

**POLITECNICO DI TORINO**

SCUOLA DI DOTTORATO

Dottorato in Energetica – XXIV ciclo

Tesi di Dottorato

**Fluidodinamica bifase in condotti elicoidali per  
applicazioni nucleari**



**Marina Orio**

Tutori

Prof. Mario De Salve

Prof. Bruno Panella

Coordinatore del corso di dottorato

Marina Orio

Maggio 2013

*A mio marito*  
*e*  
*A mio figlio*

## **Ringraziamenti**

Trovo doveroso ringraziare quanti nel corso di questi anni mi hanno aiutata e sostenuta nel mio lavoro di ricerca. Le difficoltà incontrate sono state molteplici, ma sono state prontamente superate grazie al sostegno che mi è stato dato costantemente.

Ringrazio il Prof. Mario De Salve e il Prof. Bruno Panella per la loro grande disponibilità ed aiuto in questi anni di collaborazione nella ricerca.

Vorrei ringraziare tutti i tecnici del Dipartimento Energia che hanno collaborato alla realizzazione e alla messa a punto dei circuiti sperimentali e dei sistemi di misura. Un pensiero e un grazie particolare vanno a Rocco Costantino e alla Dott. Gladis Di Giusto per il loro insostituibile contributo nel lavoro e per la loro amicizia.

Ringrazio i miei genitori, mia sorella e mio fratello per la grande pazienza per l'enorme sostegno avuto in questi anni, senza il quale anche le difficoltà più piccole sarebbero state difficili da superare.

Ringrazio tutti gli amici che mi sono stati vicini anche solo con un pensiero.

Un grazie infinito a mio marito Paolo che mi ha sostenuta costantemente, consolata al bisogno e che in questi anni ha gioito e sofferto con me, non lasciandomi mai sola.

Infine un grazie speciale a mio figlio Claudio che è venuto al mondo solo da un anno, ma che mi ha già insegnato tanto e che con un sorriso rende il mio mondo migliore.

# Indice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Ringraziamenti</b>   | <b>2</b>  |
| <b>Indice</b>   | <b>3</b>  |
| <b>1 Introduzione.</b>  | <b>6</b>  |
| <b>2 L'impianto IRIS.</b>   | <b>12</b> |
| 2.1 Generalità.   | 12        |
| 2.2 Approccio 'safety-by-design'  | 15        |
| 2.3 Descrizione del sistema primario integrale                          | 17        |
| 2.3.1 Vessel  | 18        |
| 2.3.2 Internals   | 21        |
| 2.3.3 Nocciolo  | 22        |
| 2.3.4 Circuito di refrigerazione primario e secondario                  | 23        |
| 2.3.5 Pompe del fluido primario   | 23        |
| 2.3.6 Pressurizzatore   | 25        |
| 2.3.7 Meccanismi d'azionamento delle barre di controllo                 | 26        |
| 2.3.8 Riflettori di neutroni  | 27        |
| 2.3.9 Generatori di vapore  | 28        |
| <b>3 Descrizione dei circuiti di prova.</b>                             | <b>34</b> |
| 3.1 Sezioni di prova.   | 34        |
| 3.2 Circuito di prova per le singole eliche: Circuito A.                | 42        |
| 3.3 Circuito di prova per le eliche in parallelo. Circuito B.           | 46        |
| <b>4 Strumentazione di misura.</b>                                      | <b>56</b> |
| 4.1 Strumentazione di misura del circuito per eliche singole (A).       | 56        |
| 4.2 Strumentazione di misura del circuito per eliche in parallelo (B).  | 61        |
| 4.3 Incertezza di misura.   | 66        |
| <b>5 Prove in deflusso monofase.</b>                                    | <b>67</b> |
| 5.1 Risultati sperimentali prove monofase con circuito A.               | 68        |
| 5.1.1 Differenze di pressione monofase .Circuito A.                     | 68        |
| 5.1.2 Regimi di moto e transizione laminare – turbolento. Circuito A.   | 74        |
| 5.1.3 Fattore d'attrito. Circuito A.                                    | 76        |
| 5.2 Risultati sperimentali prove monofase con circuito B.               | 84        |
| 5.2.1 Differenze di pressione monofase. Circuito B.                     | 84        |
| 5.2.2 Fattore d'attrito. Circuito B.                                    | 88        |
| <b>6 Prove in deflusso bifase con circuito A.</b>                       | <b>92</b> |
| 6.1 Procedura sperimentale prove in deflusso bifase. Circuito A.        | 92        |
| 6.2 Risultati sperimentali prove in deflusso bifase Circuito A.         | 93        |
| 6.2.1 Pressione nella sezione di prova. Circuito A.                     | 93        |
| 6.2.2 Calcolo della portata in massa di aria. Circuito A.               | 97        |
| 6.2.3 Grado di vuoto, titolo in massa e titolo volumetrico. Circuito A. | 98        |
| 6.2.4 Velocità media della miscela. Circuito A.                         | 105       |

|                    |  |            |
|--------------------|--|------------|
| 6.2.5              | Differenze di pressione bifase. Circuito A.  | 109        |
| 6.2.6              | Parametro di Martinelli e moltiplicatori bifase per attrito. Circuito A.                           | 111        |
| 6.2.7              | Grado di vuoto sperimentale e correlazioni teoriche. Circuito A.                                   | 117        |
| 6.2.8              | Flow pattern. Circuito A.  | 120        |
| <b>7</b>           | <b>Prove in deflusso bifase con circuito B.</b>  | <b>135</b> |
| 7.1                | <i>Procedura sperimentale prove in deflusso bifase. Circuito B.</i>                                | 135        |
| 7.1.1              | Prove con singola sezione di prova in deflusso bifase (Prove I).                                   | 135        |
| 7.1.2              | Prove con tre sezione di prova in deflusso bifase (Prove II).                                      | 137        |
| 7.2                | <i>Risultati sperimentali prove tipo I: prove con singola sezione di prova in deflusso bifase.</i> | 138        |
| 7.2.1              | Portata nei rami in ingresso delle sezioni di prova. Circuito B prove I.                           | 138        |
| 7.2.2              | Differenze di pressione. Circuito B prove I.   | 147        |
| 7.2.3              | Calcolo della portata in massa di aria. Circuito B prove I.  | 149        |
| 7.2.4              | Grado di vuoto. Circuito B prove I.  | 150        |
| 7.2.5              | Velocità media della miscela. Circuito B prove I.  | 161        |
| 7.2.6              | Parametro di Martinelli e moltiplicatori bifase per attrito. Circuito B. Prove I                   | 166        |
| 7.2.7              | Grado di vuoto sperimentale e correlazioni teoriche. Circuito B prove I                            | 180        |
| 7.2.8              | Flow pattern. Circuito B prove I.  | 183        |
| 7.3                | <i>Risultati sperimentali prove tipo II: prove con tre sezione di prova in deflusso bifase.</i>    | 193        |
| 7.3.1              | Portata nei rami in ingresso delle sezioni di prova. Circuito B prove II.                          | 193        |
| 7.3.2              | Differenze di pressione. Circuito B prove II.  | 198        |
| 7.3.3              | Calcolo della portata in massa di aria. Circuito B prove II.                                       | 202        |
| 7.3.4              | Grado di vuoto. Circuito B prove II.   | 203        |
| 7.3.5              | Velocità media della miscela. Circuito B prove II.   | 219        |
| 7.3.6              | Parametro di Martinelli e moltiplicatori bifase per attrito. Circuito B prove II.                  | 227        |
| 7.3.7              | Grado di vuoto sperimentale e correlazioni teoriche. Circuito B prove II                           | 244        |
| 7.3.8              | Flow pattern. Circuito B prove II.   | 246        |
| <b>8</b>           | <b>Instabilità fluidodinamiche.</b>  | <b>259</b> |
| 8.1                | <i>Instabilità statiche.</i>   | 260        |
| 8.1.1              | Distribuzione delle portate nei canali Prove I.  | 260        |
| 8.1.2              | Distribuzione delle portate nei canali Prove II Caso 1.  | 281        |
| 8.1.3              | Distribuzione delle portate nei canali Prove II Caso 2.  | 292        |
| 8.2                | <i>Instabilità dinamiche.</i>  | 298        |
| 8.2.1              | Distribuzione delle cadute di pressione misurate Prove I.  | 298        |
| 8.2.2              | Distribuzione delle cadute di pressione misurate Prove II Caso 1.                                  | 319        |
| 8.2.3              | Distribuzione delle cadute di pressione Prove II Caso 2.   | 330        |
| <b>9</b>           | <b>Conclusioni.</b>  | <b>336</b> |
| <b>Appendice A</b> | <b>Correlazioni per il calcolo del fattore d'attrito monofase in tubi curvi.</b>                   | <b>347</b> |
| <b>Appendice B</b> | <b>Cadute di pressione nelle tre eliche</b>  | <b>353</b> |
| B.1                | <i>Circuito A</i>  | 353        |
| B.1.1              | Cadute di pressione misurate elica D = 0,64 m  | 353        |
| B.1.2              | Cadute di pressione misurate elica D = 1 m   | 356        |
| B.1.3              | Cadute di pressione misurate elica D = 1,39 m  | 359        |
| B.1.4              | Cadute di pressione per attrito elica D = 0,64 m   | 360        |
| B.1.5              | Cadute di pressione per attrito elica D = 1 m  | 363        |
| B.1.6              | Cadute di pressione misurate elica D = 1,39 m  | 366        |
| B.2                | <i>Circuito B prove tipo I</i>   | 367        |
| B.2.1              | Cadute di pressione misurate e per attrito elica D = 0,64 m  | 367        |
| B.2.2              | Cadute di pressione misurate e per attrito elica D = 1 m   | 368        |
| B.2.3              | Cadute di pressione misurate e per attrito elica D = 1,39 m  | 369        |
| B.3                | <i>Circuito B prove tipo II Caso I</i>   | 370        |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| B.3.1  | Cadute di pressione misurate e per attrito per portata W1       | 370        |
| B.3.2  | Cadute di pressione misurate e per attrito per portata W2       | 371        |
| B.3.3  | Cadute di pressione misurate e per attrito per portata W3       | 372        |
| B.3.4  | Cadute di pressione misurate e per attrito per portata W4       | 373        |
| <b>Appendice C Immagini dei <i>flow pattern</i> Elica D = 0,64 m</b> |   | <b>374</b> |
| C.1  | <i>Osservazioni ad altezza <math>\Delta Z</math> di 510 mm</i>  | 374        |
| C.1.1  | Prova con portata d'acqua pari a 200 l/h                        | 374        |
| C.1.2  | Prova con portata d'acqua pari a 300 l/h                        | 378        |
| C.1.3  | Prova con portata d'acqua pari a 400 l/h                        | 381        |
| C.1.4  | Prova con portata d'acqua pari a circa 600 l/h                  | 384        |
| C.1.5  | Prova con portata d'acqua pari a circa 800 l/h                  | 386        |
| <b>Appendice D Immagini dei <i>flow pattern</i> Elica D = 1 m</b>    |   | <b>388</b> |
| D.1  | <i>Osservazioni ad altezza <math>\Delta Z</math> di 510 mm</i>  | 388        |
| D.1.1  | Prova con portata d'acqua pari a 200 l/h                        | 388        |
| D.1.2  | Prova con portata d'acqua pari a 300 l/h                        | 392        |
| D.1.3  | Prova con portata d'acqua pari a 400 l/h                        | 395        |
| D.1.4  | Prova con portata d'acqua pari a circa 800 l/h                  | 398        |
| D.2  | <i>Osservazioni ad altezza <math>\Delta Z</math> di 1280 mm</i> | 400        |
| D.2.1  | Prova con portata d'acqua pari a 200 l/h                        | 400        |
| D.2.2  | Prove con portata d'acqua pari a 300 l/h                        | 404        |
| D.2.3  | Prova con portata d'acqua pari a 400 l/h                        | 408        |
| D.2.4  | Prove con portata d'acqua pari a circa 800 l/h                  | 412        |
| D.3  | <i>Osservazioni ad altezza <math>\Delta Z</math> di 2080 mm</i> | 414        |
| D.3.1  | Portata d'acqua pari a 200 l/h                                  | 414        |
| D.3.2  | Portata d'acqua pari a 300 l/h                                  | 418        |
| D.3.3  | Portata d'acqua pari a 400 l/h                                  | 421        |
| D.3.4  | Portata d'acqua pari a 800 l/h                                  | 425        |
| <b>Appendice E Immagini dei <i>flow pattern</i> Elica D = 1,39 m</b> |   | <b>427</b> |
| E.1  | <i>Osservazioni ad altezza <math>\Delta Z</math> di 510 mm</i>  | 427        |
| E.1.1  | Prova con portata d'acqua pari a 200 l/h                        | 427        |
| E.1.2  | Prova con portata d'acqua pari a 300 l/h                        | 430        |
| <b>Bibliografia.</b>   |   | <b>434</b> |

# 1 Introduzione.

Il presente lavoro di ricerca si pone nell'ambito dell'analisi della termofluidodinamica del reattore nucleare innovativo IRIS [1-13]; in particolare ci si propone di investigare cadute di pressione, grado di vuoto e *flow pattern* nei tubi dei generatori di vapore elicoidali di tale reattore.

Il reattore nucleare IRIS utilizza acqua leggera pressurizzata e rientra nel più ampio progetto internazionale dei reattori nucleari della “*Generation IV*”, in cui obiettivo è la progettazione e la successiva realizzazione di reattori innovativi.

Il reattore IRIS soddisfa dal punto di vista progettuale i quattro requisiti stabiliti per la generazione IV:

- resistenza alla proliferazione;
- elevato livello di sicurezza;
- competitività economica;
- riduzione della produzione di rifiuti radioattivi.

Le principali caratteristiche tecniche riguardano l'eliminazione del rischio per alcune tipologie di incidenti e la minimizzazione delle conseguenze di eventuali eventi incidentali. Questo aspetto, altamente innovativo del progetto, si realizza ponendo tutti i componenti del sistema primario all'interno del *vessel* del reattore, ottenendo così l'annullamento delle probabilità di accadimento per il *large LOCA* (Loss-Of-Coolant Accident), che rappresenta l'incidente base di progetto e quindi quello per cui vengono dimensionati i sistemi ausiliari di sicurezza. Per gli altri incidenti le probabilità di accadimento vengono drasticamente ridotte, comportando una maggiore sicurezza e più facile accettazione dell'impianto all'interno del contesto socio-ambientale in cui andrebbe ad inserirsi. Le dosi di esposizione ai lavoratori risultano inoltre molto più contenute rispetto ad un PWR di tecnologia tradizionale.

I tubi elicoidali sono stati largamente utilizzati in campo nucleare, ma il loro interesse risulta sicuramente più ampio trovando impiego anche, per esempio, nel campo dell'ingegneria chimica [17-28-29]. Le caratteristiche di maggior interesse in campo

nucleare sono relative alla loro compattezza ed alla loro alta efficienza nello scambio termico, in particolare in generatori di vapore.

