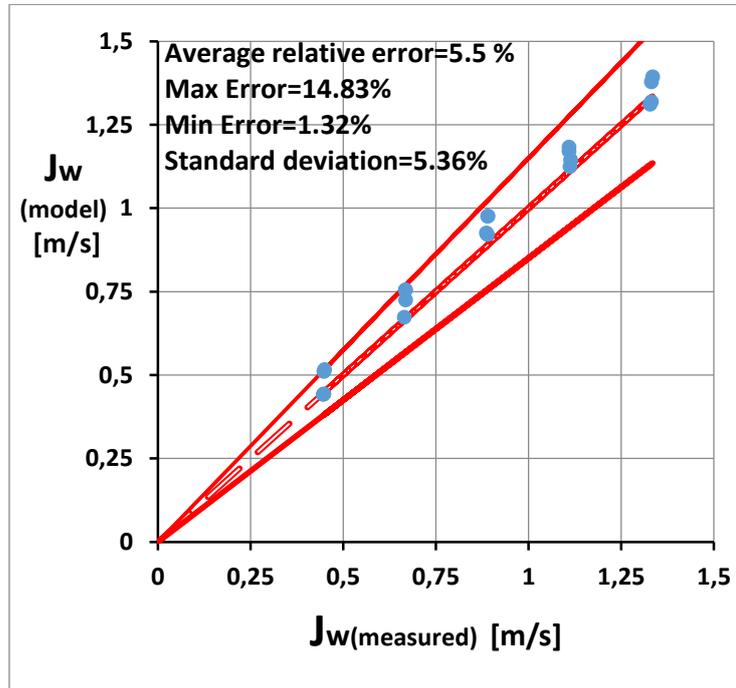


Figura 4.8- PARITY PLOT DATI BOCCAGLIO

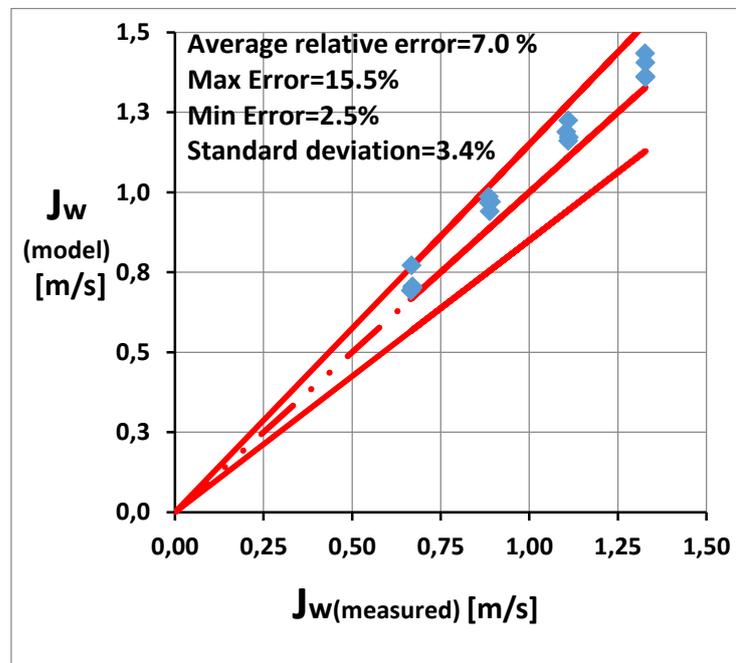


Figura 4.9- PARITY PLOT DATI VENTURI

4.6 CAMPAGNA FOTOGRAFICA

Ogni condizione sperimentale viene corredata dall'acquisizione di fotografie dei regimi di moto. Le fotografie riguardano sia moti pienamente sviluppati lungo la condotta orizzontale di monte a sezione costante di 40 mm di diametro sia il flusso traversante il boccaglio. In questo modo è possibile confrontare le osservazioni con le mappe di flusso disponibili e valutare l'effetto della presenza del boccaglio sulla struttura del flusso a valle.

Per quanto riguarda il condotto di sezione costante nelle fotografie 4.10, 4.11, 4.12, alla massima velocità superficiale dell'olio ($0,717 \text{ m/s}$) e velocità superficiale di acqua decrescente (rispettivamente $J_w = 1,332 \text{ m/s}$, $J_w = 0,899 \text{ m/s}$ e $J_w = 0,450 \text{ m/s}$), a partire da un regime di transizione disperso-anulare si osserva una transizione completa a moto anulare con un core leggermente eccentrico.

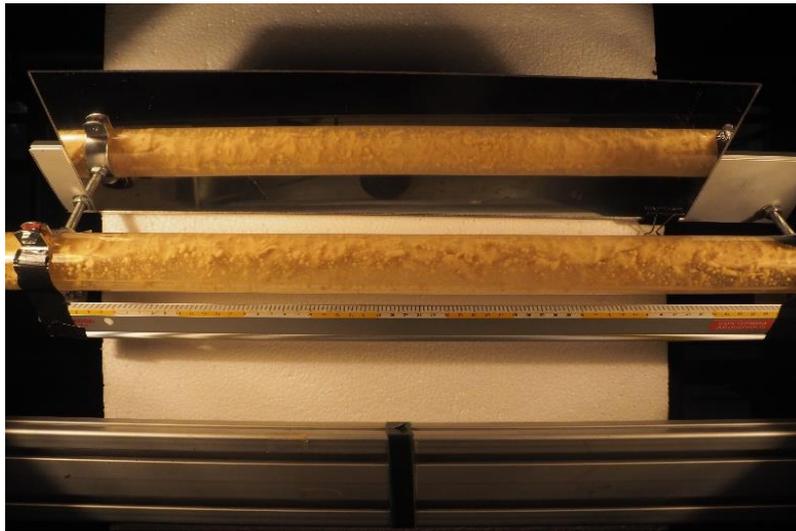


Figura 4.10- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$ E $J_w = 1,332 \text{ m/s}$



Figura 4.11- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$ E $J_w = 0,899 \text{ m/s}$



Figura 4.12- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$ E $J_w = 0,450 \text{ m/s}$

È interessante notare da queste fotografie come le gocce di olio, mano a mano che il flusso di acqua viene ridotto, si aggregano al nucleo. Questo presenta le caratteristiche corrugazioni all'interfaccia con l'acqua, che come previsto dalla mappa di flusso bagna sempre la parete della condotta evitando il contatto dell'olio con la parete.

Nelle figure 4.13 e 4.14 è mostrata la transizione quasi completa dal regime disperso a quello anulare per la minima velocità superficiale di olio ($0,248 \text{ m/s}$), riducendo la velocità superficiale dell'acqua da $1,332 \text{ m/s}$ (figura 4.13) a $0,899 \text{ m/s}$ (figura 4.14).



Figura 4.13- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,248 \text{ m/s}$ E $J_w = 1,332 \text{ m/s}$

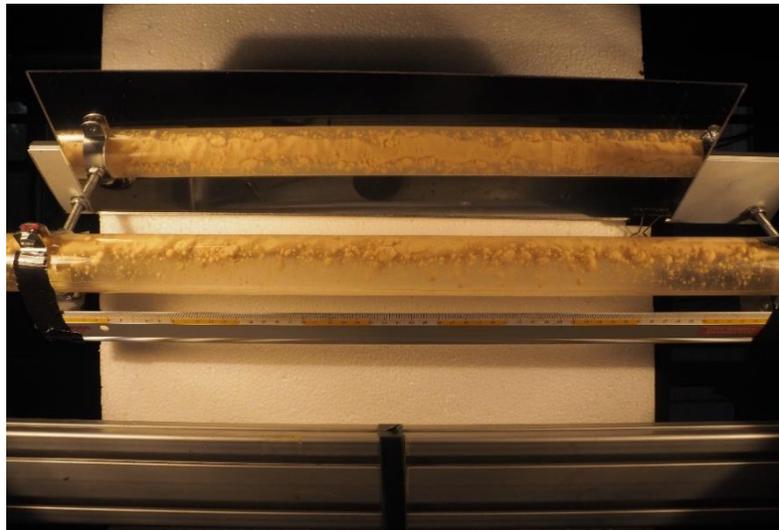


Figura 4.14- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,248 \text{ m/s}$ E $J_w = 0,899 \text{ m/s}$

Nella prima immagine, il regime è fortemente disperso con gocce di piccole dimensioni, mentre nella seconda è evidente la formazione di un nucleo di olio particolarmente eccentrico per aggregazione delle gocce che sono ancora ben visibili, particolarmente al di sotto e ai lati del nucleo. L'eccentricità è causata dalle forze di galleggiamento che per velocità superficiali basse non sono trascurabili. Nonostante la forte eccentricità la fase olio non è a contatto con la parete, come mostra la vista superiore nello specchio.

Per quanto riguarda la campagna fotografica del boccaglio, in aggiunta alla vista dall'alto è stato montato un altro specchio per la vista dal basso inclinato anche quest'ultimo di 45°. Dalle due fotografie seguenti, figura 4.15 e figura 4.16, si può notare come, dopo una breve zona di sviluppo a valle del convergente, il flusso assuma una configurazione analoga a quella di monte. La zona di sviluppo presenta un core deformato caratterizzato da un maggior grado di corrugazione rispetto all'ingresso, notiamo inoltre come a parità di portata di olio il core subisca una maggior distorsione al crescere della velocità superficiale dell'acqua.