Caratteristica peculiare del reattore nucleare IRIS è l'impiego, all'interno del vessel di otto generatori di vapore, ciascuno dei quali con il lato secondario costituito da un fascio di tubi elicoidali.

I generatori di vapore sono progettati per produrre vapore surriscaldato a 5,8 MPa e 317 °C, mentre per quanto riguarda il lato primario prevede la pressione di 17,24 MPa e la temperature di 343,3 °C.

In condizioni incidentali questi generatori di vapore devono provvedere alla rimozione del calore generato dal nocciolo mediante la sola circolazione naturale. Ciascun generatore di vapore è percorso da una portata nominale di refrigerante secondario pari a 62,85 kg/s. Il fascio tubiero è costituito da tubi elicoidali caratterizzati da diametri dell'elica e passi diversi a seconda della posizione che devono occupare all'interno del generatore di vapore: si passa da un minimo di 0,64 m ad un massimo di 1,59 m di diametro e da un minimo di 0,485 m di passo per l'elica di dimensione inferiore, ad un massimo di 1,2 m di passo per l'elica di dimensione maggiore.

L'ANSALDO – CAMOZZI, nell'ambito dello sviluppo del reattore IRIS, sta sviluppando un prototipo di generatore di vapore costruendo dei fasci tubieri a spirale i cui parametri geometrici variano tra i valori riportati in Tabella 1.

Lo studio del deflusso di acqua in fase liquida, di acqua in bifase e di vapore surriscaldato in condotti elicoidali ricopre quindi un'importanza fondamentale nel progetto del reattore innovativo IRIS.

In particolare interessa conoscere:

1. le cadute di pressione lato primario
2. le cadute di pressione lato secondario
3. lo scambio termico primario – secondario
4. la stabilità del deflusso dei canali in parallelo
5. le interazioni fluido – fascio tubiero dal punto di vista delle vibrazioni e della fluidodinamica.

Data la rilevanza dell'argomento e la sua versatilità, negli ultimi anni sono stati effettuati diversi studi sperimentali, come risulta dall'ampia letteratura disponibile, per



analizzare le caratteristiche dei condotti elicoidali, relativamente allo scambio termico [6-14] e alla fluidodinamica [2-7-8-9]. In particolare le campagne sperimentali descritte in letteratura sono incentrate sull'analisi delle cadute di pressione in deflusso monofase e in deflusso bifase in tubi elicoidali [5-11-15-16], sia in caso di moto verticale che nel caso di moto orizzontale, utilizzando apparecchiature sperimentali ed determinando, dai risultati sperimentali ottenuti, numerose correlazioni, in particolare per il calcolo del fattore d'attrito monofase e per il moltiplicatore per attrito bifase. In alcuni articoli si confrontano i valori ottenuti sperimentalmente con modelli, quali Lockhart-Martinelli [4-10], per valutare il moltiplicatore per attrito bifase.

|        | <b>Numero di tubi</b> | <b>Numero di giri</b> | <b>Diametro elica</b> | <b>Passo elica</b> |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
|        | <b>Nt</b>             | <b>T</b>              | <b>D [mm]</b>         | <b>P [mm]</b>      |
| ROW 1  | 10 + 10               | 14                    | 640                   | 485                |
| ROW 2  | 10 + 10               | 14                    | 690                   | 485                |
| ROW 3  | 12 + 12               | 12                    | 740                   | 562,5              |
| ROW 4  | 12 + 12               | 12                    | 790                   | 562,5              |
| ROW 5  | 13 + 13               | 11                    | 840                   | 607,5              |
| ROW 6  | 13 + 13               | 11                    | 890                   | 607,5              |
| ROW 7  | 14 + 14               | 10                    | 940                   | 666,5              |
| ROW 8  | 14 + 14               | 10                    | 990                   | 666,5              |
| ROW 9  | 15 + 15               | 9                     | 1040                  | 735                |
| ROW 10 | 15 + 15               | 9                     | 1090                  | 735                |
| ROW 11 | 17 + 17               | 8                     | 1140                  | 814                |
| ROW 12 | 17 + 17               | 8                     | 1190                  | 814                |
| ROW 13 | 19 + 19               | 7                     | 1240                  | 907                |
| ROW 14 | 19 + 19               | 7                     | 1290                  | 907                |
| ROW 15 | 20 + 20               | 6,5                   | 1340                  | 954                |
| ROW 16 | 20 + 20               | 6,5                   | 1390                  | 954                |
| ROW 17 | 22 + 22               | 6                     | 1440                  | 1100               |
| ROW 18 | 22 + 22               | 6                     | 1490                  | 1100               |
| ROW 19 | 22 + 22               | 5,5                   | 1540                  | 1198               |
| ROW 20 | 22 + 22               | 5,5                   | 1590                  | 1198               |

**Tabella 1: Parametri geometrici prototipo ANSALDO - CAMOZZI.**

In alcuni lavori [8-17-18-19-20-21] si è posto l'accento sull'influenza della forza centrifuga, dovuta alla curvatura del tubo elicoidale, e sulla conseguente nascita di moti secondari che influiscono pesantemente sul deflusso, per condizioni di bassa turbolenza. Questi moti dipendono dalle caratteristiche geometriche del condotto, quali torsione dell'elica e curvatura della stessa: il parametro indicativo di tali parametri è il numero di Dean [21-33].

Si evidenzia anche l'influenza significativa, in condizioni di deflusso bifase, della forza centrifuga e della torsione sulla disposizione delle fasi all'interno del tubo elicoidale, la quale influenza le cadute di pressione e lo scambio termico.

Nel corso degli anni si sono effettuate numerose osservazioni dei *flow pattern* che si instaurano durante le prove sperimentali e l'influenza che hanno su di essi i parametri fisici e geometrici scelti in questi stessi test [8-10-12-27].

Un aspetto che assume particolare rilevanza nell'utilizzo dei tubi elicoidali in generatori di vapore sono le instabilità fluidodinamiche che si hanno nel caso di canali in parallelo; per questa ragione è disponibile una ampia letteratura [30-31-34] che illustra vari aspetti di tale fenomeno sia con un approccio sperimentale che di tipo teorico.

In questo studio si affrontano in particolare le problematiche relative alle cadute di pressione (lato secondario del generatore di vapore), alla stabilità del deflusso ed i *flow patterns*, confrontandoli con le informazioni reperibili nella letteratura aperta.

Nel moto di un fluido in un condotto elicoidale è presente l'effetto della forza centrifuga generata dalla velocità del fluido nella direzione del raggio dell'elica. Questa è responsabile della formazione di moti secondari nella sezione e della separazione delle fasi nel caso di deflusso bifase. Questi fenomeni sono responsabili delle maggiori cadute di pressione per attrito osservate, a parità di portata e sezione, rispetto ai tubi dritti.

In deflusso monofase i tubi elicoidali estendono l'intervallo di esistenza del regime laminare ed estendono anche l'intervallo della ragione di transizione rispetto ad un deflusso con turbolenza completamente sviluppata.

In questo lavoro di ricerca si sono effettuate prove sperimentali utilizzando due circuiti di prova realizzato presso il Dipartimento Energia (precedentemente Dipartimento di Energetica) del Politecnico di Torino.

Le prove sperimentali effettuate si propongono di investigare le caratteristiche fluidodinamiche di tre tubazioni ad elica cilindrica con geometria confrontabile con quella del progetto dei generatori di vapore di IRIS.

Nell'ambito della ricerca qui presentata si sono effettuate due distinte campagne sperimentali:

- Campagna di prova in regime monofase e bifase considerando le sezioni di prova singolarmente;
- Campagna di prova in regime monofase e bifase considerando le sezioni di prova disposte come canali in parallelo.

Nella prima campagna di prova si sono considerate le tre sezioni di prova singolarmente, valutando l'influenza del rapporto  $d/D$  nelle cadute di pressione. Questa prima analisi è stata eseguita sia in condizioni di deflusso monofase che in condizioni di deflusso bifase, con portate d'acqua comprese tra 200 e 800 l/h e, per il solo bifase, portate d'aria comprese tra 0,043 g/s e 0,26 g/s.

Nella seconda fase di sperimentazione si sono poste le sezioni di prova in modo da realizzare una configurazione con tre canali in parallelo; si sono quindi testate le eliche così disposte con due differenti tipologie di prova:

- Campagna di prova in regime monofase;
- Campagna di prova imponendo il deflusso bifase in un'elica alla volta e con le altre due in deflusso monofase;
- Campagna di prova imponendo il deflusso bifase nelle tre eliche in contemporanea.

Nel caso monofase le portate d'acqua testate sono state simili a quelle utilizzate nelle prove monofase con le eliche testate singolarmente.

Nelle altre due tipologie di prove si sono testate quattro portate d'acqua totali al collettore di alimentazione delle eliche, 290 g/s, 530 g/s, 560 g/s e 580 g/s, e come portate d'aria 0,25 g/s, 0,58 g/s e 0,85 g/s. Per la sola campagna di prove con le tre eliche in deflusso bifase contemporaneamente si sono testate anche due portate

d'acqua totali al collettore di alimentazione pari a 112 g/s e 240 g/s e le portate d'aria di 1,45 g/s, 1,65 g/s e 1,9 g/s.

Le condizioni di prova sono state così scelte in modo da soddisfare i limiti imposti dall'impiego delle miscele bifase aria-acqua in tubo di PMMA, ossia per limitare gli sforzi meccanici, dovuti a pressione e vibrazioni, agenti sull'elica, e ai limiti imposti dai fondo scala dei trasduttori di pressione differenziali utilizzati per le misure.

Le cadute di pressione per attrito lungo il condotto sono state stimate, così come la pressione in ingresso alla sezione di prova e la pressione dell'aria, utilizzando dei trasduttori di pressione differenziali. Il grado di vuoto è stato misurato con il metodo della chiusura rapida delle valvole, mentre i *flow pattern* sono stati valutati sia utilizzando una videocamera ad alta definizione che con osservazioni visive.

Nello svolgimento della monografia verranno riportati ed illustrati sia i risultati sperimentali sia il loro confronto con le previsioni di correlazioni e modelli presenti in letteratura.

## 2 L'impianto IRIS.

### 2.1 Generalità.

IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*) è un reattore evoluto nato all'interno del *Nuclear Energy Research Initiative (NERI) project* come *Secure Transportable Autonomous Light Water Reactor (STAR-LW)* con l'obiettivo di soddisfare i requisiti richiesti ai reattori di nuova generazione.

Il progetto è affidato ad un consorzio internazionale, che include università, laboratori di ricerca e industrie di nove nazionalità diverse, sotto la guida della *Westinghouse Electric Company* (Tabella 2). Il progetto IRIS si è evoluto diventando uno dei principali reattori avanzati che possono essere tenuti in seria considerazione per un'eventuale diffusione commerciale nel prossimo decennio. Si auspica un suo impiego a breve termine come reattore commerciale; gli obiettivi che si vogliono raggiungere sono indicati in Tabella 3.



Figura 1: Logo consorzio IRIS.

La parola *International* presente nell'acronimo IRIS (Figura 1) indica appunto che la progettazione, la successiva fabbricazione, gestione e manutenzione di questo reattore è completamente affidata ad un consorzio internazionale in cui tutti i membri sono responsabili del buon esito del progetto.

|                       |  |          |
|-----------------------|--|----------|
| Industrie             | Westinghouse                           | USA      |
|                       | BNFL                                   | UK       |
|                       | Ansaldo Energia                        | Italia   |
|                       | Ansaldo Camozzi                        | Italia   |
|                       | ENSA                                   | Spagna   |
|                       | NUCLEP                                 | Brasile  |
|                       | Bechtel                                | USA      |
|                       | OKBM                                   | Russia   |
| Università            | Politecnico di Torino                  | Italy    |
|                       | Politecnico di Milano                  | Italy    |
|                       | Università di Pisa                     | Italy    |
|                       | Università di Roma                     | Italy    |
|                       | MIT                                    | USA      |
|                       | Tokyo inst. of Tecnology               | Giappone |
|                       | Università di Zagreb                   | Croazia  |
| Università associate  | University of California Berkeley      | USA      |
|                       | University of Tennessee                | USA      |
|                       | Ohio State                             | USA      |
|                       | Iowa State (& Ames Lab)                | USA      |
|                       | University of Michigan (& Sandia Labs) | USA      |
| Produttori di energia | TVA                                    | USA      |
|                       | Elettronuclear                         | Brasile  |
| Laboratori            | ORNL                                   | USA      |
|                       | CNEN                                   | Brasile  |
|                       | ININ                                   | Messico  |

**Tabella 2: Membri del consorzio.**

| <b>Obiettivi</b>                                     |
|--|
| Stabilire tecnologia e fattibilità economica         |
| Esecuzione dei disegni concettuali e stima dei costi |
| Domanda di preliminare                               |
| Richiesta del licensing della centrale               |
| Delineare le linee guida per la commercializzazione  |
| Mettere in atto i progetti preliminari               |
| Completamento della SAR                              |
| Ottenere le certificazioni dei progetti              |
| Primo di una serie di spiegamenti                    |

**Tabella 3: Obiettivi del progetto IRIS**

---

IRIS è un reattore pressurizzato ad acqua leggera e, poiché rientra nel progetto internazionale *Generation IV*, soddisfa infatti i quattro requisiti stabiliti:

- resistenza alla proliferazione;
- elevato livello di sicurezza;
- competitività economica;
- riduzione della produzione di rifiuti radioattivi.

L'impianto può essere suddiviso in due parti: una tradizionale e una prettamente nucleare, ed è proprio quest'ultima che presenta un carattere fortemente innovativo.

IRIS è un reattore integrale, modulare, di taglia media, il cui progetto adotta un approccio *safety-by-design*; con tale metodo alcuni incidenti vengono del tutto eliminati o le loro conseguenze e probabilità di accadimento notevolmente ridotte. La taglia di riferimento è fissata a 1000 MW<sub>t</sub> (335 MW<sub>e</sub>), tuttavia la stessa configurazione d'impianto può essere utilizzata anche per taglie minori fino a 100 MW<sub>e</sub> con variazioni delle dimensioni del *vessel* modeste.

La caratteristica peculiare di IRIS è di avere un sistema primario completamente integrato, infatti tutti i principali componenti del sistema di refrigerazione primaria, inclusi generatori di vapore, pompe di alimentazione e pressurizzatore, sono alloggiati insieme al combustibile nucleare all'interno di un unico *vessel* in pressione di dimensioni tipiche pari a quelle di un BWR tradizionale.

Sono state studiate due possibili combinazioni di moduli: la prima prevede l'utilizzo di tre moduli IRIS indipendenti, per una potenza elettrica totale di 1005 MW, la seconda l'utilizzo di due unità, a loro volta composte da due moduli IRIS, che condividono gran parte dei sistemi ausiliari, per una potenza elettrica di 1340 MW.

Le sue dimensioni ridotte e il suo progetto modulare possono semplificare le operazioni di costruzione *in situ* e potrebbero rendere il reattore interessante anche da quei paesi che non dispongono di siti idonei per la collocazione di un impianto di grossa taglia come quelli di vecchia generazione.

## 2.2 Approccio 'safety-by-design'

Il reattore IRIS è stato concepito in modo da avere delle caratteristiche innovative in relazione alla sicurezza, per la quale vengono previsti diversi livelli per la mitigazione degli effetti causati da situazioni incidentali; lo scopo principale del progetto IRIS è l'eliminazione degli eventi iniziatori di situazioni incidentali che potrebbero portare al danneggiamento del *core*. Questo obiettivo è implementato attraverso l'approccio "safety by design" ovvero è il progetto stesso ad essere tale da ridurre intrinsecamente gli effetti degli incidenti e le loro probabilità di accadimento; è questa la differenza principale rispetto ai reattori convenzionali con circuito esterno.

| IRIS Design Characteristic                       | Safety Implication   | Accidents Affected   |
|--|--|--|
| Integral Layout                                  | No large primary piping  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• LOCAs</li> </ul>  |
| Large, Tall Vessel                               | Increased water inventory  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• LOCAs</li> <li>• Decrease in heat removal</li> </ul>  |
|  | Increased natural circulation<br>Accommodates internal CRDMs   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Various events</li> <li>• RCCA ejection; eliminate head penetrations</li> </ul>                 |
| Heat Removal from inside the vessel              | Depressurizes primary system by condensation and not by loss of mass   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• LOCAs</li> </ul>  |
|  | Effective heat removal by SG/EHRS  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• LOCAs</li> <li>• All events for which effective cooldown is required</li> <li>• ATWS</li> </ul> |
| Reduced size, higher design pressure containment | Reduced driving force through primary opening  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• LOCAs</li> </ul>  |
| Multiple coolant pumps                           | Decreased importance of single pump failure  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Locked rotor; shaft seizure/break</li> </ul>  |
| High design pressure steam generator system      | No SG safety valves  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Steam generator tube rupture</li> </ul>   |
|  | Primary system cannot over-pressure secondary system<br>Feed/Steam System Piping designed for full RCS pressure reduces piping failure probability | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Steam line break</li> <li>• Feed line break</li> </ul>  |
| Once Through steam generator                     | Limited water inventory  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Steam line break</li> <li>• {Feed line break}*</li> </ul>                                       |
| Integral Pressurizer                             | Large pressurizer volume/reactor power   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Overheating events, including feed line break</li> <li>• ATWS</li> </ul>                        |

\* Only accident which is potentially affected in a negative way

**Tabella 4: Implicazioni dell'approccio 'safety-by-design' [1].**

L'assenza di grosse penetrazioni primarie nel recipiente in pressione o l'assenza di grosse tubazioni primarie esclude già in fase di progetto il *Large* LOCA. Vengono inoltre eliminati gli incidenti di classe IV e la probabilità di danno al core è ridotta fino



ad essere dell'ordine di  $10^{-8}$ , ciò permette di evitare l'adozione e lo studio di un piano di emergenza per la popolazione.

I risultati di questo approccio e il suo impatto sugli incidenti presi a riferimento in fase di progetto nei reattori ad acqua leggera sono riassunti in Tabella 4 e in Tabella 5.

| Condition IV Design Basis Events |                                      | IRIS Design Characteristic   | Results of IRIS Safety-by-Design   |
|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| 1                                | Large Break LOCA                     | Integral RV Layout – No loop piping  | Eliminated   |
| 2                                | Steam Generator Tube Rupture         | High design pressure once-through SGs, piping, and isolation valves  | Reduced consequences, simplified mitigation  |
| 3                                | Steam System Piping Failure          | High design pressure SGs, piping, and isolation valves. SGs have small water inventory                     | Reduced probability, reduced (limited containment effect, limited cooldown) or eliminated (no potential for return to critical power) consequences |
| 4                                | Feedwater System Pipe Break          | High design pressure SGs, piping, and isolation valves. Integral RV has large primary water heat capacity. | Reduced probability, reduced consequences (no high pressure relief from reactor coolant system)  |
| 5                                | Reactor Coolant Pump Shaft Break     | Spool pumps have no shaft  | Eliminated   |
| 6                                | Reactor Coolant Pump Seizure         | No DNB for failure of 1 out of 8 RCPs  | Reduced consequences   |
| 7                                | Spectrum of RCCA ejection accidents  | With internal CRDMs there is no ejection driving force   | Eliminated   |
| 8                                | Design Basis Fuel Handling Accidents | No IRIS specific design feature  | No impact  |

Tabella 5: Conseguenze sulla sicurezza dell'approccio 'safety-by-design' [1].

## 2.3 Descrizione del sistema primario integrale

Il sistema primario comprende *vessel* ed *internals*, cioè generatori di vapore, pompe per il fluido primario, pressurizzatore, riflettori neutronici e meccanismi d'azionamento delle barre di controllo. Caratteristica fondamentale dell'impianto IRIS è l'assenza di tubazioni per il fluido primario.

Si analizzano ora in dettaglio i diversi componenti.

| <b>Dati generali impianto</b>               |                              |
|---|------------------------------|
| Potenza elettrica [MWe]                     | 335                          |
| Potenza termica [MWt]                       | 1000                         |
| <b>Sistema fluido secondario</b>            |                              |
| Temperatura vapore [°C]                     | 317                          |
| Pressione vapore [MPa]                      | 5,8                          |
| Temperatura acqua di alimento [°C]          | 224                          |
| Pressione acqua di alimento [MPa]           | 6,4                          |
| <b>Sistema fluido primario</b>              |                              |
| Portata fluido primario [kg/s]              | 4700                         |
| Pressione di esercizio [MPa]                | 15,5                         |
| Temperatura ingresso core [°C]              | 292                          |
| Temperatura uscita core [°C]                | 330                          |
| <b>Nocciolo</b>                             |                              |
| Altezza totale elementi di combustibile [m] | 5,207                        |
| Altezza attiva nocciolo [m]                 | 4,267                        |
| Inventario combustibile [t di U]            | 43,5                         |
| Temperatura lineare media [kW/m]            | 10                           |
| Densità di potenza media [kW/l]             | 51,26                        |
| Composizione combustibile                   | UO <sub>2</sub> sinterizzato |
| Tipo barre di combustibile                  | Quadrato 17x17               |
| N° elementi di combustibile assemblati      | 87                           |
| N° barre assemblate                         | 254                          |
| Diametro esterno barre di combustibile [mm] | 95                           |
| Ciclo di combustibile [mesi]                | 30-43                        |
| Burnup medio [MW/t U]                       | 60000                        |

Tabella 6: Dati generali impianto [1].

### 2.3.1 Vessel

Il *vessel* è di grandi dimensioni poiché al suo interno, oltre al nocciolo, sono posti i generatori di vapore, il pressurizzatore e le pompe del circuito primario. Tali dimensioni sono riportate in Tabella 7.

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| Altezza <i>vessel</i> [m]                                 | 22,21                                |
| Diametro interno <i>vessel</i> [m]                        | 6,2                                  |
| Spessore involucro cilindrico [m]                         | 0,28                                 |
| Spessore minimo rivestimento in acciaio inossidabile [mm] | 6                                    |
| Pressione di progetto [MPa]                               | 17,24                                |
| Temperatura di progetto [°C]                              | 343,3                                |
| Composizione <i>vessel</i>                                | Acciaio al carbonio SA 508,Gr.3,C1.2 |
| Composizione guaina                                       | Acciaio                              |

**Tabella 7: Caratteristiche *vessel***

Il *vessel*, forgiato in acciaio al carbonio, consiste in una serie di gusci cilindrici sovrapposti, un guscio emisferico a chiusura in basso e un coperchio removibile flangiato in testa al recipiente in pressione. Tale emisfera è fissata alla parte cilindrica mediante bulloni e con guarnizioni (*O-ring*) tra le due parti per evitare fuoriuscite dal *vessel*. Un rivestimento in acciaio inossidabile di spessore minimo di 6 mm ricopre tutte le superfici interne del recipiente per evitare fenomeni di corrosione.

Il sistema di refrigerazione del reattore è completamente contenuto all'interno del *vessel* e si concretizza in un circuito compatto visibile in Figura 2. Non rientrano in tale sistema solo alcuni sistemi ausiliari. Il refrigerante fluisce attraverso il nocciolo in direzione ascendente, si distribuisce radialmente al di sopra della piastra di sostegno degli *internals*, attraverso otto pompe primarie, viene spinto negli otto generatori di vapore percorsi in direzione discendente, attraversa infine lo spazio anulare tra il *core barrel* e la parete interna del *vessel* pronto per asportare nuovamente calore al combustibile nucleare. La parete cilindrica del *vessel* presenta otto bocchettoni per l'acqua di alimento dei generatori di vapore posizionati al di sopra del livello superiore del nocciolo ed otto bocchettoni per l'uscita del vapore dai generatori posizionati al disotto del giunto flangiato.

L'intero recipiente in pressione è stato progettato come componente di Classe 1 in accordo alla Sezione III della normativa ASME. L'attuale attesa di vita di un *vessel* è di 60 anni ma si presume che la vita del recipiente in pressione di IRIS possa essere sensibilmente più lunga per un quasi assente danneggiamento neutronico grazie ad un opportuna progettazione degli schermi attorno al nocciolo. In generale tutti gli attacchi e i componenti in pressione sono collegati con saldature a piena penetrazione.

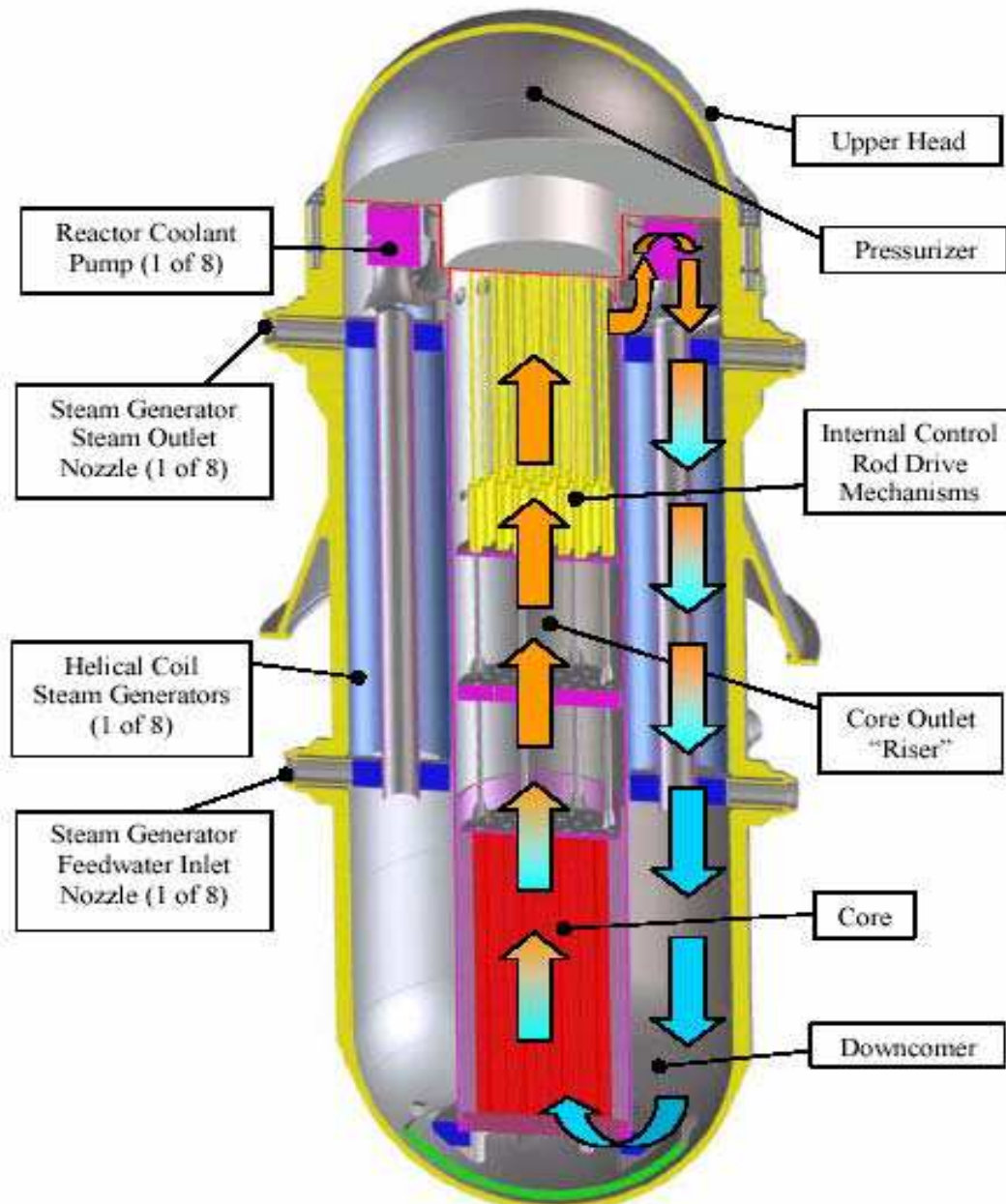
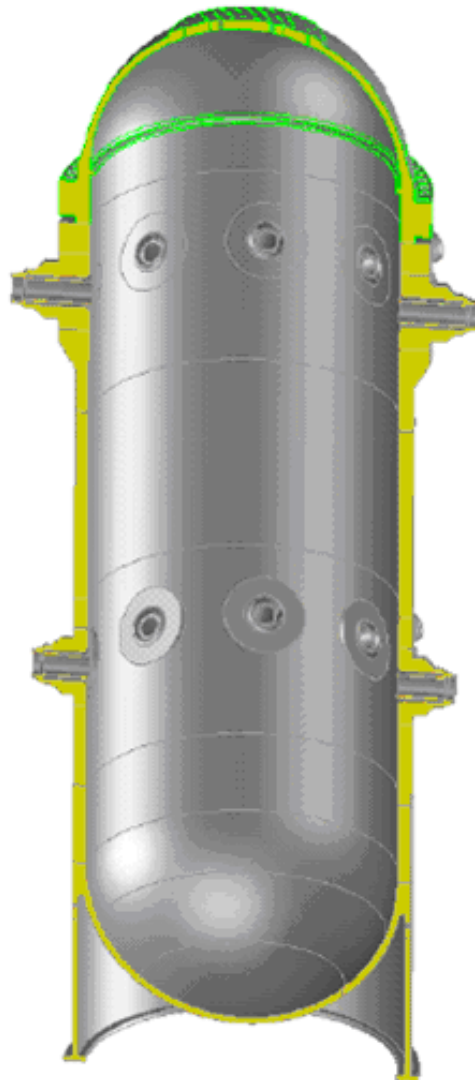


Figura 2: Schema interno *vessel* IRIS.