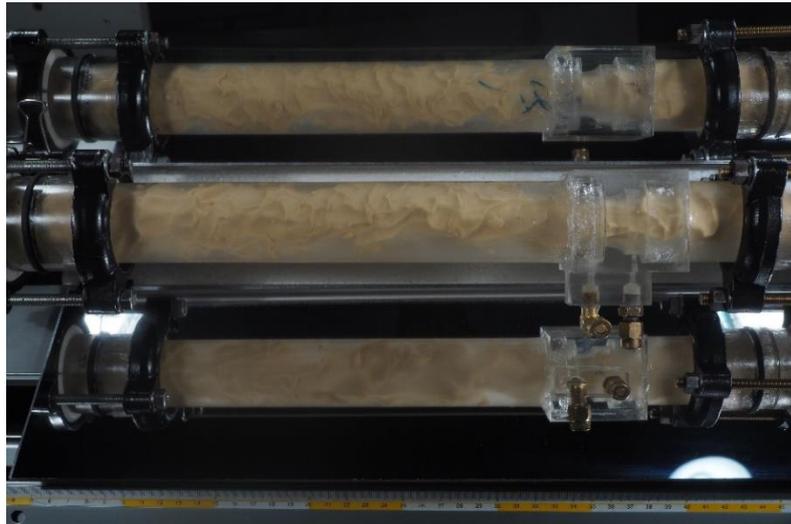


Figura 4.15- FLUSSO NEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717m/s$ E $J_w = 0,450 m/s$

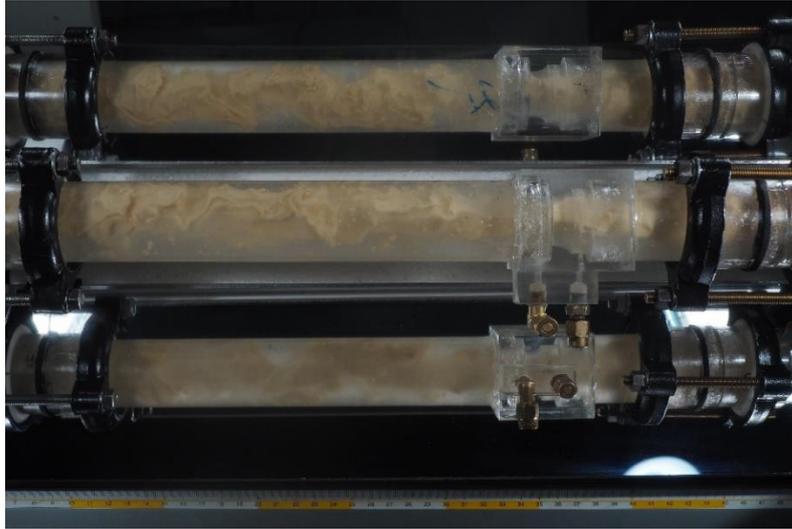


Figura 4.16- FLUSSO NEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717m/s$ E $J_w = 0,899 m/s$

5. FLUSSO TRIFASE ACQUA-OLIO-ARIA

5.1 INTRODUZIONE ALLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

È stato sottolineato come l'effetto della nuova fase introdotta generi una redistribuzione delle fasi con quella gassosa che tende a disporsi nella parte più alta della condotta e a muoversi con una velocità più elevata della miscela di liquidi. L'introduzione dell'aria modifica notevolmente i regimi bifase acqua-olio generando regimi intermittenti tipo slug o plug. La redazione di una mappa di flusso presenta notevoli difficoltà: un tentativo è stato fatto da *G. Sotgia et al (2007)* con la creazione di diagrammi triangolari. Sicuramente una particolarità dei moti intermittenti visualizzati è quella che l'acqua tenda a bagnare continuamente le pareti, sebbene in alcuni casi le gocce di olio impattino sulla superficie interna della condotta spostando l'acqua localmente per brevissimi intervalli di tempo. Caratteristica è anche la struttura particolare che assume il nucleo del flusso che è formato da olio a volte compatto a volte a gocce. La transizione dal primo al secondo tipo avviene all'aumentare del quantitativo di aria iniettato come se i tappi d'aria frazionassero il nucleo compatto. In questo caso alcune gocce del nucleo possono sfuggire dalla fase liquida e colpire la parete come illustrato in precedenza (si rimanda al capitolo della campagna fotografica per avere una idea della struttura del nucleo). L'impatto delle gocce di olio causa uno sporco localizzato della parete che, a seconda delle condizioni operative, può evolvere verso un imbrattamento completo. Per assicurare misure ripetibili, in questi casi si è proceduto ad un lavaggio accurato delle superfici dopo ogni prova. Le misure hanno riguardato regimi trifase a partire dalle stesse configurazioni bifase descritte nella campagna precedente:

$J_o \left[\frac{m}{s} \right]$	$J_w \left[\frac{m}{s} \right]$	$J_g \left[\frac{m}{s} \right]$
0,248	0,450	0
0,365	0,668	0,383
0,482	0,899	0,574
0,606	1,107	0,766
0,717	1,332	0,957
-	-	1,149

Tabella 5.1-VELOCITA' SUPERFICIALI INDAGATE DURANTE LA CAMPAGNA TRIFASE

5.2 CAMPAGNA BOCCAGLIO

In questa campagna vengono analizzate le cadute di pressione nel Boccaglio mantenendo fissa la portata di olio ed eseguendo vari test a portata d'acqua costante e portata di aria crescente. L'impianto rimane invariato rispetto alla campagna acqua-olio. I risultati sono illustrati nei diagrammi delle figure 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 per velocità superficiale dell'olio costante in funzione della velocità superficiale della miscela.

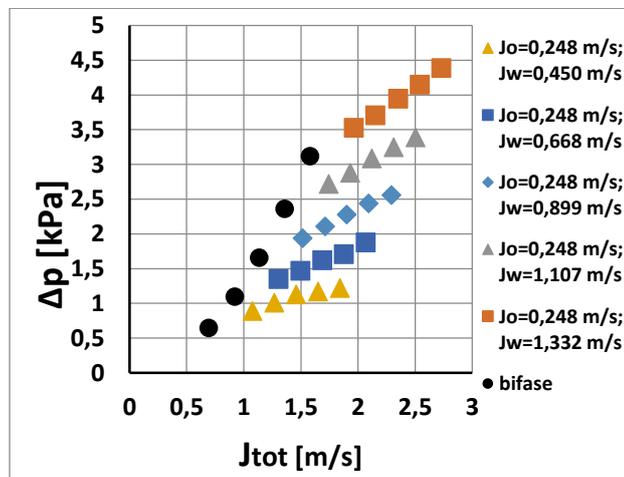


Figura 5.1-TEST CADUTE DI PRESSIONE AL BOCCAGLIO PER $J_o = 0,248$ m/s

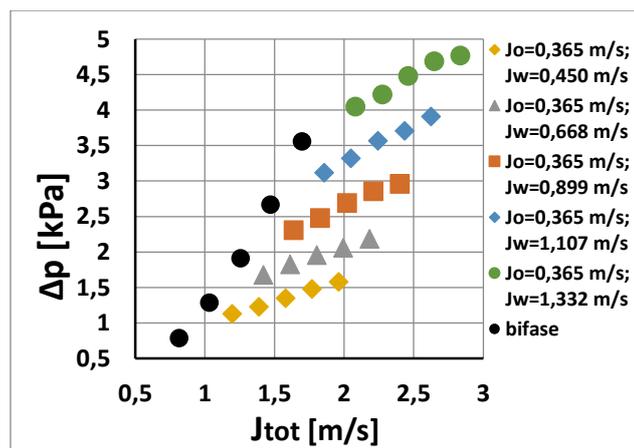


Figura 5.2- TEST CADUTE DI PRESSIONE AL BOCCAGLIO PER $J_o = 0,365$ m/s

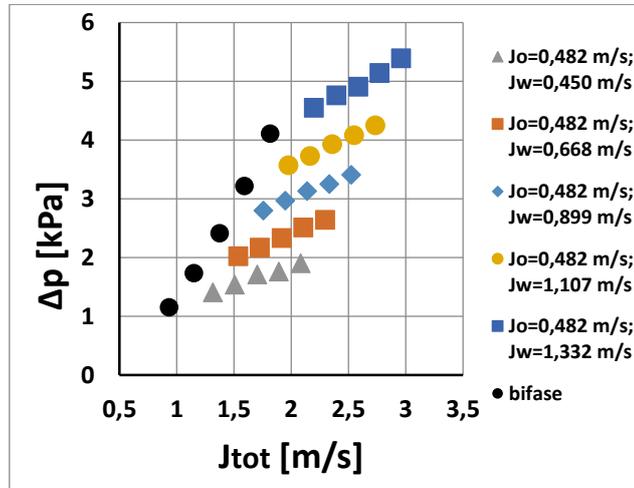


Figura 5.3- TEST CADUTE DI PRESSIONE AL BOCCAGLIO PER $J_o = 0,482$ m/s

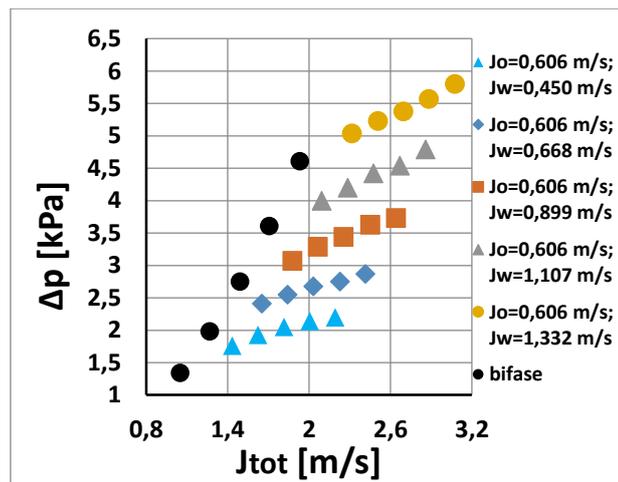


Figura 5.4- TEST CADUTE DI PRESSIONE AL BOCCAGLIO PER $J_o = 0,606$ m/s

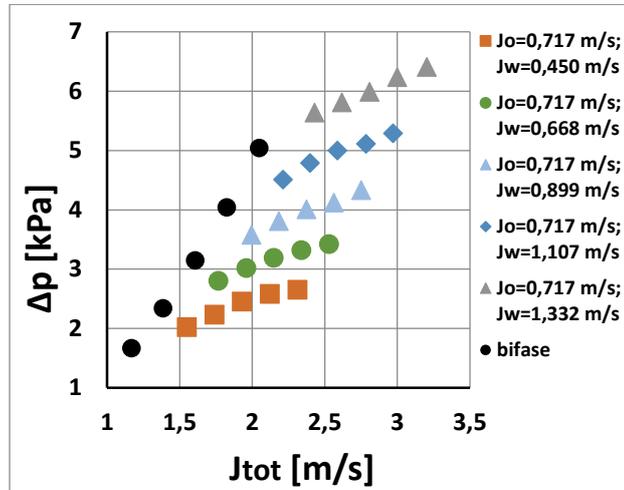


Figura 5.5- TEST CADUTE DI PRESSIONE AL BOCCAGLIO PER $J_o = 0,717 \text{ m/s}$

Notiamo una notevole similitudine tra i diagrammi: a partire dal regime bifase l'introduzione del gas aumenta la caduta di pressione fino alla massima portata di aria. Le curve sono spaziate regolarmente al variare della velocità superficiale dell'acqua.