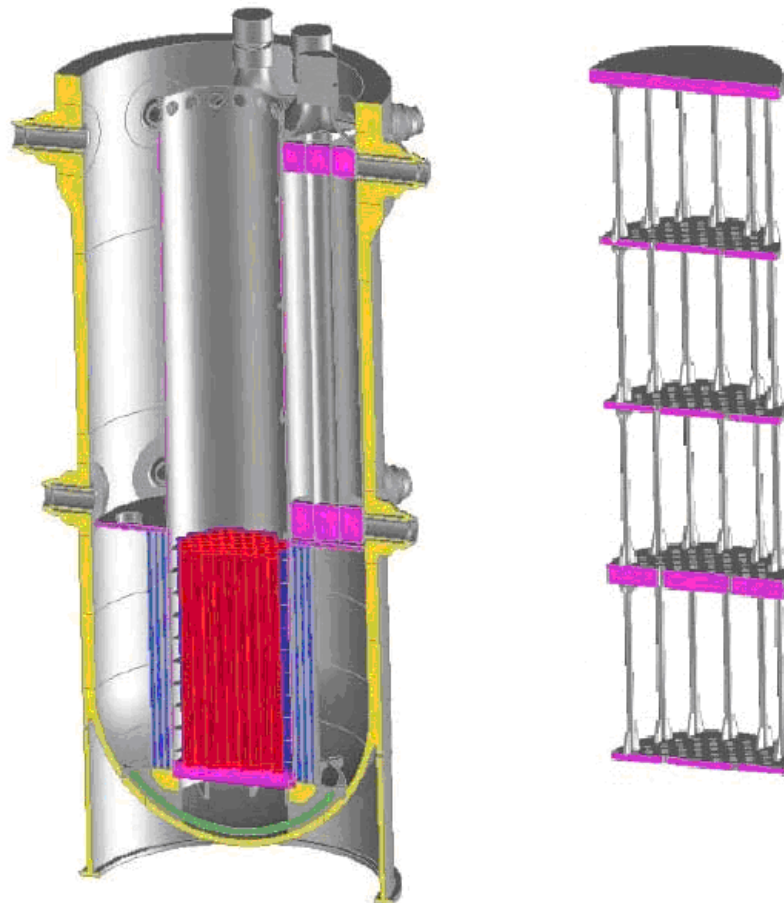
Per la costruzione dei componenti del sistema primario di grandi dimensioni saranno impiegati dei forgiati di tipo integrale; questo consentirà di ridurre il periodo di costruzione, la lunghezza dei cordoni di saldatura e le operazioni di ispezione in esercizio. In Figura 3 è mostrata una possibile configurazione del progetto del *vessel*. Con l'adozione di forgiati di tipo integrale, come si può vedere dalla figura, verranno eliminate del tutto le saldature longitudinali e notevolmente ridotte quelle circolari garantendo in tal modo una maggiore integrità strutturale. Per contro al fine di ridurre l'intero peso della struttura si rende necessario l'impiego di un acciaio al carbonio alto resistente del tipo, SA 508 Grado 3 Classe 2.



**Figura 3: Vessel forgiato.**

### 2.3.2 Internals

Gli *Internals* del reattore IRIS sono simili a quelli di un attuale PWR ed hanno la specifica funzione di supporto del core, del *barrel*, delle barre di controllo e dei loro tubi guida, di definire il tracciato del fluido primario all'interno del recipiente in pressione. Nel reattore IRIS questi componenti interni devono anche garantire un sostegno ai generatori di vapore, alle pompe, al meccanismo guida delle barre di controllo e al *heater* del pressurizzatore.



**Figura 4: Supporti nocciolo.**

Gli *Internals* sono progettati per supportare il loro stesso peso, per garantire un precarico sugli elementi di combustibile e per resistere ai carichi dinamici e vibrazioni derivanti da un terremoto. Gli *internals* del *vessel* del reattore IRIS sono concepiti per consentire, attraverso la parte superiore del *vessel*, una facile ispezione e/o sostituzione di un qualsiasi generatore di vapore o pompa e per consentire un facile accesso al

combustibile; quindi deve essere possibile la loro rimozione durante le operazioni di ispezione e manutenzione.

Questi componenti interni sono mostrati in Figura 4 e possono essere suddivisi in due classi: la struttura di supporto inferiore del nocciolo e la struttura superiore di sostegno.

### 2.3.3 Nocciolo

Le caratteristiche del nocciolo e del suo combustibile sono simili a quelle del progetto di un convenzionale PWR Westinghouse. Un elemento di combustibile del reattore IRIS è composto da 264 barre di combustibile in una configurazione a fascio quadrato 17x17. La posizione centrale dell'elemento è riservata alla strumentazione per la misura del flusso mentre le rimanenti 24 posizioni sono occupate dai tubi guida per le barre di controllo.

Una bassa densità di potenza è raggiunta con una configurazione ad 89 elementi di combustibile ed una altezza attiva pari a 4267 mm con una potenza termica nominale di 1000 MWt. Tutto questo ha portato ad una riduzione della densità di potenza lineare media del 25% rispetto all'AP600, cioè pari a circa 234,36 MW<sub>t</sub>/m.

Questi migliori margini sui parametri termici garantiscono una maggiore flessibilità operativa prolungando l'intero ciclo del combustibile.

Nel nocciolo del reattore IRIS sarà impiegato come combustibile ossido di uranio arricchito fino al 4,95% in U<sub>235</sub> con un *blanket* assiale ed un più basso arricchimento nella periferia del core. Il diametro della pastiglia di combustibile sarà simile a quella impiegata nei reattori convenzionali mentre il diametro della barretta è 9,5 mm. La lunghezza del *gas plenum* è circa raddoppiata (ciò è permesso dalla maggiore altezza del *vessel* di IRIS rispetto ai normali PWR) eliminando possibili sovrappressioni interne.

Il controllo della reattività è attuato attraverso l'impiego di veleni solidi bruciabili, barre di controllo ed una limitata quantità di boro solubile nel refrigerante del reattore. Un impiego limitato di boro garantisce un coefficiente di reattività per temperatura del moderatore maggiormente negativo incrementando in tal modo le proprietà di sicurezza intrinseca. L'intero nocciolo è progettato per sei anni di vita ottimizzando l'intera economia del combustibile e massimizzando il *burnup* allo scarico.

### 2.3.4 *Circuito di refrigerazione primario e secondario*

Il sistema di refrigerazione primario è interamente contenuto nel *vessel* ed il refrigerante è pompato all'interno dello stesso, con eccezione per i prelievi e le iniezioni per il controllo della chimica.

Il refrigerante primario scorre attraverso il *core* dal basso verso l'alto e si muove radicalmente dopo aver attraversato gli *internals* superiori al *core* per essere quindi pompato all'interno dei tubi ad elica dei generatori di vapore dall'alto verso il basso mediante il sistema di pompaggio. Infine il fluido lambisce la parte inferiore del *vessel* ed entra nuovamente nel *core* dal basso verso l'alto.

Il refrigerante secondario passa attraverso otto bocchelli in ingresso ed otto in uscita, posti tra la parete superiore del *core* e la semisfera superiore del *vessel*. Il fluido secondario attraversa i generatori di vapore elicoidali dal basso verso l'alto, in controcorrente rispetto al fluido primario.

L'acqua di alimento è prima portata alla temperatura di saturazione e poi vaporizzata; il vapore fuoriesce dai bocchelli superiori in condizione di lieve surriscaldamento ed è inviato ai turbogeneratori.

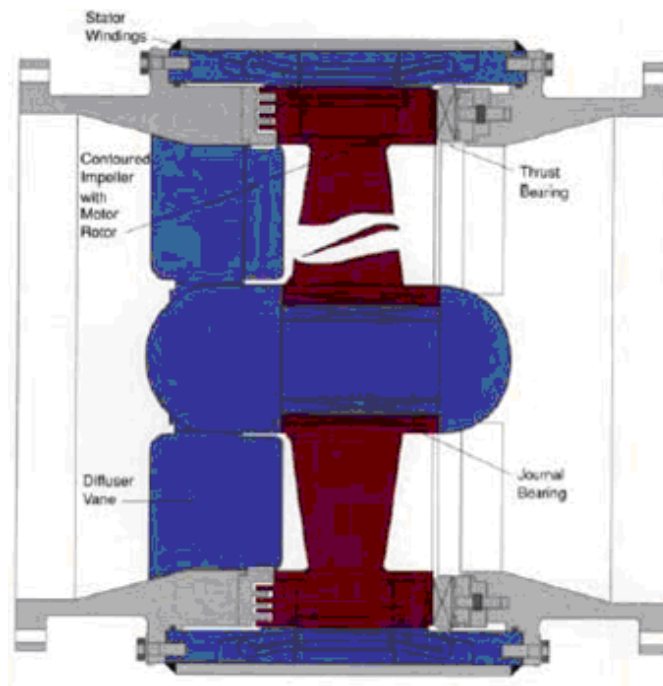
### 2.3.5 *Pompe del fluido primario*

Le pompe di refrigerazione (RCPs) del reattore IRIS sono del tipo “*spool type*”. Sono pompe di tecnologia avanzata impiegate in applicazioni marittime ed in alcuni impianti chimici dove si richiedono elevati flussi e una bassa prevalenza. In Figura 5 è illustrata una *Integral Motor/Propeller (IM/P)*<sup>TM</sup>, progettata dalla *Westinghouse ElectroMechanical Division (EMD)*, l'odierna *Curtiss Wright*, precursore delle attuali pompe ad avvolgimenti prive di albero motore.

Questo tipo di pompa innovativa si compone di due strutture cilindriche concentriche, in cui l'anello più esterno è lo statore mentre quello più interno è il rotore che imprime alla pompa una elevata velocità specifica di rotazione.

Le “*spool pump*” sono interamente posizionate all'interno del *vessel* richiedendo solamente alcune piccole penetrazioni nel recipiente in pressione per l'alimentazione elettrica ed il sistema di refrigerazione degli avvolgimenti. E' stato comunque eseguito un lavoro di qualifica per un motore alettato per impieghi ad alte temperature ed uno studio sui materiali di tenuta, in previsione di eliminare del tutto le penetrazioni attraverso il *vessel*.





**Figura 5: Schema pompa Westinghouse END IM/P.**

Oltre ai vantaggi derivanti dalla sua posizione integrale, questo tipo di pompa presenta una configurazione geometrica che tende a massimizzare l'inerzia rotazionale e un'elevata capacità di portata allo spegnimento. Entrambi questi attributi tendono a mitigare le conseguenze in un ipotetico incidente di perdita di portata (LOFA).

Dal momento che la configurazione “*spool pump*” è stata impiegata per la prima volta in ambienti chimicamente aggressivi, queste pompe sono state progettate per non richiedere una periodica manutenzione, ma a causa della loro bassa prevalenza non sono mai state prese in considerazione per applicazioni nucleari. La configurazione integrale del reattore IRIS e le basse perdite di carico del circuito primario rendono però possibile un loro impiego; questo renderà IRIS il primo reattore commerciale ad avere un RCP completamente interno al *vessel*.

Tuttavia queste pompe dovranno essere testate in applicazioni nucleari con un'adeguata verifica dei sistemi di tenuta a 500°C e della resistenza strutturale alle vibrazioni indotte e al ciclaggio termico.

### 2.3.6 Pressurizzatore

Nel reattore IRIS la parte superiore del recipiente in pressione svolge la funzione di pressurizzatore, come si può vedere in Figura 6.

La soluzione adottata è simile a quella impiegata in un *loop* di un PWR tradizionale. Il suo funzionamento si basa infatti sull'equilibrio tra l'acqua alla pressione di esercizio del *vessel* ed il suo vapore in condizioni di saturazione. Tale vapore viene creato utilizzando riscaldatori elettrici a forma di anello e, mediante esso, si controlla quindi la pressione nel primario, vale a dire la pressione nel *vessel*, soprattutto durante i transitori di potenza. I riscaldatori anulari sono posizionati nella zona a forma di cappello rovesciato per mantenere in condizioni di saturazione lo strato di acqua e per poter produrre abbastanza vapore nei transitori di riduzione di pressione. Per eliminare del tutto le penetrazioni nel coperchio del *vessel*, i riscaldatori sono completamente contenuti all'interno e sono controllati tramite cablaggi elettrici.

Il pressurizzatore è progettato per mantenere il refrigerante in condizioni di sottoraffreddamento con l'aumentare dei margini di DNB ed assicurare che le pompe, collocate in prossimità, abbiano un opportuno margine alla cavitazione.

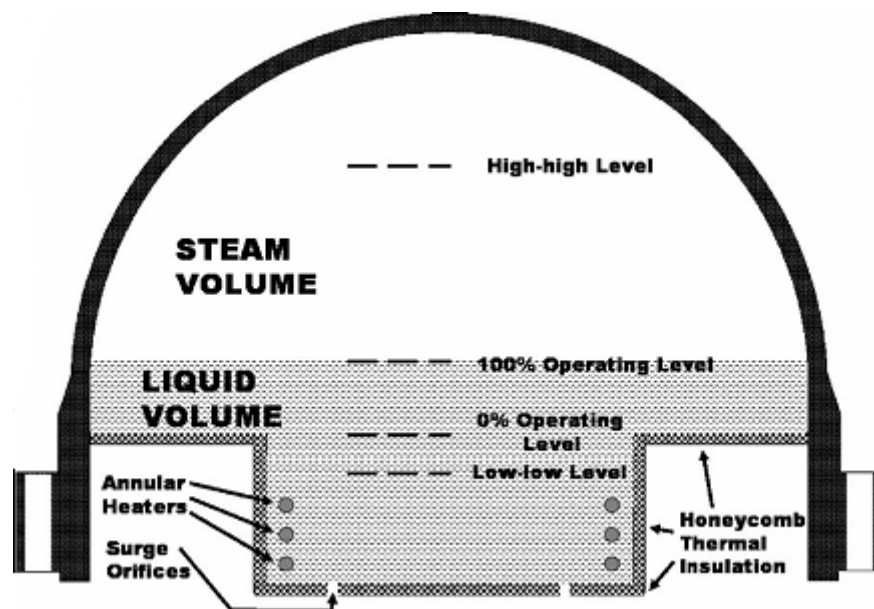


Figura 6: Schema del pressurizzatore del reattore IRIS.

L'area in cui è collocato il pressurizzatore è delineata da una struttura isolata a nido d'ape (*honeycomb thermal insulation*) con una forma tipica a cappello rovesciato che

separa la zona di ricircolo del refrigerante dall'acqua pressurizzata in condizioni di saturazione, cioè separa il refrigerante in circolo nel *vessel* dal sistema acqua-vapore in condizioni di saturazione nel pressurizzatore. In questo modo si minimizza lo scambio termico tra i due fluidi, si mantiene un adeguato livello d'acqua satura nel pressurizzatore e si ha un supporto per i riscaldatori elettrici; inoltre si impedisce che la flangia di chiusura della semisfera superiore e le guarnizioni di tenuta siano sottoposte a stress termici causati dalle differenti temperature dei due fluidi.

Tuttavia è permesso il passaggio di piccole quantità di liquido, attraverso i fori, per poter mantenere il controllo della pressione nel *vessel*.

Il parametro chiave per l'ottimizzazione di un pressurizzatore in un PWR è il rapporto tra il volume di vapore nel pressurizzatore e la potenza termica del reattore, il quale rappresenta la capacità di soppressione dei picchi di pressione durante transitori di potenza. Per IRIS questo rapporto è 3,4 volte più grande di quello di un reattore PWR convenzionale a due loop ed è oltre cinque volte più grande di quello dell'AP1000. IRIS ha un volume di vapore di circa 50 m<sup>3</sup>, circa 1,6 volte più grande del volume presente nell'AP1000 con una potenza termica tre volte inferiore. Tutto questo garantisce ampio margine e consente di non predisporre un sistema spray per l'abbattimento della sovrappressione come normalmente accade in un convenzionale PWR.

### ***2.3.7 Meccanismi d'azionamento delle barre di controllo***

La configurazione integrale del reattore IRIS è ideale per il posizionamento dei meccanismi attuatori delle barre di controllo (CRDMs) nella zona superiore al nocciolo ed interna alla corona dei generatori di vapore. Questa soluzione presenta vantaggi sia per la sicurezza che per l'esercizio. Dal punto di vista della sicurezza, l'incidente di espulsione incontrollata di una barra di controllo (Classe IV) viene eliminato dal momento che non si avrebbero i potenziali 13,789 MPa di differenza di pressione per l'espulsione di una barra. Dal punto di vista dell'esercizio, l'assenza delle penetrazioni per i tubi guida sul coperchio superiore elimina del tutto i problemi di corrosione sotto tensione dei collegamenti saldati. La progettazione e la realizzazione del coperchio superiore diventa in tal modo più semplice ed economica. Due alternative di progetto sono state ampiamente studiate e possono essere messe in

atto per il reattore IRIS: un meccanismo elettromagnetico, un meccanismo idraulico di azionamento delle barre di controllo o l'utilizzo di barre di controllo liquide.

### 2.3.8 Riflettori di neutroni

Il reattore IRIS è caratterizzato da un riflettore neutronico radiale (in Figura 7), posto nella cavità anulare tra *core* e parete del *vessel*, in acciaio inossidabile per poter ridurre i costi legati al ciclo di combustibile e prolungare la vita del reattore con una singola ricarica. Il riflettore riduce le fughe di neutroni consentendo un migliore sfruttamento dell'intero nocciolo ed un sostanziale aumento del *burnup* allo scarico. La sua presenza riduce inoltre il flusso di neutroni energetici sul *core barrel* e grazie alla presenza di uno spesso *downcomer* attenua in maniera significativa il flusso sul *vessel* del reattore. Queste caratteristiche hanno un impatto positivo sui costi (maggiore durata di vita del *vessel*, nessun programma di sorveglianza dell'infragilimento delle strutture, un più ridotto schermo biologico), sui livelli dosimetrici di esposizione degli operatori, sulla fase di smantellamento dell'impianto. Infatti il flusso di neutroni veloci risulta essere ridotto al di sotto di  $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> (contro i  $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> di un PWR tradizionale) e la dose alla superficie esterna del *vessel* risulta essere di  $10^{-4}$  Sv/h.

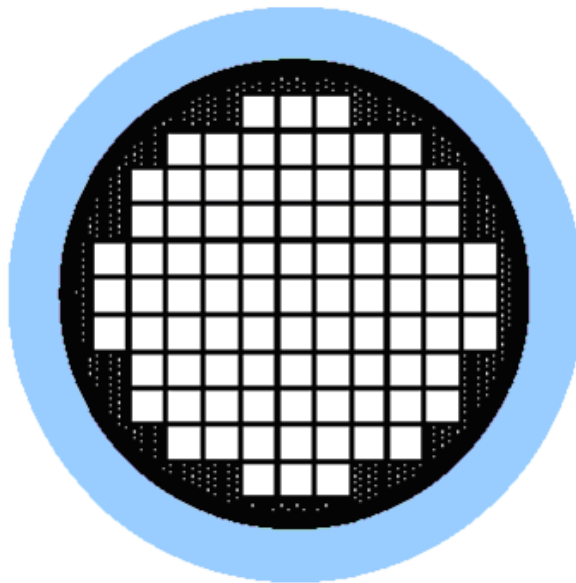


Figura 7: Schermo neutronico.

### 2.3.9 Generatori di vapore

Sono state esaminate diverse configurazioni per i generatori di vapore di IRIS (SG): tubi dritti, tubi ad U, tubi elicoidali, tubi a C, tubi a baionetta. Basandosi su considerazioni economiche dell'intero ciclo, dalla progettazione alla fabbricazione, e sulle caratteristiche di affidabilità, la scelta finale è ricaduta sui generatori di vapore a fascio tubiero elicoidale. Questa scelta di progetto è già stata messa alla prova in diversi reattori, tra i quali la più importante esperienza risulta essere quella del reattore veloce a metalli liquidi (LMFBR) *Superphenix*, ma risulta anche utile citare i dieci anni di operatività (1968-1979) della nave tedesca a propulsione nucleare (PWR integrato) Otto Hahn con i suoi generatori da 38 MW cadauno. L'esperienza di questa nave nucleare ha incoraggiato i progettisti verso lo studio di generatori di vapore dello stesso tipo con una maggiore potenze termica, 190 MW.

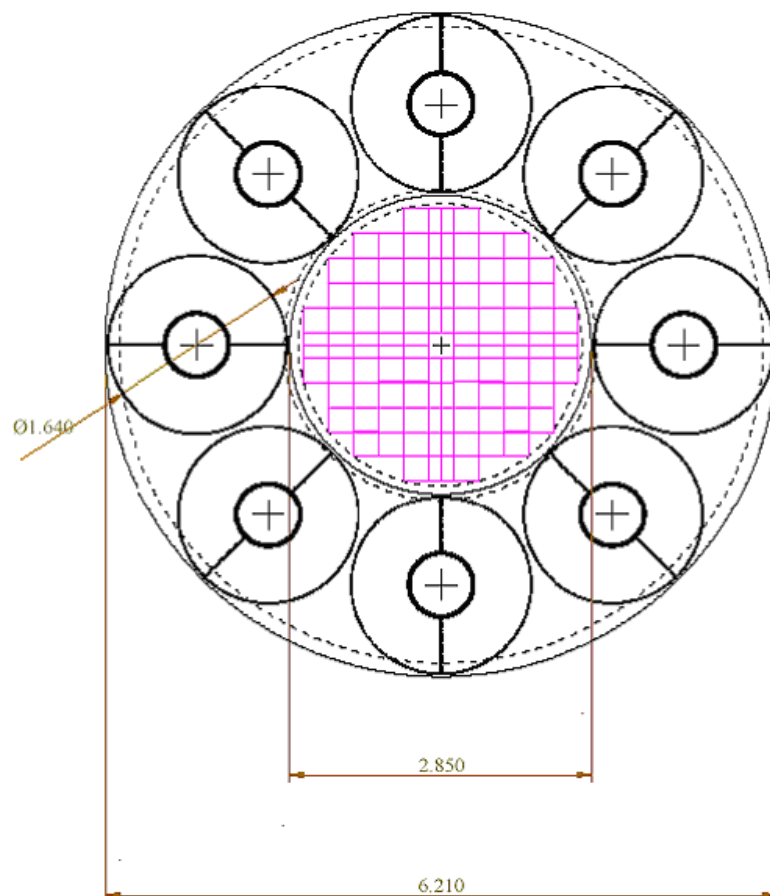


Figura 8: Vista in pianta posizione e dimensioni dei generatori di vapore.

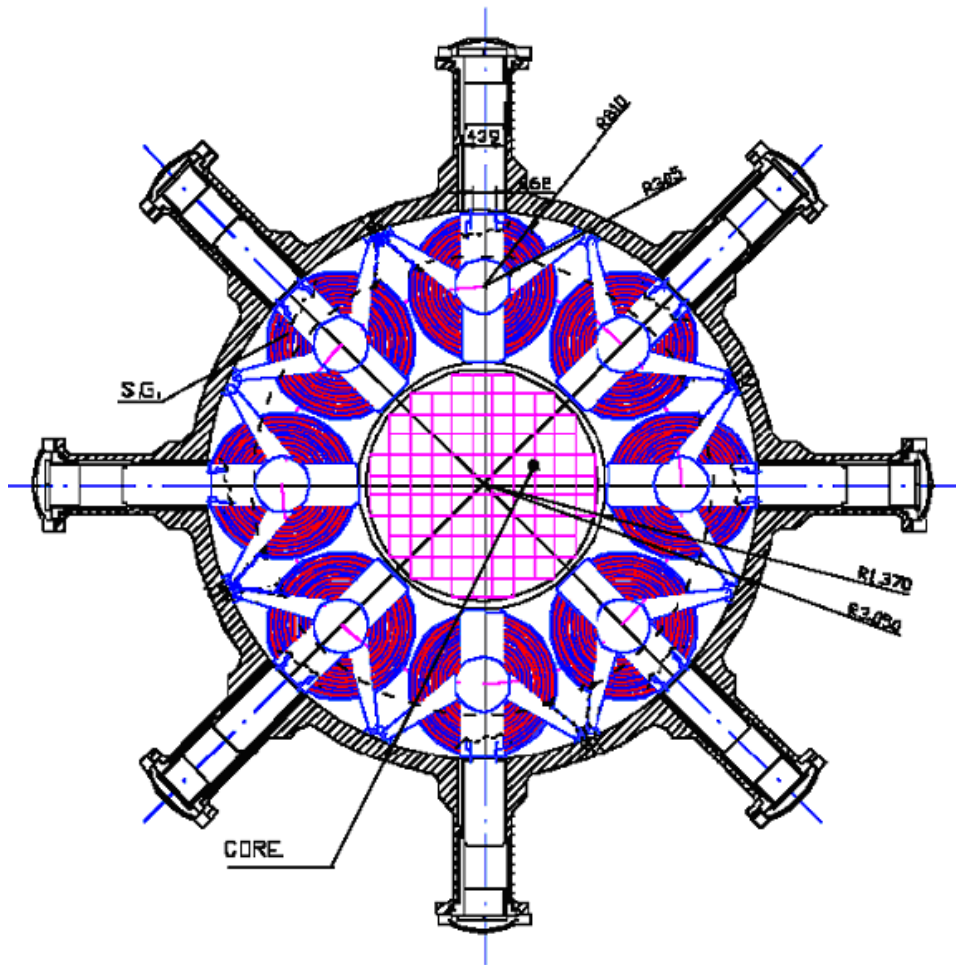


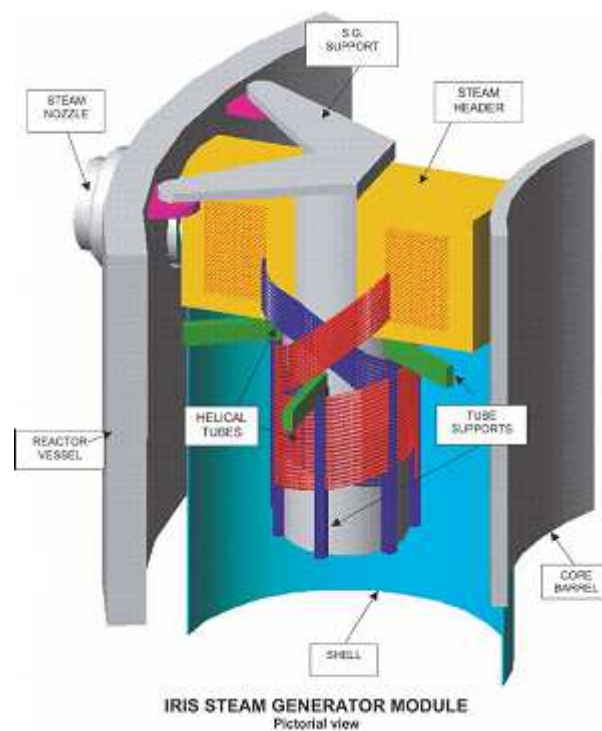
Figura 9: Vista generatori di vapore e collettori.

Il fascio a tubi elicoidali garantisce una migliore risposta alle dilatazioni termiche senza generare eccessive sollecitazioni meccaniche, presenta delle migliori prestazioni termiche seconde solo al generatore di vapore a tubi dritti (la cui scelta è stata scartata per gli alti carichi meccanici generati dalle impedito espansioni termiche durante i transitori, soprattutto forze di compressione tra il collettore di alimento e quello di uscita vapore).

Il progetto IRIS prevede l'utilizzo di otto moduli identici di generatori di vapore a fascio tubiero elicoidale, completamente separati e posizionati nello spazio anulare tra il *core barrel* (diametro esterno 2,85 m) e la parete del *vessel* (diametro interno 6,2 m), visibile in Figura 8 e Figura 9. Tale configurazione è resa necessaria dal fatto che il guasto di un singolo generatore non deve inibire le prestazioni degli altri: in condizioni di emergenza almeno quattro generatori devono essere disponibili.

L'adozione di otto generatori di vapore permette una costruzione modulare di componenti di ridotte dimensioni e di limitare la differenza di lunghezza tra le varie eliche, in tale modo è possibile adottare un singolo spezzone di tubo di lunghezza commerciale senza saldature intermedie.

I generatori di vapore sono del tipo “*once-through*”, ad attraversamento forzato, e presentano il lato secondario, acqua/vapore, all'interno dei tubi mentre il lato primario di refrigerazione del reattore è collocato all'esterno di essi.



**Figura 10: Schema modulo di un generatore di vapore del reattore IRIS**

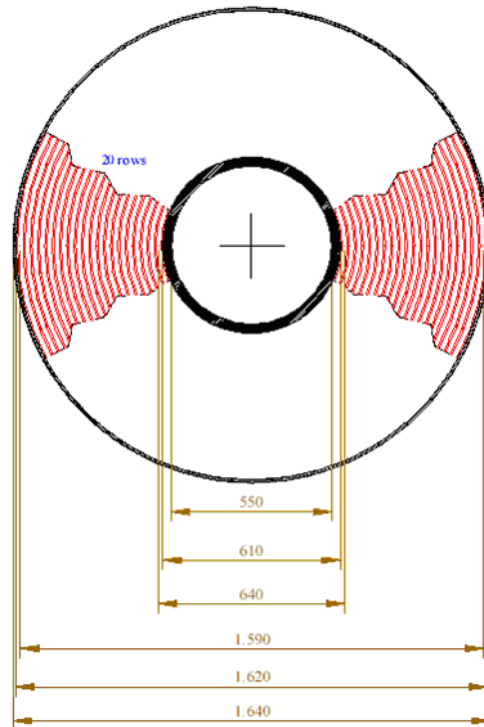
Ciascun modulo (visibile in Figura 10) è composto da una colonna centrale interna che sostiene l'intero fascio tubiero, con un collettore dell'acqua di alimento in basso e un collettore di vapore in alto connesso alla parete interna del *vessel*. Il diametro del fascio tubiero più interno è pari a 6400 mm ed i tubi elicoidali sono disposti su file radiali. I tubi sono collegati alle pareti verticali dei due collettori che fungono in tal modo da piastre tubiere e sono fabbricati con una lega al nickel-cromo-ferro, Alloy 690TT. Ciascun generatore di vapore presenta in totale 656 tubi con un diametro esterno di 17,46 mm ed uno spessore di 2,11 mm. Sia i tubi che i collettori sono progettati per resistere alla piena pressione del RCS applicata sulle superfici esterne.