Vengono quindi valutati i valori delle cadute di pressione nelle medesime condizioni operative secondo il modello omogeneo:

$$\rho_{hm} = \varepsilon_w \rho_w + \varepsilon_o \rho_o + \varepsilon_g \rho_g \quad (42)$$

$$\Delta p_{hm} = \frac{1}{2} \times \rho_h \times J_{tot}^2 \times (\sigma^4 - 1) \quad (43)$$

La figura 5.6 riporta il confronto con i valori misurati. Globalmente l'accordo è soddisfacente (il 90% dei dati cade entro uno scostamento del 10%). Tuttavia, come si vede nella figura 5.7, che distingue le condizioni operative, le deviazioni sistematicamente crescono all'aumentare della velocità superficiale dell'aria.

A differenza di quanto osservato per il flusso bifase acqua-olio, il confronto con i risultati ottenuti in un lavoro precedente, relative ad un Venturimetro, mostra che il flusso trifase nel boccaglio è meglio descritto dal modello omogeneo di quanto non lo sia il flusso trifase nel Venturimetro (figura 5.8).

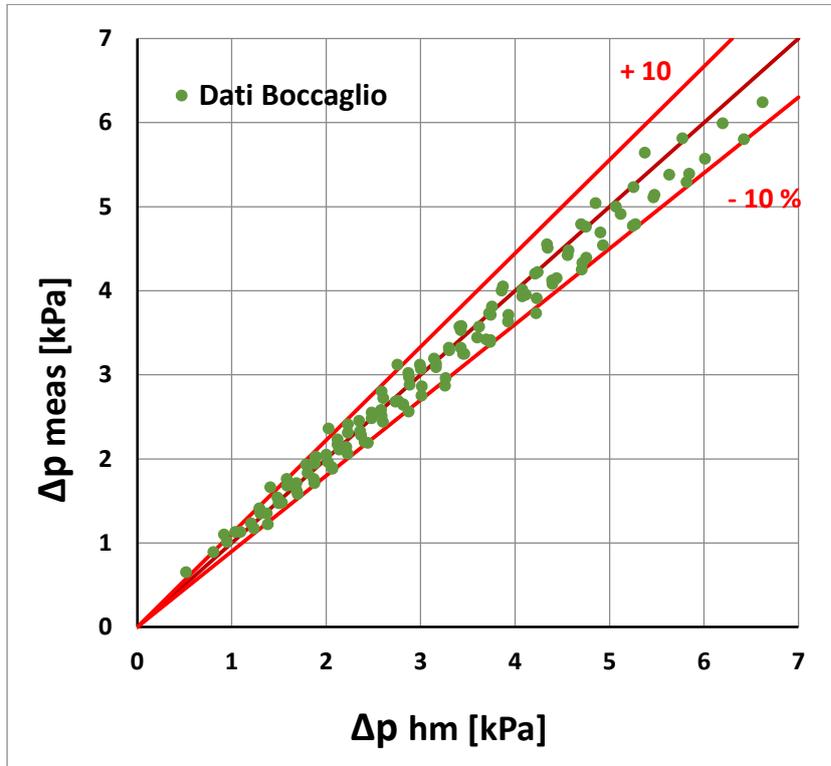


Figura 5.6-PARITY PLOT

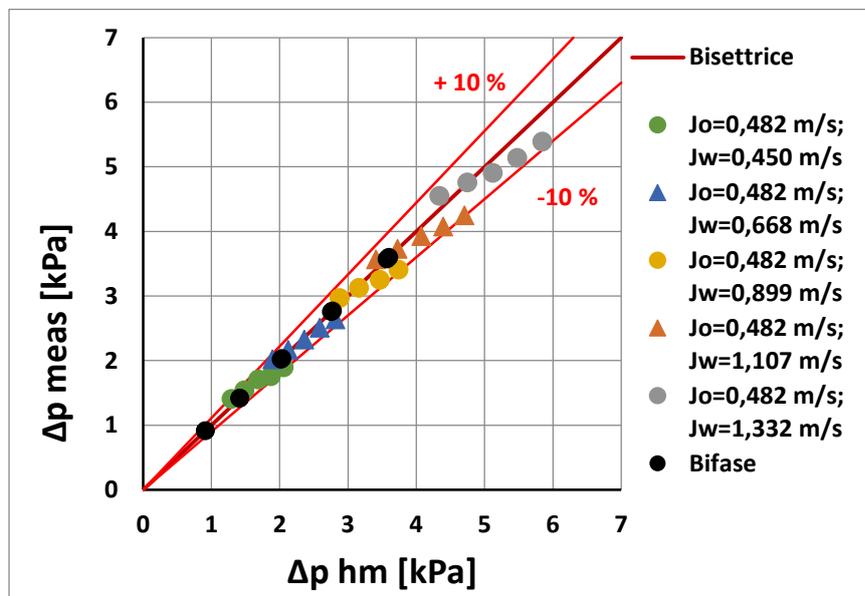


Figura 5.7-PARITY PLOT PER $J_o = 0,482$ [m/s]

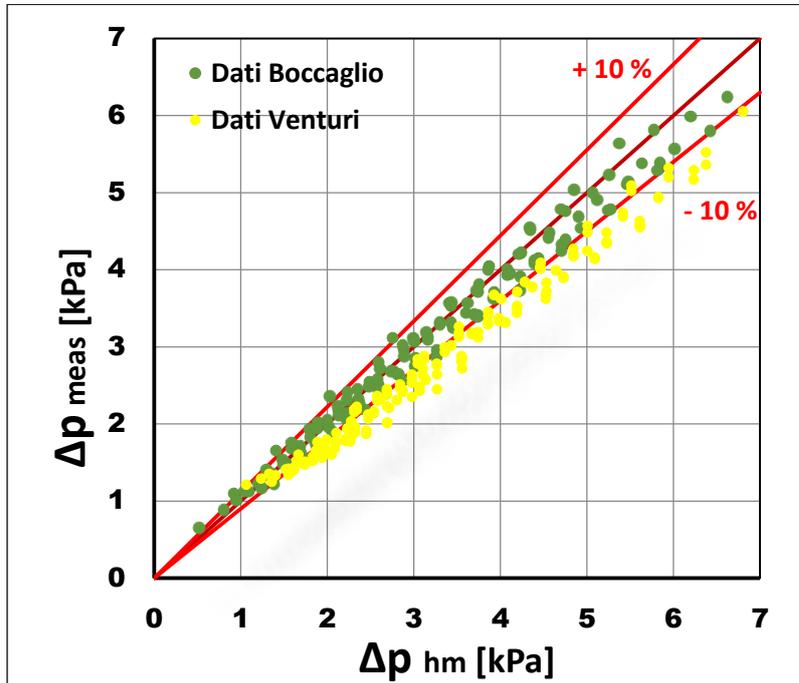


Figura 5.8-CONFRONTO PARITY PLOT DATI BOCCAGLIO E DATI VENTURI

5.3 CAMPAGNA CADENTE DI VALLE

Vengono ora presentati i risultati sulla misura delle cadenti di pressione a valle del Bocaglio per i flussi acqua-olio-aria. Le condizioni operative sono le medesime riportate nella tabella 5.1 e l'assetto sperimentale nella figura 5.9 è del tutto analogo a quello descritto nel paragrafo 3.3.

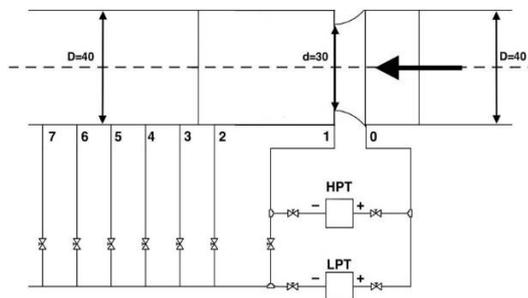


Figura 5.9- SCHEMA BOCCAGLIO E COLLEGAMENTI PRESE DI PRESSIONE

La figura 5.10 riporta un esempio del segnale rilevato dal trasduttore di pressione dove sono considerate sei prove a velocità superficiale dell'aria crescente. È evidente che l'istaurarsi di un moto intermittente genera un disturbo considerevole. In particolare, la prima serie mostra chiaramente un andamento a gradini, corrispondenti alla scansione delle prese di pressione. Nelle serie successive, tale andamento è solo immaginabile a causa dei disturbi indotti dalla fluidodinamica complessa. Tuttavia, i valori medi di ogni acquisizione risultano fra loro ben distinti.

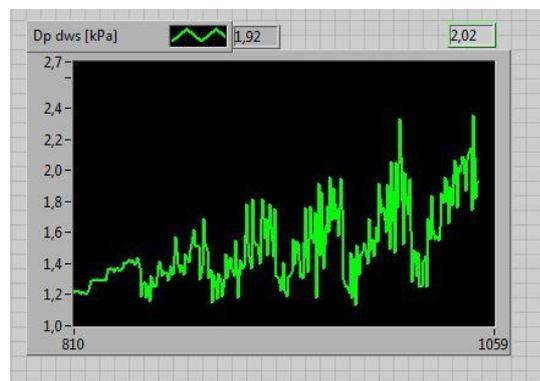


Figura 5.10-SEGNALE DURANTE TEST SULLE CADENTI A $J_o = 0,248 \text{ m/s}$ E $J_w = 0,450 \text{ m/s}$

Nelle figure 5.11, 5.12, 5.13 sono proposti i risultati delle misure sulle cadenti riportati in funzione di ϵ_g in cui notiamo la somiglianza tra i diagrammi a diversa portata d'olio. Le serie di punti a portata d'acqua costante hanno andamenti crescenti all'aumentare della velocità del gas introdotto e sono distinte per velocità superficiale dell'acqua, come si verifica anche per il loro caso bifase acqua-olio ($\epsilon_g = 0$).