Nella seguente Tabella 8e Figura 11 sono riassunti i principali parametri di progetto di un singolo modulo.

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| Diametro esterno tubazioni [mm]     | 17,46 |
| Spessore tubazioni [mm]             | 2,11  |
| Diametro interno tubazioni [mm]     | 13,24 |
| Numero di tubi                      | 21    |
| Numero di file di eliche            | 656   |
| Lunghezza media delle tubazioni [m] | 32    |
| Altezza totale generatore [m]       | 8,5   |
| Temperatura ingresso primario [°C]  | 328,3 |
| Temperatura uscita primario [°C]    | 292   |
| Temperatura acqua primario [°C]     | 223,9 |
| Temperatura vapore [°C]             | 317   |
| Pressione primario [MPa]            | 15,5  |
| Pressione secondario [MPa]          | 5,8   |
| Portata primario [kg/s]             | 589   |
| Portata secondario [kg/s]           | 62,5  |
| Potenza termica scambiata [MWt]     | 125   |

**Tabella 8: Caratteristiche generatore di vapore di IRIS riferito ad un singolo generatore.**





**Figura 11: Dimensioni modulo generatore di vapore.**

Il fluido primario lambisce i tubi elicoidali dei generatori di vapore, mentre il fluido secondario passa all'interno di essi. Poiché il fluido primario è ad alta pressione ed il secondario a bassa, i tubi dei generatori di vapore sono soggetti a sforzi di compressione e non di trazione, quindi in caso di rottura le conseguenze sono meno importanti di quelle di un PWR classico.

Durante l'esercizio del reattore l'acqua di alimento entra nel collettore inferiore del generatore di vapore (ad un'altezza superiore al livello più alto del nocciolo) attraverso un bocchettone della parete del *vessel*, percorre l'intero fascio tubiero venendo così riscaldata alla temperatura di saturazione, vaporizzata e surriscaldata a vapore secco che fluisce nel collettore superiore di scarico per essere inviato alla turbina attraverso i bocchettoni di uscita (Figura 12). Sia il collettore di ingresso (alimento) che quello di uscita (vapore) sono direttamente collegati alla parete interna del *vessel* formando in tal modo il *pressure boundary* tra primario e secondario.

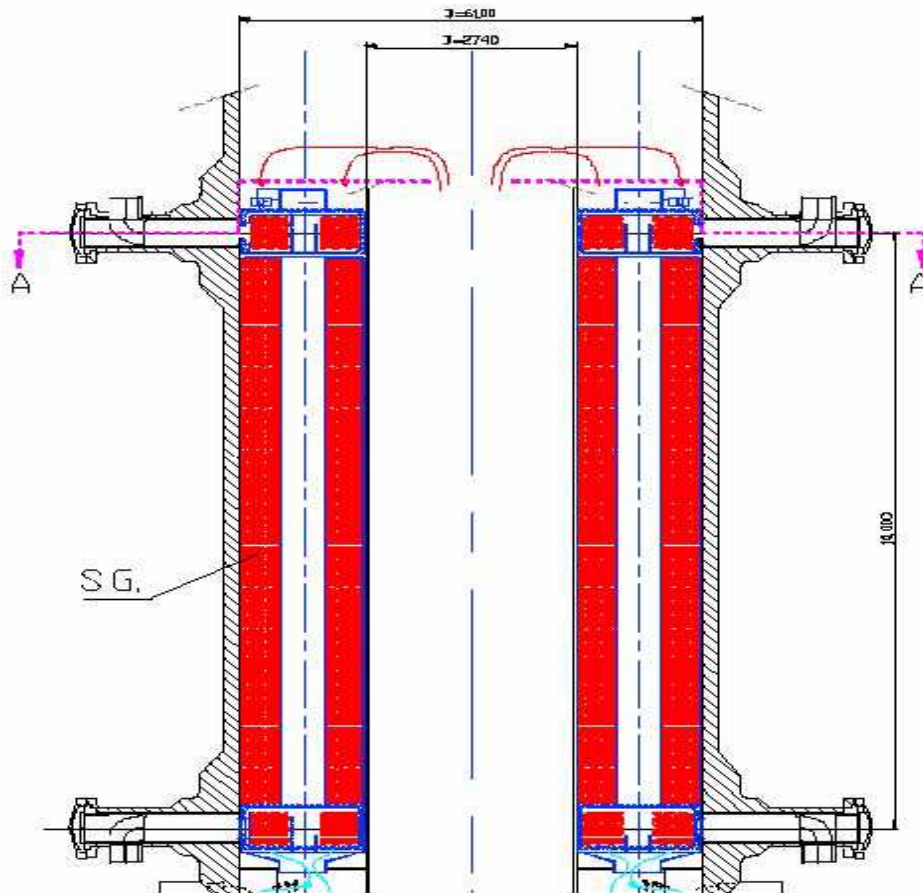


Figura 12: Collettore generatore di vapore.

L'intero fascio tubiero elicoidale è completamente contenuto all'interno di un involucro più esterno (*flow shroud*) che dirige il flusso di acqua primaria dall'alto del generatore di vapore attraverso il fascio tubiero (esternamente ai tubi) per poi pilotarlo verso la regione anulare nella parte inferiore del reattore (*downcomer*). Ciascuna delle otto pompe di alimento è collegata direttamente alla sommità di ciascun generatore in maniera tale che l'intero flusso di refrigerante venga convogliato verso la regione di scambio termico.

Un opportuno sistema di orifiziatura è previsto all'ingresso dei tubi per garantire una migliore distribuzione del flusso attraverso il fascio tubiero ed evitare fenomeni di instabilità di canali di flusso paralleli. Le cadute di pressione richieste da questi orifizi sono dello stesso ordine di quelle presenti attraverso i tubi.

### 3 Descrizione dei circuiti di prova.

Nell'ambito di questo progetto di ricerca si è voluto caratterizzare, tramite prove sperimentali, sia in deflusso monofase che bifase, tre tubi elicoidali con caratteristiche geometriche confrontabili con quelle dei condotti che costituiscono i generatori di vapore del reattore IRIS. Si sono progettati ed assemblati due distinti circuiti di prova, chiamati per semplicità A e B, presso i laboratori del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino (ex Dipartimento di Energetica).

In questo capitolo si descriveranno le sezioni di prova ed i componenti principali dei due circuiti.

#### 3.1 Sezioni di prova.

Le tre sezioni di prova, fabbricate dall'azienda ALPEAT, sono formate da un tubo in Polimetilmetacrilato (PMMA) avvolto secondo un'elica cilindrica; loro caratteristiche geometriche sono illustrate nella Tabella qui di seguito riportata:

|                                      | Elica piccola | Elica media | Elica grande |
|--------------------------------------|---------------|-------------|--------------|
| Diametro elica $D$ [m]               | 0,64          | 1           | 1,39         |
| Diametro interno del tubo $d_i$ [mm] | 12            | 12          | 12           |
| Diametro esterno del tubo $d_e$ [mm] | 18            | 18          | 18           |
| Passo [m]                            | 0,485         | 0,79        | 0,954        |
| Lunghezza totale dell'elica [m]      | 10,85         | 10          | 13,9         |
| Numero spire                         | 5             | 3           | 3            |
| Passo ridotto [m]                    | 0,0772        | 0,1257      | 0,1518       |
| Angolo dell'elica [ $^\circ$ ]       | 13,562        | 14,115      | 12,323       |

Tabella 9: Caratteristiche tubi elicoidali delle sezioni di prova.

Per un'elica cilindrica ideale di passo  $p$  e diametro della spira  $D$  si definiscono un passo ridotto  $p_r$  e un angolo dell'elica  $\alpha$  con le seguenti relazioni :



ed una lunghezza  $l$ :

$$l = \frac{\frac{D}{2} \cdot \alpha}{\cos\left(\frac{p \cdot n}{p_r}\right)}$$

Inoltre si può definire la torsione dell'elica (numero adimensionato) come:

$$\tau = \frac{\pi \cdot d \cdot p}{(p^2 + \pi^2 \cdot D^2)}$$

Le sezioni di prova sono tubi elicoidali formati da più spezzoni di tubazioni prima curvati e poi incollati tra loro in corrispondenza delle prese di pressione e di giunti appositamente costituiti.

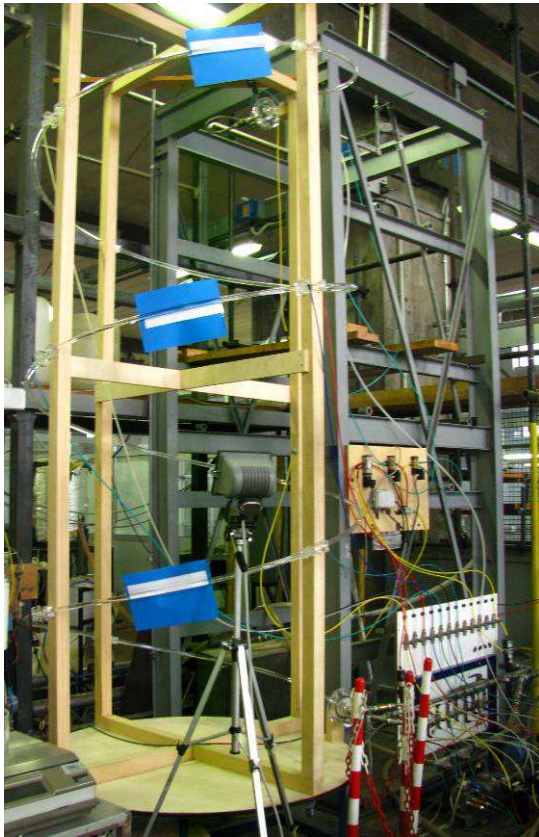
Su tali tubazioni, rappresentate in Figura 13 e Figura 14, sono collocate le prese per la misurazione della pressione, in numero diverso a seconda della dimensione della sezione di prova; ciascuna presa è dotata di quattro fori in posizioni diametralmente opposte per consentire la misurazione sia internamente che esternamente rispetto al diametro del tubo elicoidale, ma anche superiormente ed inferiormente ad esso.

Le prese di pressione sono nove per le eliche media e grande e undici per l'elica piccola; la prima presa è posta in ingresso del tubo elicoidale e l'ultima al termine dello stesso. Nonostante il diverso numero di prese le misurazioni delle cadute di pressione sono state fatte per nove differenti altezze per tutte le sezioni di prova: per le eliche media e grande si sono utilizzate tutte le prese disponibili, mentre per la piccola sono state escluse da questa campagna di prove la seconda e terza presa.

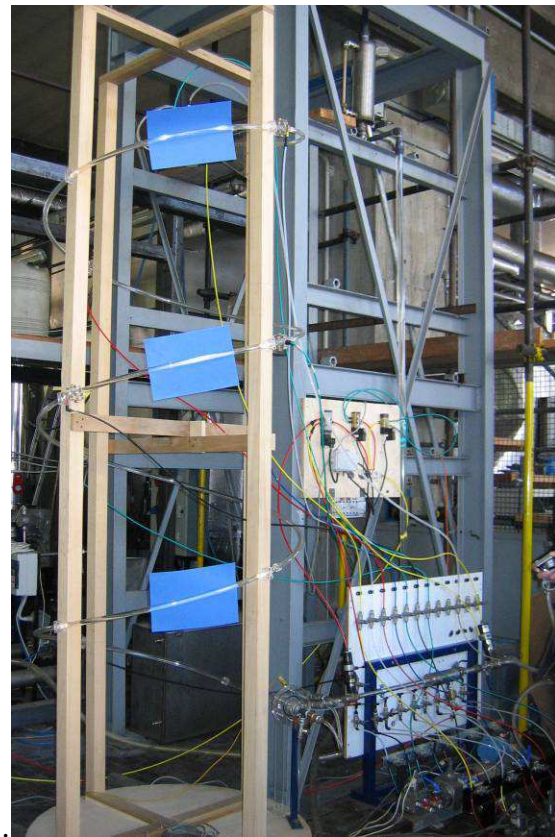
Tutte le misurazioni relative alla ricerca qui presentata sono state effettuate utilizzando le prese di pressione esterne rispetto al diametro dell'elica. Il particolare delle prese di pressione è rappresentato in Figura 17 e in Figura 18, mentre in Tabella 10 sono riportate il numero delle prese posizionate in ogni tubo elicoidale.

|   | Elica piccola | Elica media | Elica grande |
|---|---------------|-------------|--------------|
| Numero di prese di pressione            | 11            | 9           | 9            |
| Numero di prese di pressione utilizzate | 9             | 9           | 9            |