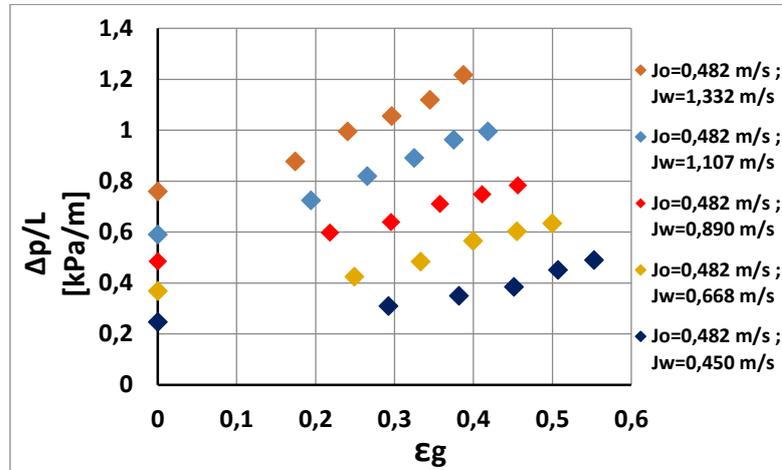


Figura 5.11-CADENTE vs ϵ_g PER $J_o = 0,482$ m/s

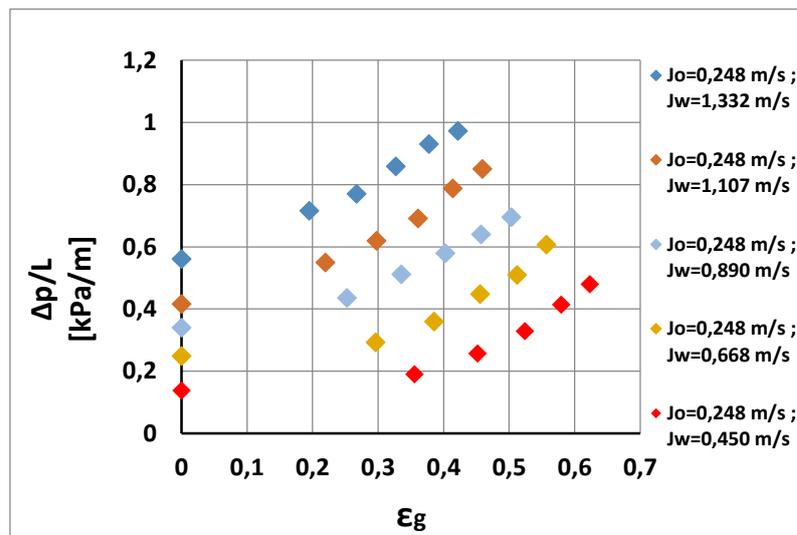


Figura 5.12-CADENTE vs ϵ_g PER $J_o = 0,248$ m/s

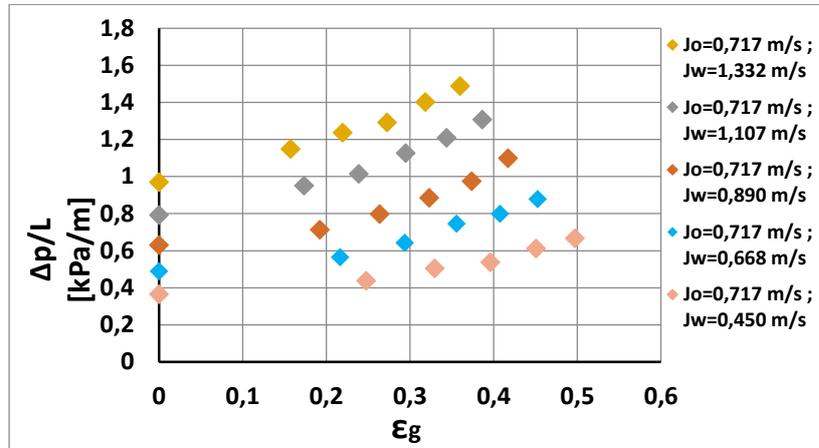


Figura 5.13-CADENTE vs ϵ_g PER $J_o = 0,717 \text{ m/s}$

Le prove sulle cadenti sono avvalorate da un test di ripetibilità eseguito per flussi trifase che possano includere il maggior numero di tipologie di struttura di flusso osservate. Le condizioni operative selezionate per questa verifica sono riportate nella tabella 5.2. Per ognuna di esse sono eseguite 10 prove.

$J_o \text{ [m/s]}$	$J_w \text{ [m/s]}$	$J_g \text{ [m/s]}$
0,717	0,668	0,383
		0,574
		0,766
		0,957
		1,149
0,717	1,3319	0,383
		0,574
		0,766
		0,957
		1,149

Tabella 5.2-VELOCITA' SUPERFICIALI INDAGATE DURANTE LA CAMPAGNA DI RIPETIBILITA' TRIFASE

I risultati sono riportati nelle figure 5.14 e 5.15 e mostrano una buona concordanza delle misure con deviazioni standard rispetto al valore della retta di regressione minori del 5%.

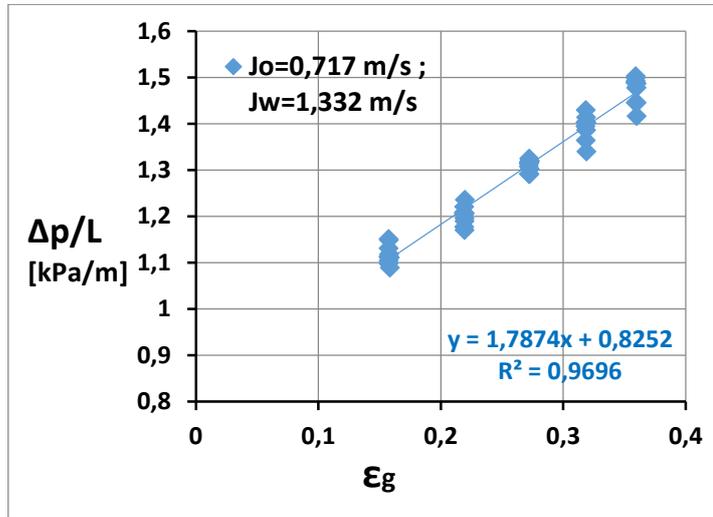


Figura 5.14-CADENTE vs ϵ_g , PROVA DI RIPETIBILITA' PER $J_o = 0,717$ [m/s] E $J_w = 1,332$ [m/s]

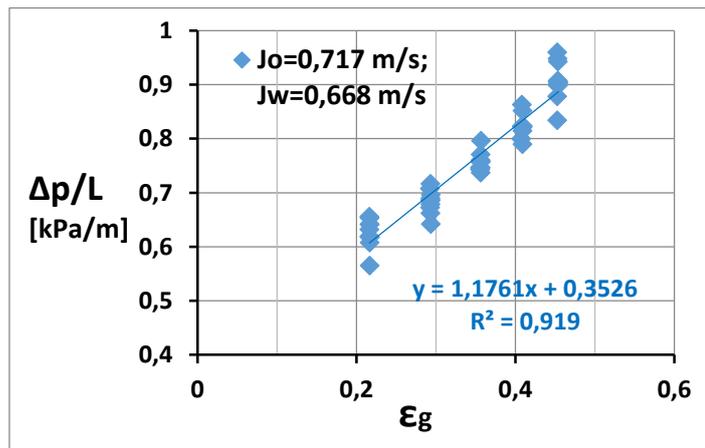


Figura 5.15-CADENTE vs ϵ_g , PROVA DI RIPETIBILITA' PER $J_o = 0,717$ m/s E $J_w = 0,668$ [m/s]

Un risultato molto significativo si può ottenere riportando le cadenti in funzione del rapporto del rapporto fra la velocità superficiale del gas e quella totale del liquido:

$$\epsilon_{g-l} = \frac{J_g}{J_o + J_w} \quad (44)$$

Infatti, i dati si dispongono su curve che risultano dipendenti dalla sola velocità superficiale del gas indipendentemente dalle velocità superficiali di acqua e olio.

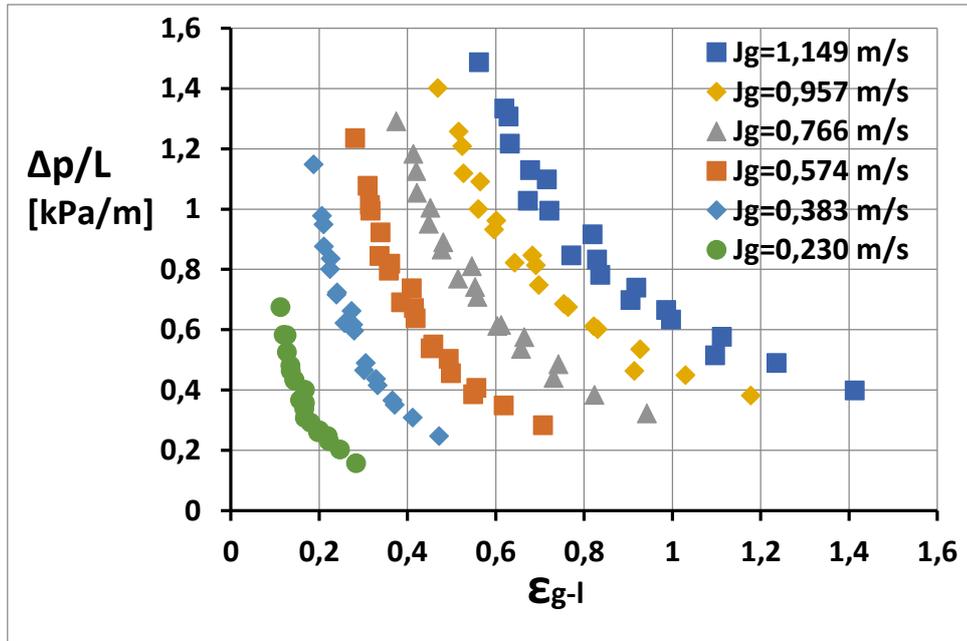


Figura 5.16-CADENTE vs ϵ_{g-l}

Tracciando curve di regressione del tipo $\frac{\Delta p}{L} = C \epsilon_{g-l}^{-a}$ si nota che la dipendenza dell'esponente a da J_g è trascurabile. Se ne considera quindi un valore medio

$$\bar{a} = 1,5275.$$

Esplicitando ϵ_{g-l} :

$$\epsilon_{g-l} = \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{\bar{a}}} \left(\frac{\Delta p}{L}\right)^{-\frac{1}{\bar{a}}} \quad (45)$$

Il coefficiente $C' = \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{\bar{a}}}$ risulta linearmente correlato a \dot{V}_g come mostrato nella figura 5.17.