**Tabella 10: Numero di prese di pressione.**

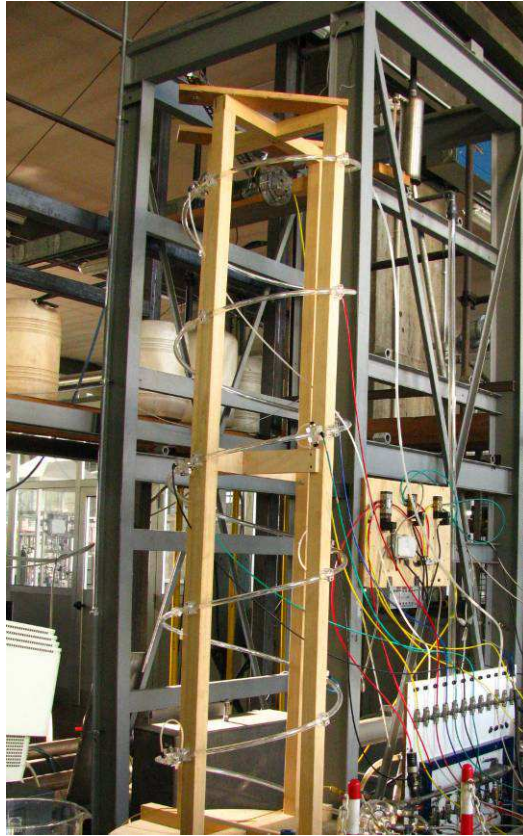


Elica grande  $D = 1,39$  m



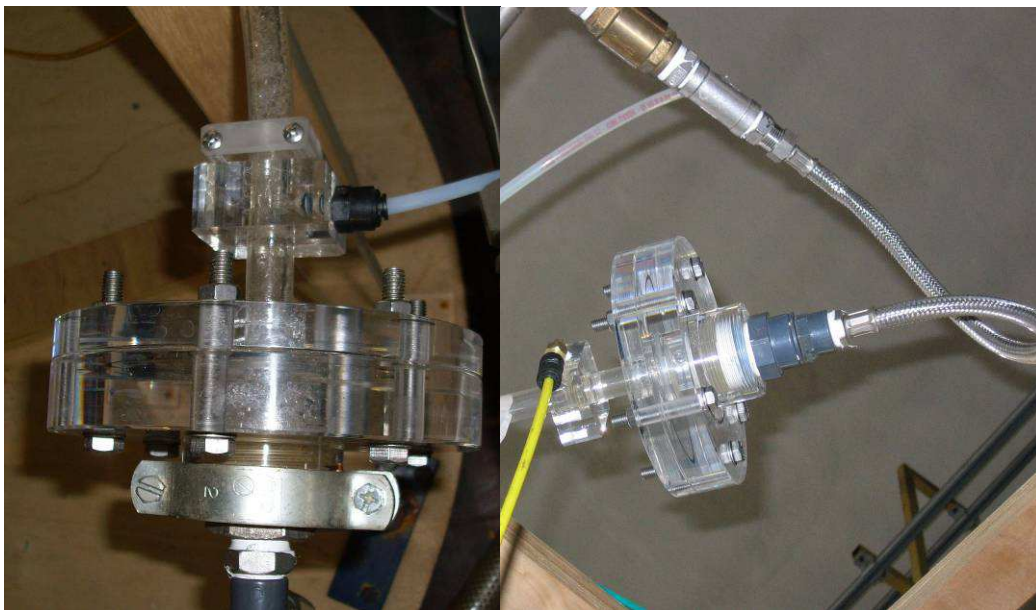
Elica media  $D = 1$  m

**Figura 13: Sezioni di prova elica grande ed elica media collegate al circuito di prova A.**



Elica piccola  $D = 0,64$  m

**Figura 14: Sezione di prova elica piccola collegata al circuito di prova A.**



Flangia inferiore e presa 1

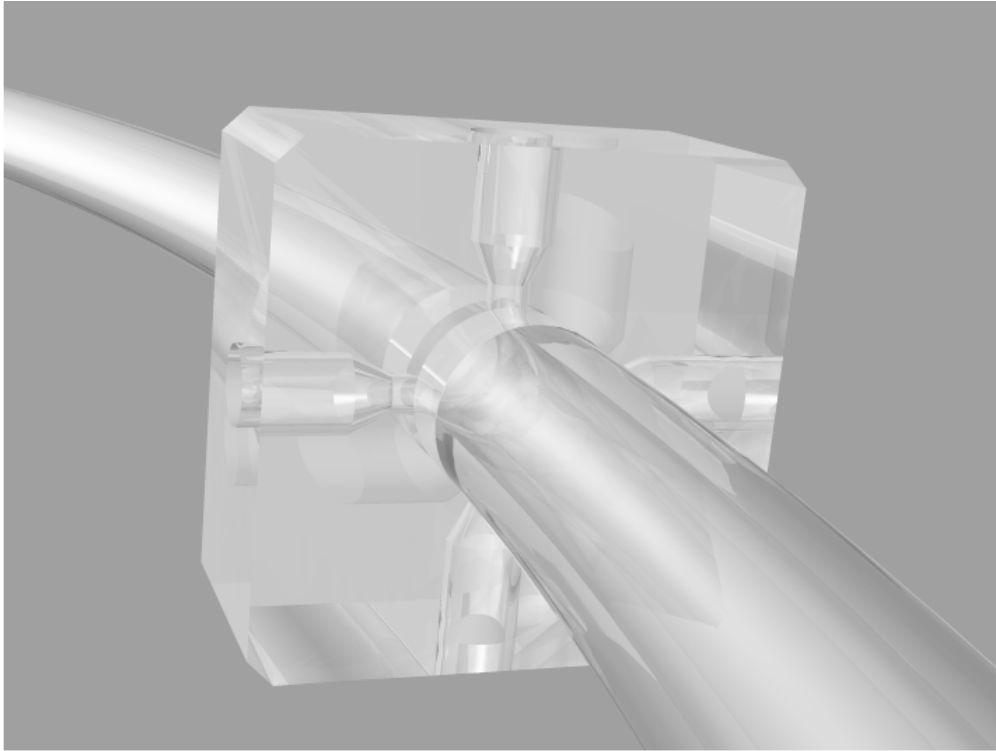
Flangia superiore e ultima presa

**Figura 15: Esempi di flange delle sezioni di prova.**

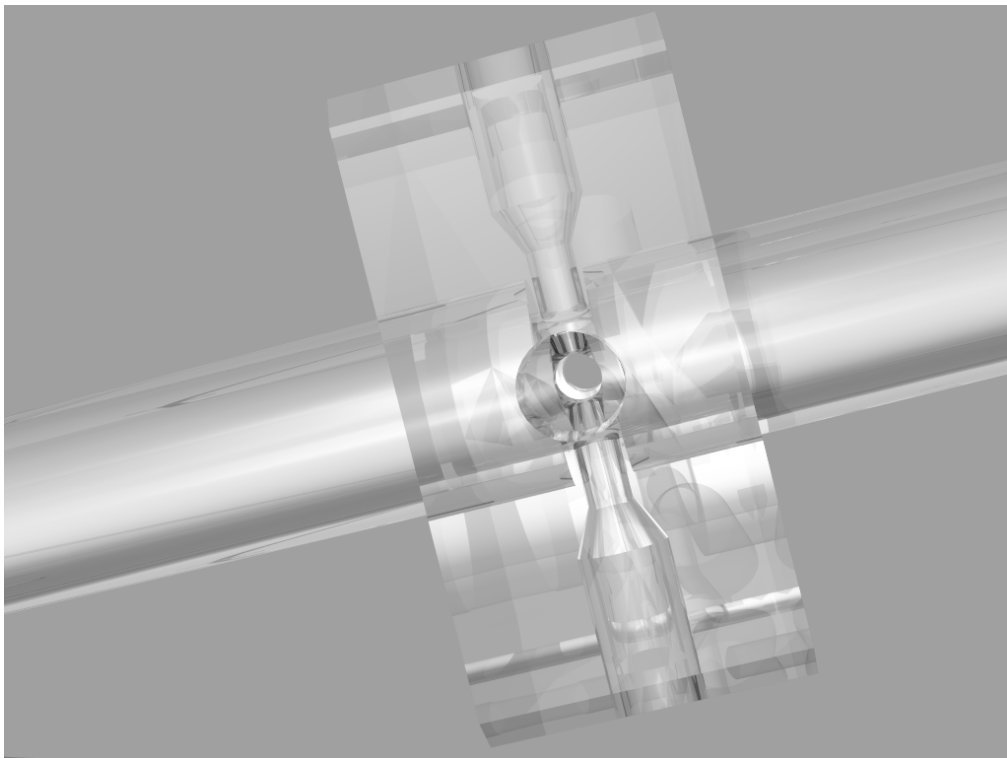


**Figura 16: Tubo elicoidale con prese di pressione e flange (rendering).**





**Figura 17: Vista frontale presa di pressione (rendering).**



**Figura 18: Vista laterale presa di pressione (rendering).**

Rispetto all'elica ideale le sezioni di prova sono caratterizzate da un tratto di tubazione diritta all'ingresso di lunghezza  $L_i$  ed inclinazione  $\beta_i$  e da un tratto di tubazione diritta all'uscita di lunghezza  $L_o$  ed inclinazione  $\beta_o$ , i cui valori sono riportati Tabella 11.

|                 | Elica piccola | Elica media | Elica grande |
|-----------------|---------------|-------------|--------------|
| $L_i$ [m]       | 0,3           | 0,3         | 0,3          |
| $L_o$ [m]       | 0,3           | 0,2         | 0,3          |
| $\beta_i$ [rad] | 0             | 0           | 0            |
| $\beta_o$ [rad] | 0             | 0           | 0            |

**Tabella 11: Lunghezze e d inclinazioni dei tratti diritti.**

Le quote e le lunghezze dei tratti delle tubazioni elicoidali considerati in questa campagna di prove sono definiti in Tabella 12. Con il numero 1 si intende la presa di pressione più prossima alla flangia d'ingresso, mentre con il numero 9 l'ultima presa prima della flangia di uscita del tubo elicoidale.

| Prese | Elica piccola             |                                | Elica media               |                                | Elica grande              |                                |
|-------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
|       | Dislivello $\Delta z$ [m] | Lunghezza tratto tubazione [m] | Dislivello $\Delta z$ [m] | Lunghezza tratto tubazione [m] | Dislivello $\Delta z$ [m] | Lunghezza tratto tubazione [m] |
| 1 – 2 | 0,98                      | 4,4                            | 0,22                      | 1,2                            | 0,48                      | 0,547                          |
| 1 – 3 | 1,096                     | 4,9                            | 1,003                     | 4,4                            | 0,95                      | 4,68                           |
| 1 – 4 | 1,225                     | 5,4                            | 1,192                     | 5,2                            | 1,19                      | 5,8                            |
| 1 – 5 | 1,342                     | 5,9                            | 1,395                     | 6                              | 1,43                      | 6,93                           |
| 1 – 6 | 1,462                     | 6,44                           | 1,594                     | 6,8                            | 1,665                     | 8,03                           |
| 1 – 7 | 1,946                     | 8,5                            | 1,789                     | 7,6                            | 1,9                       | 9,132                          |
| 1 – 8 | 2,19                      | 9,5                            | 2,185                     | 9,2                            | 2,385                     | 11,4                           |
| 1 – 9 | 2,44                      | 10,85                          | 2,385                     | 10                             | 2,854                     | 13,9                           |

**Tabella 12: Dislivelli e lunghezze tubazioni tra le prese di pressione.**

### 3.2 Circuito di prova per le singole eliche: Circuito A.

Il primo circuito di prova (Circuito A), adottato per testare le eliche singolarmente, è stato progettato, realizzato e perfezionato nell'ambito di questa ricerca.

La sua configurazione, rappresentata in Figura 19, è descritta qui di seguito.

Le flange all'ingresso e all'uscita del tubo elicoidale sono collegate al resto del circuito mediante tubi flessibili. Tra le flange ed i tubi flessibili sono poste due valvole di non ritorno per consentire una più corretta misura del grado di vuoto.

A seconda della portata d'acqua che si vuole utilizzare nella specifica prova, si può alimentare il circuito mediante due differenti pompe (P1 e P2) che aspirano acqua da una vasca a pelo libero. Le caratteristiche delle pompe sono riportate in Tabella 13.

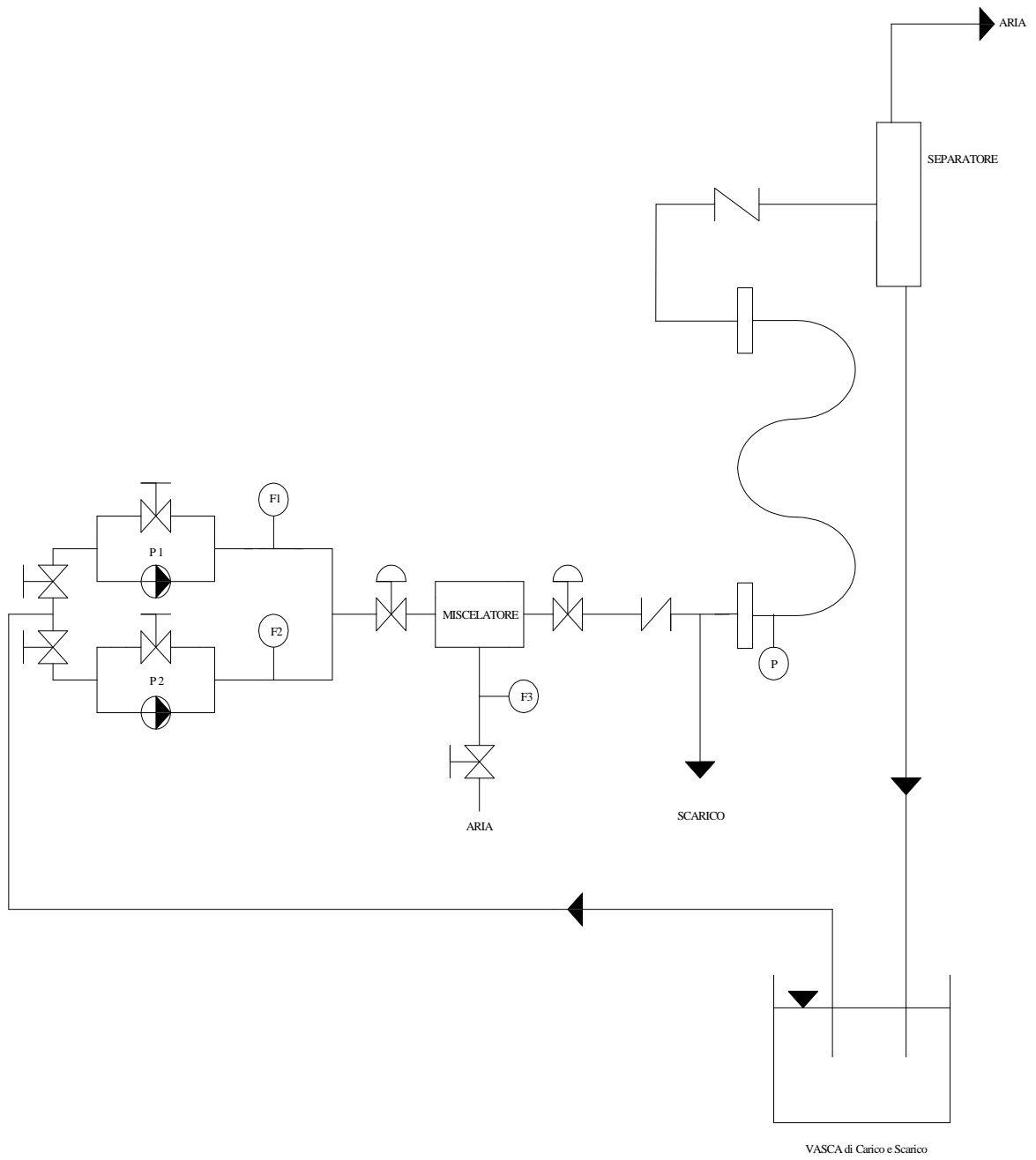
| Tipo pompa | Modello      | Potenza | Giri al minuto | Portate di utilizzo |
|------------|--------------|---------|----------------|---------------------|
| FEIT       | A110TV       | 0,75 CV | 2800           | Tra 200 e 400 [l/h] |
| CALPEDA    | NMDN 20/110A | 1 kW    | 2900           | Tra 400 e 800 [l/h] |

Tabella 13: Caratteristiche pompe di alimentazione Circuito A.

All'ingresso della sezione di prova, prima del tubo flessibile, l'acqua fluisce attraverso due valvole pneumatiche di intercettazione, utilizzate per la valutazione del grado di vuoto nelle prove in regime bifase, ed un miscelatore in bronzo poroso per miscelare aria ed acqua nelle prove di tipo bifase.