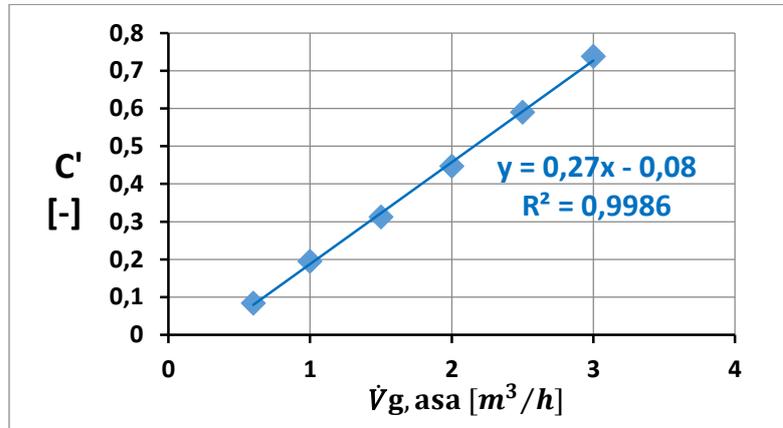


Figura 5.17-REGRESSIONE COEFFICIENTE C'

I dati possono essere quindi riprodotti dalla equazione:

$$\frac{\Delta p}{L} = \left(\frac{0,27 \dot{V}_g - 0,08}{\varepsilon_{g-l}} \right)^{\bar{a}} \quad (46)$$

Con scostamenti delle misure inferiori al 10% rispetto al valore calcolato mediante l'equazione (46) per il 90% dei dati.

Questo risultato suggerisce che, nell'intervallo di variazione delle velocità superficiali considerato, le fasi liquide si comportino come un liquido equivalente. Tale osservazione sembra concordare con i risultati di un indagine precedente [31] e potrebbe consentire un approccio modellistico semplificato, trattando il flusso trifase come un flusso bifase equivalente, ciò rappresenta uno sviluppo futuro di questo lavoro.

Tale comportamento non trova tuttavia riscontro per portate di aria superiori, come illustrato nella figura 5.19. Si nota non solo una variazione della dipendenza della caduta da ε_{g-l} , ma anche una notevole dispersione delle misure. Inoltre alcune prove ripetute hanno evidenziato una limitata riproducibilità dei dati. In base all'osservazione visuale dei regimi di moto, si potrebbe attribuire questo comportamento alla influenza sempre più marcata dell'imbrattamento della parete del condotto, prodotto dall'impatto delle gocce d'olio, come descritto nella sezione introduttiva. Questo aspetto costituisce senz'altro uno degli sviluppi futuri di questo lavoro.

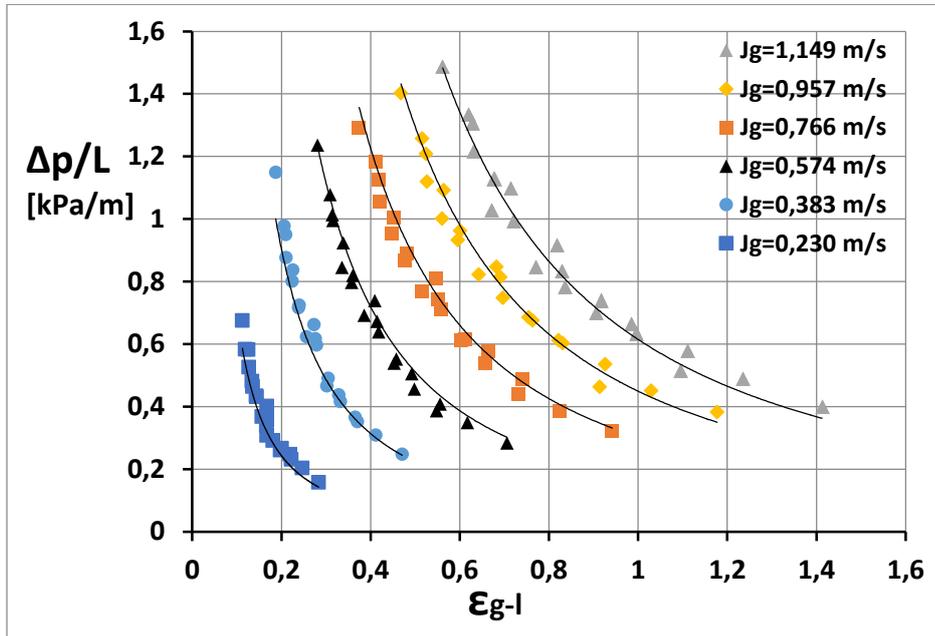


Figura 5.18- CADENTE vs ϵ_{g-l}

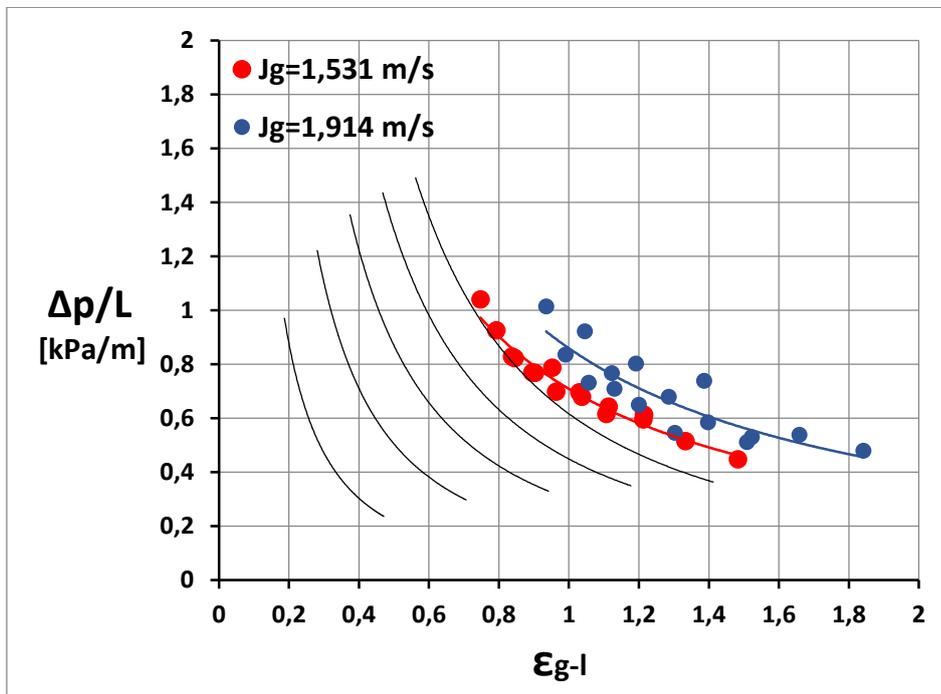


Figura 5.19- CADENTE vs ϵ_{g-l}

5.4 CAMPAGNA FOTOGRAFICA

Come negli altri capitoli una particolare attenzione è posta all'analisi fotografica. Le fotografie sono acquisite a flusso pienamente sviluppato per la condotta orizzontale mentre per il Boccaglio l'acquisizione fotografica vuole indagare la distorsione indotta sulla struttura del flusso. Rispetto al flusso bifase olio-acqua la struttura del flusso è più complessa con l'istaurarsi di moti intermittenti nei quali la fase aria assume la forma di bolle allungate di lunghezza e forma variabili. Un primo esempio dell'effetto di introduzione dell'aria è quello esposto nella figura 5.20 relativa alla massima velocità superficiale dell'olio.



Figura 5.20- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$, $J_w = 0,450 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,383 \text{ m/s}$

Si nota la formazione di una bolla allungata, che spinge l'olio verso il basso senza interrompere la continuità del nucleo. La fase olio subisce una forte deformazione ma persiste come fase continua. All'aumentare della fase gassosa le bolle aumentano in lunghezza e mostrano fronti più ripidi come si vede nelle figure 5.21 e 5.22. Aumentando ulteriormente la velocità del gas, il nucleo tende a frazionarsi in gocce.



Figura 5.21- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$, $J_w = 0,450 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,766 \text{ m/s}$

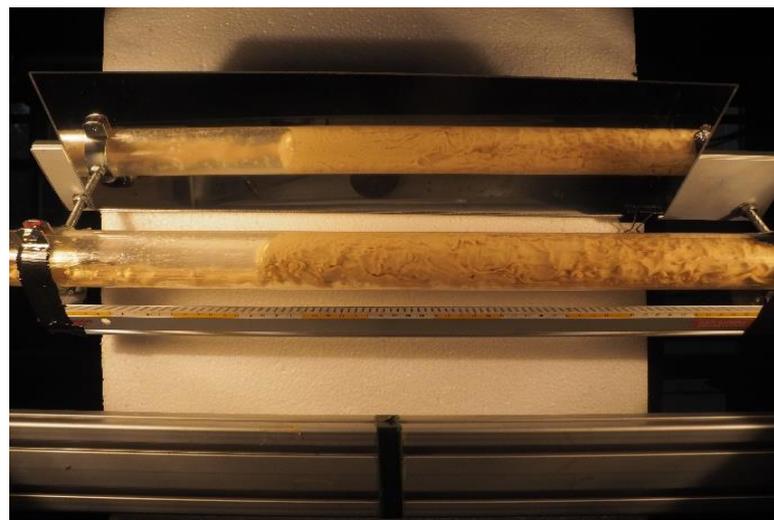


Figura 5.22- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$, $J_w = 0,450 \text{ m/s}$ E $J_g = 1,149 \text{ m/s}$

Questa tendenza si manifesta per velocità superficiali dell'aria minori al crescere della velocità superficiale dell'acqua. Inoltre, l'aumento della velocità totale del flusso genera interfacce aria-liquido sempre più irregolari, come si nota dalla figura 5.23, in cui a pari flusso d'aria e olio, la velocità superficiale dell'acqua è doppia rispetto a quella di figura 5.22.



Figura 5.23- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$, $J_w = 0,899 \text{ m/s}$ E $J_g = 1,149 \text{ m/s}$

Un regime a nucleo completamente disperso e caratterizzato da piccole gocce è mostrato in figura 5.24. In casi come questo si verifica il fenomeno descritto in precedenza, ossia l'impatto di numerose gocce sulla parete che causa un imbrattamento dapprima localizzato, ma con tendenza ad estendersi a tutta la superficie di contatto del liquido.

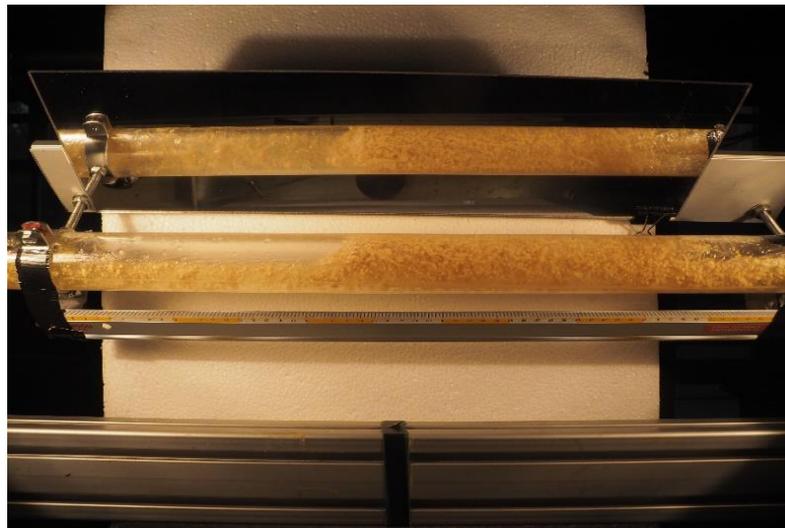


Figura 5.24- FLUSSO A MONTE DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,306 \text{ m/s}$, $J_w = 1,332 \text{ m/s}$ E $J_g = 1,149 \text{ m/s}$

Per quanto riguarda il boccaglio, si propongono le figure 5.25, 5.26 e 5.27 dove si illustra l'effetto dell'aumento della velocità dell'aria a pari flusso di acqua e olio. In queste immagini è evidente la distorsione del flusso dopo l'accelerazione al convergente a causa della repentina espansione a valle dell'ugello. In questa situazione è tanto più facile, quanto maggiore è la velocità superficiale totale, che l'impatto della fase olio alla parete generi zone di sporramento, sebbene pochi diametri più a valle si ristabilisca un flusso di struttura apparentemente simile a quella di monte.

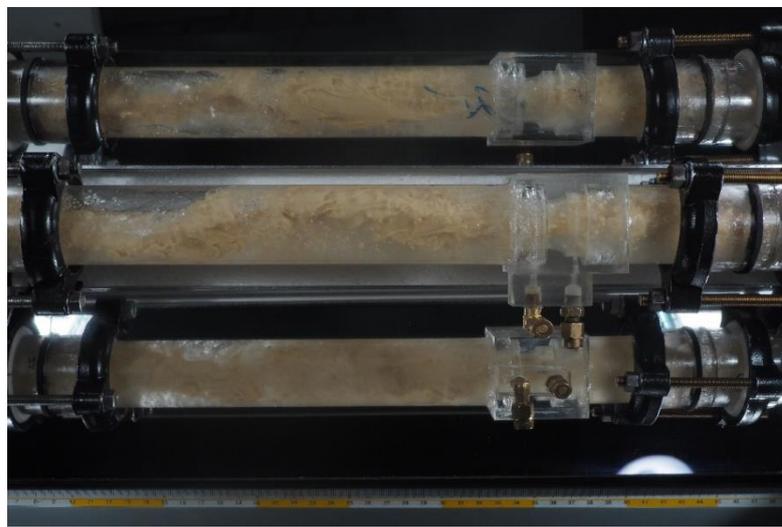


Figura 5.25- FLUSSO ALL'INTERNO DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$, $J_w = 0,899 \text{ m/s}$ E
 $J_g = 0,383 \text{ m/s}$

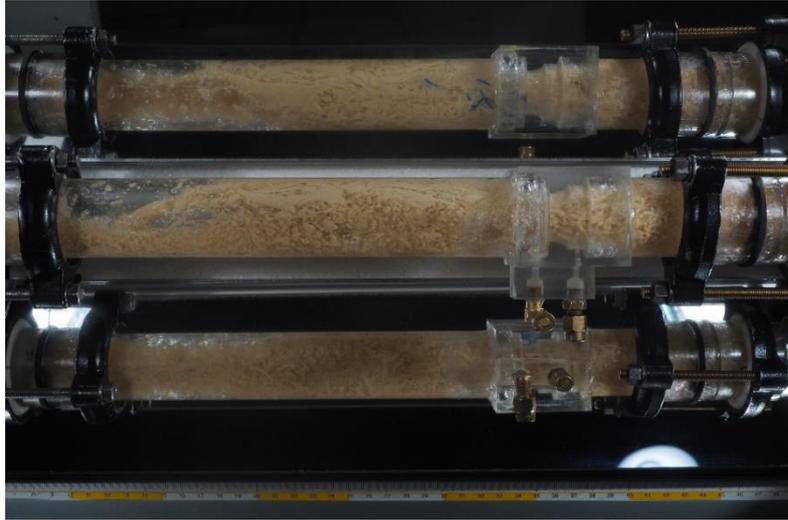


Figura 5.26-FLUSSO ALL'INTERNO DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \text{ m/s}$, $J_w = 0,899 \text{ m/s}$ E $J_g = 0,957 \text{ m/s}$

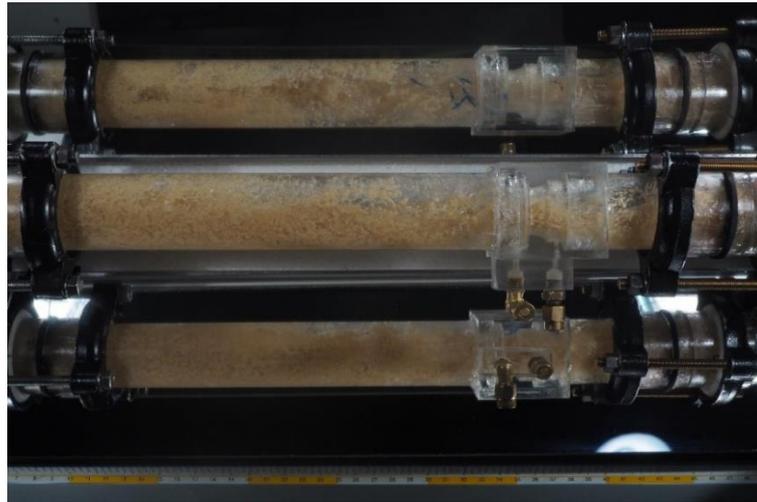


Figura 5.27-FLUSSO ALL'INTERNO DEL BOCCAGLIO A $J_o = 0,717 \frac{m}{s}$, $J_w = 0,899 \frac{m}{s}$ E $J_g = 1,149 \frac{m}{s}$

5.5 LIMITI E PROBLEMATICHE LEGATE ALLA DETERMINAZIONE DELLA PORTATA TOTALE

L'introduzione della fase gassosa complica notevolmente la struttura del flusso aumentando la complessità del fenomeno e le variabili in gioco. Infatti, rispetto al flusso bifase acqua-olio le cadute di pressione al bocaglio rappresentate in funzione della velocità superficiale totale non giacciono su di un'unica curva, ma si separano in funzione della velocità dell'aria.

L'indagine di questo legame e la possibilità di formulare un modello che permetta l'utilizzo dello strumento per la misura della portata totale rappresentano un altro degli sviluppi futuri di questo lavoro.

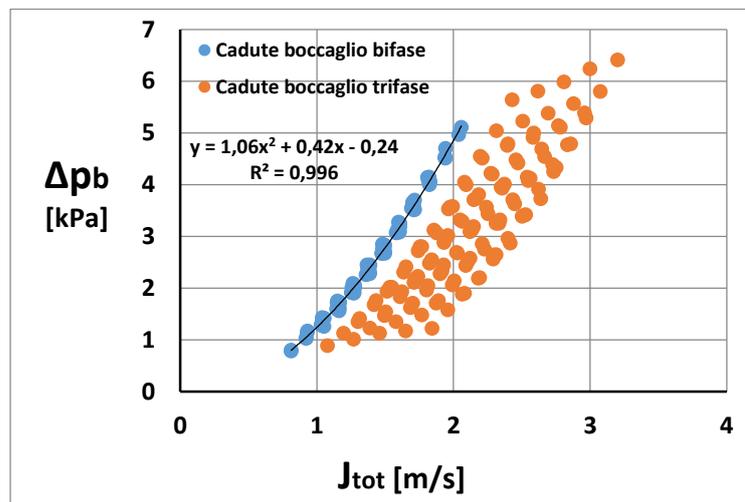


Figura 5.28-CADUTE DI PRESSIONE BIFASE E TRIFASE AL BOCCAGLIO

6. CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati caratterizzati flussi multifase mediante misure di caduta di pressione all'interno di condotti a sezione variabile.

Per quanto riguarda il flusso bifase acqua-aria sono state misurate le cadute di pressione in un Venturimetro e le cadenti a valle del medesimo nelle medesime condizioni operative. I risultati sulle cadute di pressione nel tratto convergente del Venturimetro sono illustrati e confrontati con le previsioni del modello omogeneo nella figura 6.1.

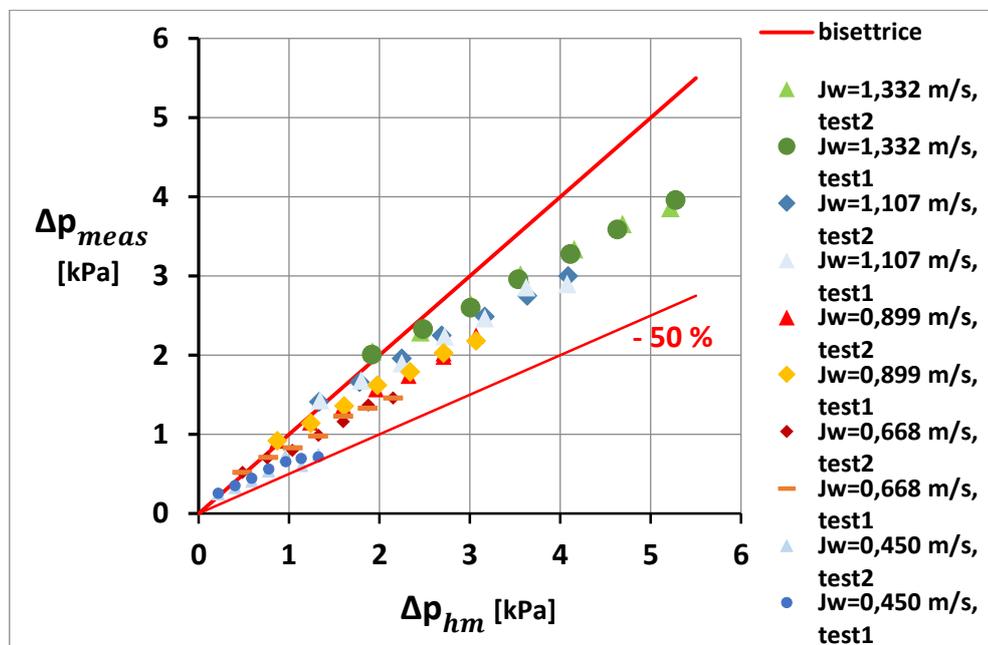


Figure 6.1-PARITY PLOT CADUTE DI PRESSIONE NEL TRATTO CONVERGENTE DEL VENTURIMETRO PER FLUSSO BIFASE ACQUA-ARIA

Il confronto mostra che gli scostamenti possono crescere fino al 50% al crescere della portata di aria ed in funzione della velocità superficiale dell'acqua; per queste ragioni non sembra possibile impiegare il Venturimetro per la misura della portata del flusso bifase acqua-aria.

Per quanto riguarda il flusso bifase acqua-olio sono state misurate le cadute di pressione nel tratto convergente di un boccaglio (con stessa geometria del tratto

convergente del Venturimetro usato nella campagna precedente) e le cadenti a valle del medesimo nelle medesime condizioni operative. I risultati sulla caduta di pressione sono illustrati e confrontati con le previsioni del modello omogeneo nella figura 6.2.

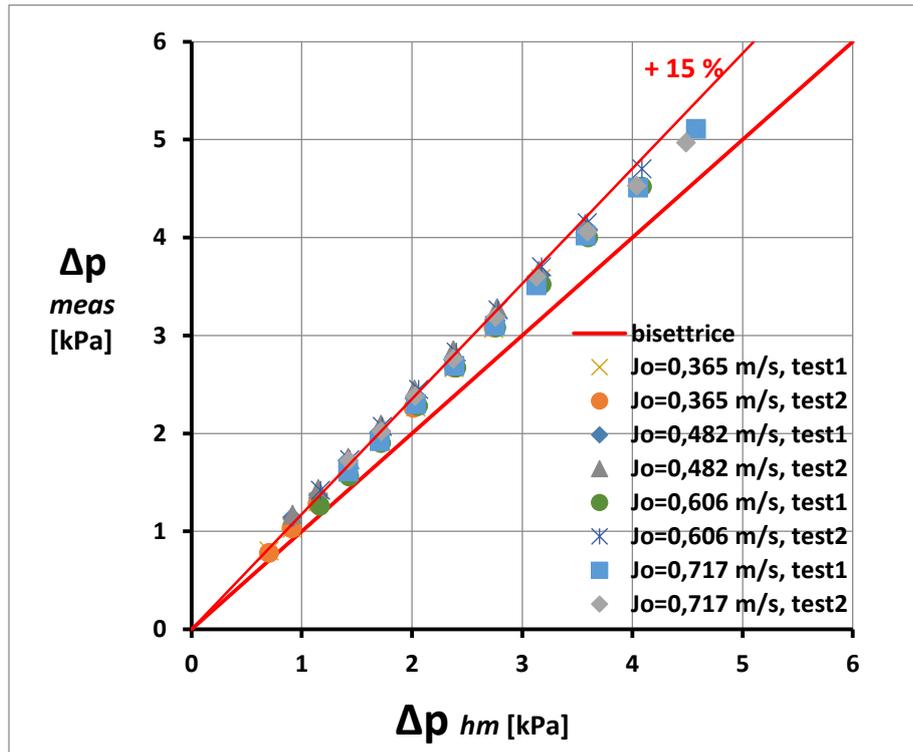


Figure 6.2-PARITY PLOT CADUTE DI PRESSIONE NEL TRATTO CONVERGENTE DEL BOCCAGLIO PER FLUSSO BIFASE ACQUA-OLIO

In questo caso il confronto risulta che la caduta di pressione risulta dipendente unicamente dal valore della velocità superficiale della miscela, sebbene l'uso del modello omogeneo la sovrastimi di circa il 15% (figura 6.2). Disponendo inoltre delle cadenti nel tratto a valle o monte dello strumento è stato possibile determinare mediante un modello sviluppato in precedenza la velocità superficiale dell'acqua. Il risultato, molto soddisfacente, è caratterizzato da un errore medio del 5,5% (figura 6.3).

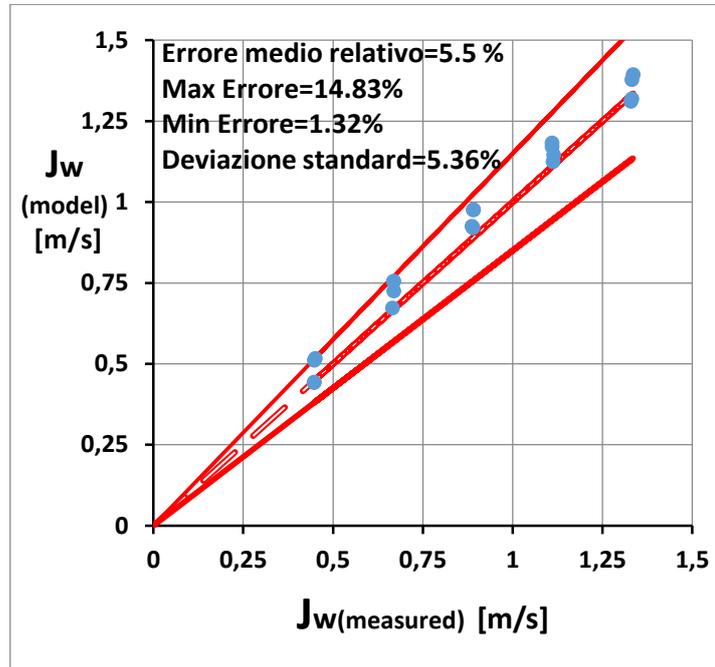


Figure 6.3-PARITY PLOT: DATI SPERIMENTALI vs PREVISIONE MODELLO

Per quanto riguarda il flusso trifase acqua-olio-aria sono state misurate e analizzate le cadute di pressione nel tratto convergente del boccaglio e le cadenti di pressione a valle dello stesso. Anche in questo caso sono state confrontate le misure di caduta di pressione con le previsioni calcolate con il modello omogeneo. I risultati sono illustrati nella figura 6.4 e dimostrano una buona concordanza del modello omogeneo con i dati sperimentali. Questo risultato è soddisfacente in quanto per il 90% dei dati si ha uno scostamento massimo del 10%. Ne segue la possibilità di usare il boccaglio come strumento di misura della portata totale per i flussi bifase acqua-olio, mentre per i flussi trifase aria-olio-acqua sarebbe necessario disporre di un modello analogo a quello utilizzato per il flusso bifase acqua-olio al fine di determinare la ripartizione delle fasi. D'altra parte un risultato molto significativo si può ottenere riportando le cadenti in funzione del parametro ε_{g-l} , cioè il rapporto fra la velocità superficiale della fase gassosa e la somma della velocità superficiale delle due fasi liquide. Infatti, i dati delle cadenti si dispongono su curve che risultano dipendenti dalla sola velocità superficiale dell'aria indipendentemente dalla velocità superficiale di acqua e olio. In questo modo i dati possono essere riprodotti dall'equazione (46) come illustra la figura 6.5. Spingendosi a velocità superficiale di aria maggiori di 1,149 m/s si nota una variazione della dipendenza della cadente da ε_{g-l} , ma anche una notevole

dispersione della misura ed una scarsa riproducibilità contrariamente a quanto accade a velocità inferiori.

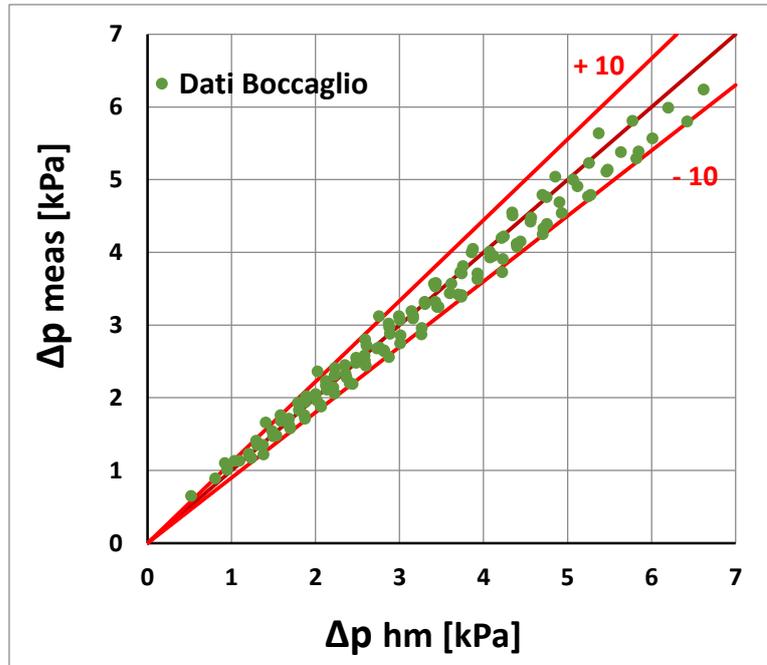


Figure 6.4-PARITY PLOT CADUTE DI PRESSIONE NEL TRATTO CONVERGENTE DEL BOCCAGLIO PER FLUSSO TRIFASE ACQUA-OLIO-ARIA

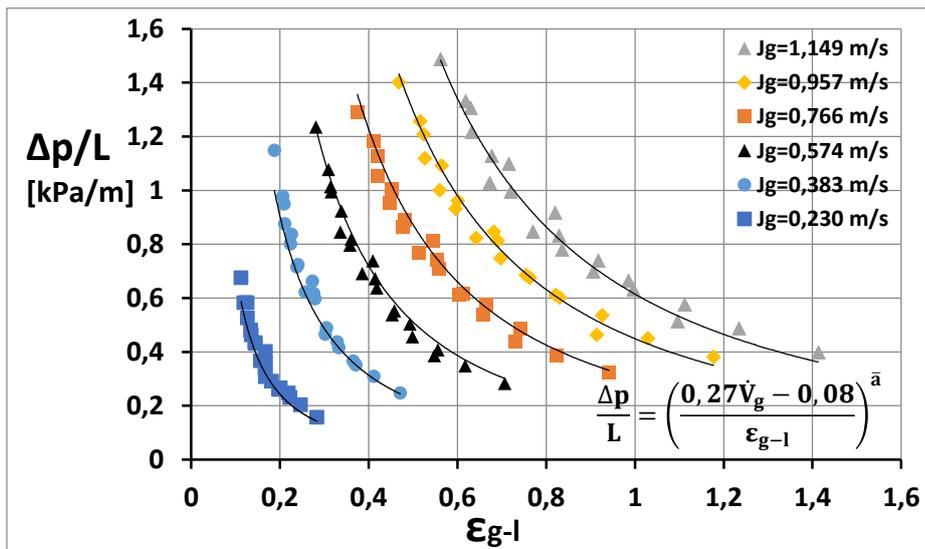


Figure 6.5- CADENTE vs ϵ_{g-l} E CURVE TRACCIATE CON L'EQUAZIONE (46)

BIBLIOGRAFIA

[1].Açikgoz, M., Franca, F. Lahey, J.R.T. *An experimental Study of Three-Phase Flow Regimes. Int J.Multiphase Flow, Volume 18, 327-336 (1992)*

[2].Angeli P., Hewitt G. F. “*Pressure drop measurements in oil and prewetted pipes*”, *Proc. of International Symposium on Liquid-Liquid Two-Phase and Transport Phenomena, Antalya (Turkey), pag.75-83, 1997*

[3].Arney M. S., Bai R., Guevara E., Joseph D. D., Liu K. “*Friction factors and holdup studies for lubricated pipelining. Experiments and correlations*”, *International Journal of Multiphase Flow, vol.19 (n°6), pag.1061-1076, 1993*

[4].Bai R., Chen K., Joseph D. D. “*Lubricated pipelining: stability of core-annular flow. Part 5. Experiments and comparison with theory*”, *Journal of Fluid Mechanics, vol.240, pag.97 132, 1992*

[5].Bannwart, A.C., *Flow Patterns and Pressure Gradients in horizontal, upward inclined and vertical heavy Oil-Water-Gas Flow. Pisa,Italy, September (2004)*

[6].Bonizzi, M. e Issa, R.I., *On the simulation of three-phase slug flow in near horizontal pipes using the multi-fluid model. Int. J. Multiphase Flow, Volume 29, pp.1719-1747 (2003)*

[7].Charles M. E., Govier G. W., Hodgson G. W. “*The horizontal pipeline flow of equal density oil-water mixtures*”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol.39, pag.27-36, 1961*

[8].Chen, X. Guo, L., *Flow patterns and pressure drop in oil-air-water three-phase flow through helically coiled tubes. Int. J. Multiphase Flow, volume 25, pp. 1053-1072 (1999)*

[9]. Colombo L. P. M., Guillizzoni M., Sotgia G. M., Bortolotti S., Pavan L. “*Measurement of the oil holdup for a two-phase oil-water flow through a sudden contraction in a horizontal pipe*”, *Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano*

- [10]. Colombo L. P. M., Guillizzoni M., Sotgia G. M., Brigido G. “Concentrated pressure drop across sudden diameter contractions of oil-water flows in horizontal pipes: an experimental investigation”, *Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano*
- [11].Colombo L. P. M., Guillizzoni M., Sotgia G.M. “Characterization of the critical transition from annular to wavy-stratified flow for oil-water mixtures in horizontal pipes”, *Experiments in Fluids*, vol.53, pag.1617-1625, 2012
- [12].Ghosh S., Das G., Das P. K. “Simulation of core annular downflow through CFD – a comprehensive study”, *Chemical Engineering and Processing*, vol.49, pag.1222-1228, 2010
- [13].I.H. Gibson, *Polyphase (oil/water/gas) Flowmeters*, (2003)
- [14].Govier G. W., Aziz K. “The flow of complex mixtures in pipes”, *Van Nostrand Reinhold Company*, 1972
- [15].Govier G. W., Russel T. W. F., Hodgson G.W. “Horizontal pipeline flow of mixtures of oil and water”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol.37, pag.9-17, 1959
- [16].Grassi B., Strazza D., Poesio P. “Experimental validation of theoretical models in two phase high-viscosity ratio liquid-liquid flows in horizontal and slightly inclined pipes”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol.34, pag.950-965, 2008
- [17].Hanich, L., Thompson, R., *Validation of a novel Algorithm for the adaptive calculation of transient stratified Flow of Gas, Oil and Water in Pipelines. International Journal of Numeric Meth. Eng.*, vol.51, pag.579-607, 2001
- [18].Hewitt, G.F., Hall, A.R.W., Pan, L., *Three-Phase Liquid-Liquid-Gas Flows: a new Challenge, Int. Symp. On. Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Rome, Italy*, (1995)
- [19].Hewitt G. F. “From gas-liquid to liquid-liquid two-phase flow: a difficult journey”, *Proc. of International Symposium on Liquid-Liquid*

Two-Phase Flow and Transport Phenomena, Antalya (Turkey), pag.3-19, 1997

[20].Kaushik V. V. R., Ghosh S., Das G., Das P. K. “CFD simulation of core annular flow through sudden contraction and expansion”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol.86-87, pag.153-164, 2012

[21].Khor, S.H., Mendes-Tatsis, M.A., and Hewitt, G.F., *One-Dimensional Modelling Of Phase holdups in Three-Phase stratified Flow*, *Int. J. Multiphase Flow*, Volume 23 (5), pp. 885.897 (1997)

[22].Lockhart R. W., Martinelli R. C. “Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-components flow in pipes”, *Chemical Engineering Progress*, vol.45 (n°1), pag.39-48, 1949

[23].J. M. Mandhane, G. A. Gregory, e K. Aziz, *A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes*, *In. J. Multiphase Flow*, vol. 1, pp. 537-553, 1974.

[24].Nädler N., Mewes D. “Flow induced emulsification in the flow of two immiscible liquids in horizontal pipes“, *International Journal of Multiphase Flow*, vol.23 (n°1), pag.55-68, 1997

[25].Nakamishi, S., *An experimental study of Flow Pattern and Pressure Drop Of Gas-Liquid-Liquid three-phase flow*, *Int. Symp. On Two-Phase Flow Modelling and experimentation*, Pisa, Italy, september (1999)

[26].Oddie, G. et al, *Experimental study of Two-Phase Flows in large Diameters inclined Pipes*, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 29, pp. 527-558 (2003)

[27].Oddie, Pearson, *Flow-Rate Measurements in Two-Phase Flow*, *Annu. Rev. Fluid. Mech.* Vol36, pp.72-149 (2004)

[28].Oliemans R. V. A., Ooms G. “Core-annular flow of oil and water through a pipeline”, *Multiphase Science and Technology*, vol.2 (eds. Hewitt G. F., Delhaye J. M., Zuber N.), pag.427-477, 1986

[29].Ooms G., Poesio P. “Stationary core-annular flow through a horizontal pipe” *Physical Review E*, vol.68, pag.066301.1-0.66301.7, 2003

- [30].Ooms G., Segal A., van der Wees A. J., Meerhoff R., Oliemans R. V. A. "A theoretical model for core-annular flow of a very viscous oil core and a water annulus through a horizontal pipe", *International Journal of Multiphase Flow*, vol.10 (n°1), pag.41-60, 1984
- [31].Poesio P., Sotgia G., "Three-phase oil-water-air flows in horizontal pipes: pressure drop and flow regimes", *6th Int.Conference on Multiphase Flows, Leipzig, Germany, July 9-13, 2007*
- [32].Rodriguez O. M. H., Bannwart A. C., de Carvalho C. H. M. "Pressure loss in core annular flow: modeling, experimental investigation and full scale experiments", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol.65, pag.67-75, 2009
- [33].Russel T. W. F., Charles M. E. "The effect of less viscous liquid in the laminar flow of two immiscible liquids", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol.37, pag.18-24, 1959
- [34].Russel T. W. F., Hodgson G. W., Govier G.W. "Horizontal pipeline flow of mixtures of oil and water", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol.37, pag.9-17, 1959
- [35].Sotgia G. Tartarini P., *The flow of oil-water mixtures in horizontal pipes. State of the art and recent development on pressure drop and flow regime transition, Int. Symp. On Two-Phase Flow Modelling and Experimentation. Pisa, Italy, Semptember (2004)*
- [36].Sotgia G. M., Tartarini P., Stalio E. "Experimental analysis of flow regimes and pressure drop reduction in oil-water mixtures", *International Journal of Multiphase Flow*, vol.34, pag.1161-1174, 2008
- [37].Taitel, Y., *Stratified Three-Phase Flow in Pipes, Int. J. Multiphase Flow, Vol 21, pp. 53-60 (1995)*
- [38].Vanegas Parda J. W., Bannwart A. C. "Modeling of vertical core-annular flows and application to heavy oil production" *Journal of Energy Resources Technology*, vol.123, pag.194-199, 2001