All'uscita, dopo il tubo flessibile, sono poste in serie una valvola pneumatica di intercettazione ed un separatore. L'acqua torna quindi alla vasca di raccolta da cui può essere nuovamente aspirata.

In Figura 19 sono riportati con i simboli F1, F2 ed F3 i rotometri per la misura delle portate d'aria e d'acqua e con il simbolo P il trasduttore per la pressione relativa in ingresso alla sezione di prova.



**Figura 19: Schema circuito di prova per testare le eliche singolarmente. Circuito A.**

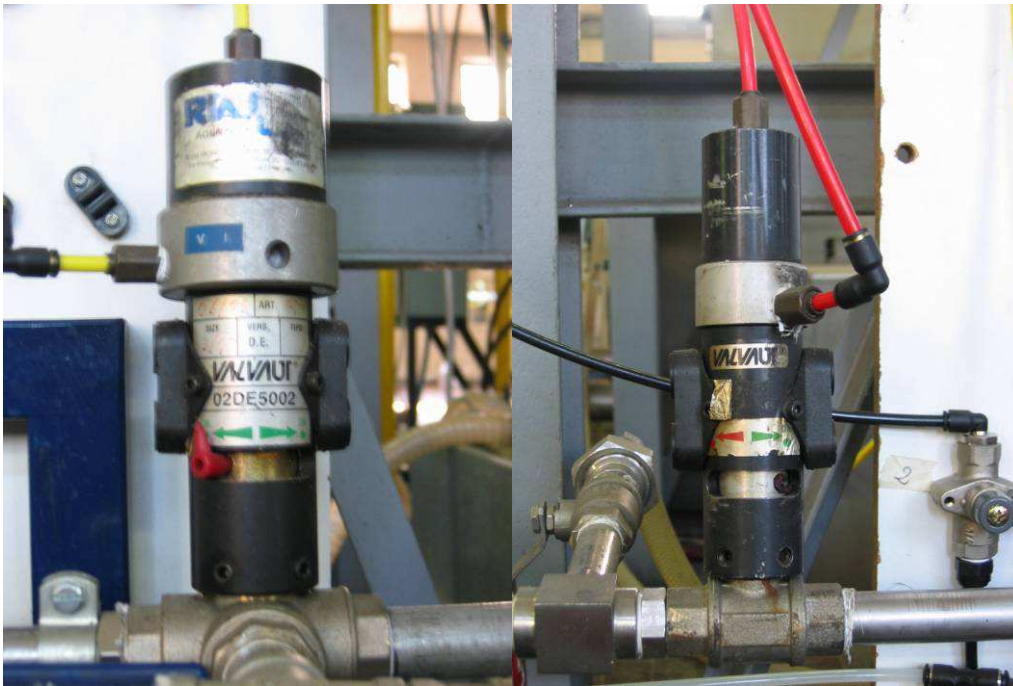


Figura 20: Valvole pneumatiche. Circuito A.

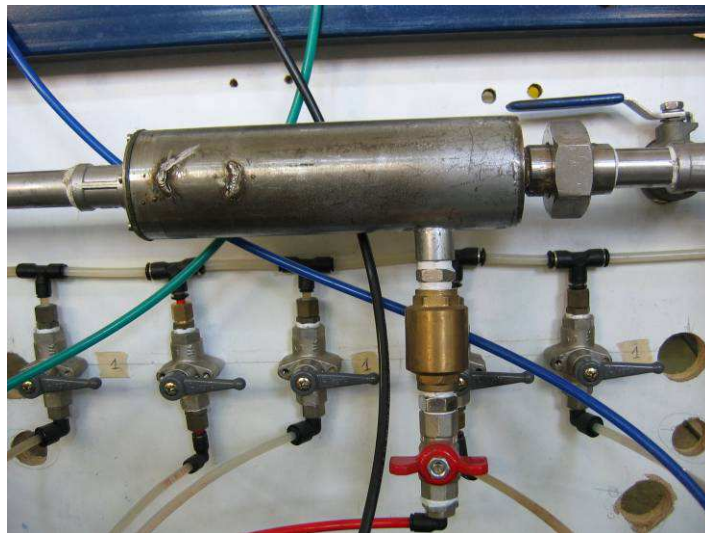
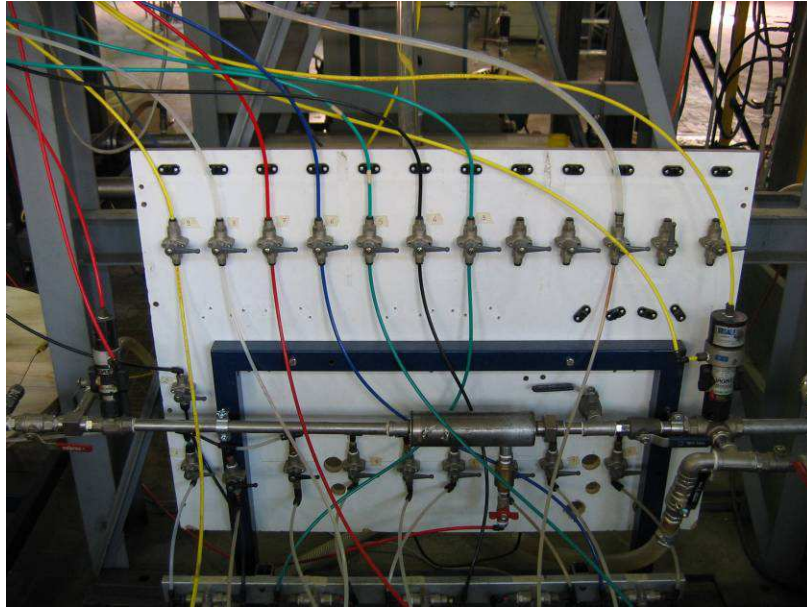
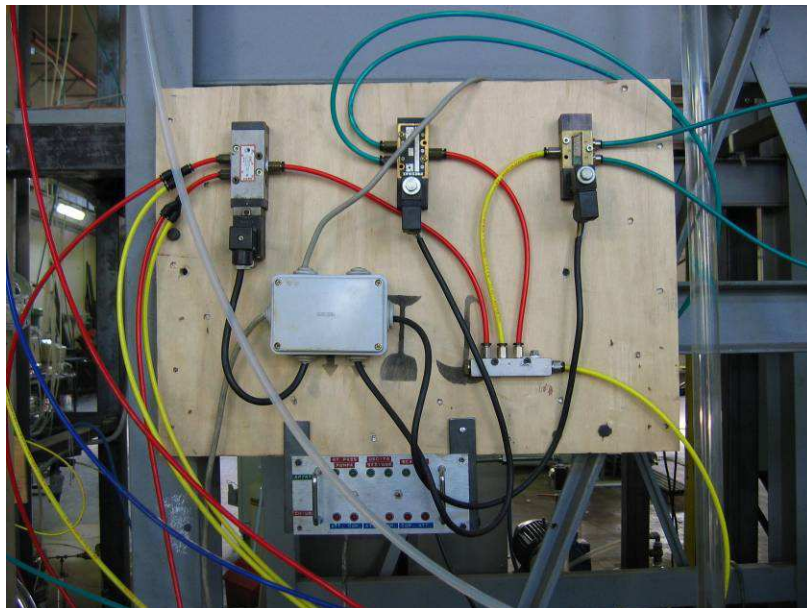


Figura 21: Miscelatore aria - acqua. Circuito A.



**Figura 22: Pannello valvole trasduttori di pressione. Circuito A.**



**Figura 23: Pannello di comando valvole pneumatiche per l'intercettazione. Circuito A.**

### 3.3 Circuito di prova per le eliche in parallelo. Circuito B.

Il circuito di prova B (Figura 24) per testare le eliche poste in una configurazione di canali in parallelo è stato, come il circuito A, progettato, realizzato e perfezionato nell'ambito di questa ricerca.

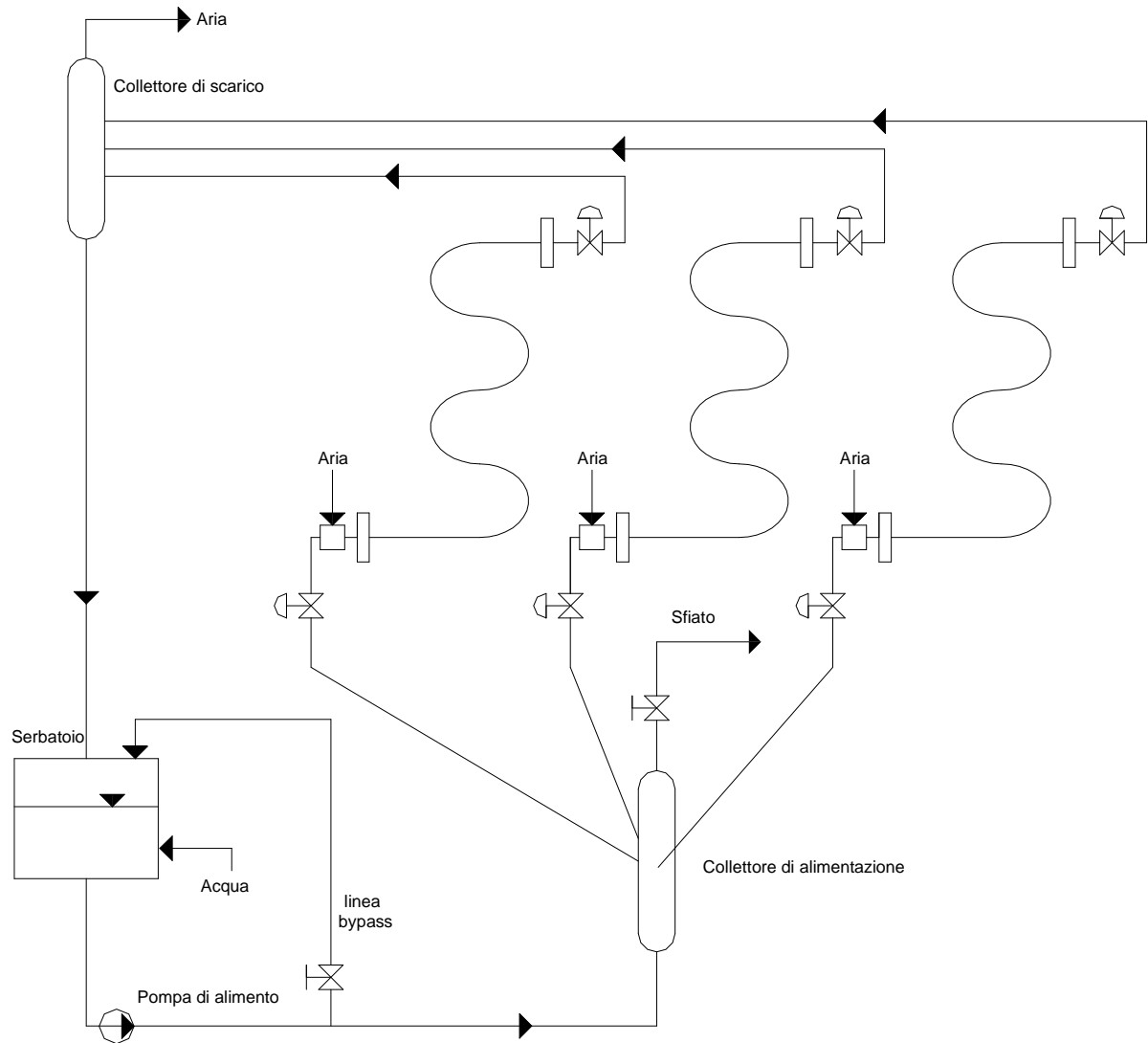


Figura 24: Schema circuito di prova per testare le eliche in parallelo. Circuito B.

Con questo loop sperimentale è possibile studiare le cadute di pressione, i *flow pattern* e le instabilità della portata per deflussi bifase in canali in parallelo.

Il circuito è alimentato mediante una pompa centrifuga che aspira acqua da una vasca a pelo libero; a questa stessa vasca di raccolta giungono le tubazioni di scarico dalle eliche.

Le caratteristiche della pompa utilizzata (Figura 25), alimentata tramite inverter, sono riportate in Tabella 14.



**Figura 25: Pompa di alimentazione ed inverter. Circuito B.**

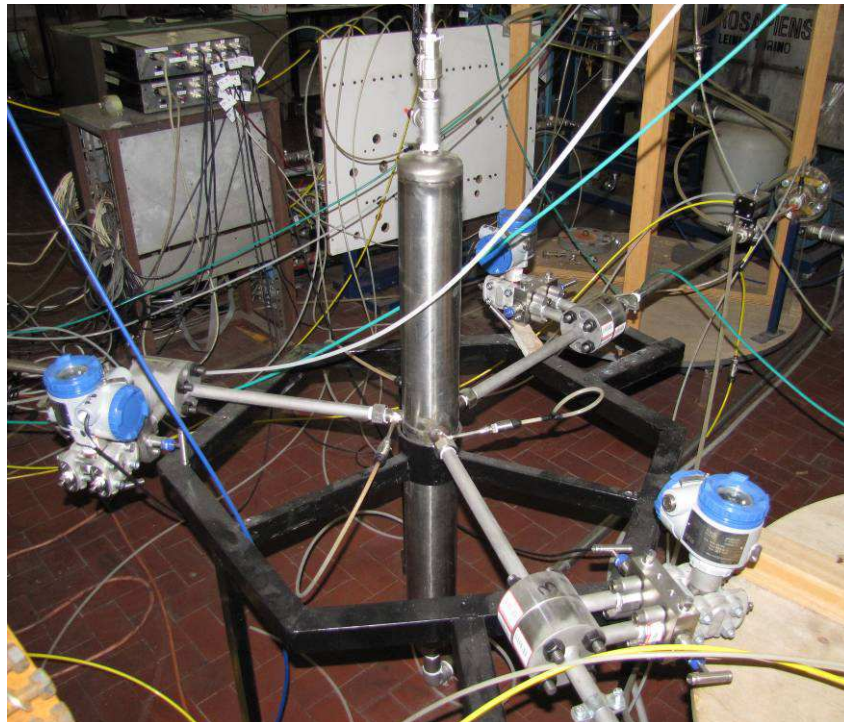


| Tipo pompa | Modello | Potenza | Giri/minuto | Tensione  | Corrente | Frequenza utilizzata |
|------------|---------|---------|-------------|-----------|----------|----------------------|
| 10/2D B    | DIN     | 12,5 CV | 2800        | 220/380 V | 31/18 A  | 40 Hz                |

**Tabella 14: Caratteristiche pompa di alimentazione. Circuito B.**

Per regolare la portata d'acqua sono stati inseriti dopo la pompa un sistema di bypass che riduce l'afflusso di acqua al circuito di prova e una valvola manuale per una regolazione più 'fine'.

Dopo la pompa e il relativo sistema di regolazione della portata, si ha un collettore cilindrico con sviluppo verticale (Figura 26 e Tabella 15), dal quale partono i rami di tubazione che alimentano le tre sezioni di prova.

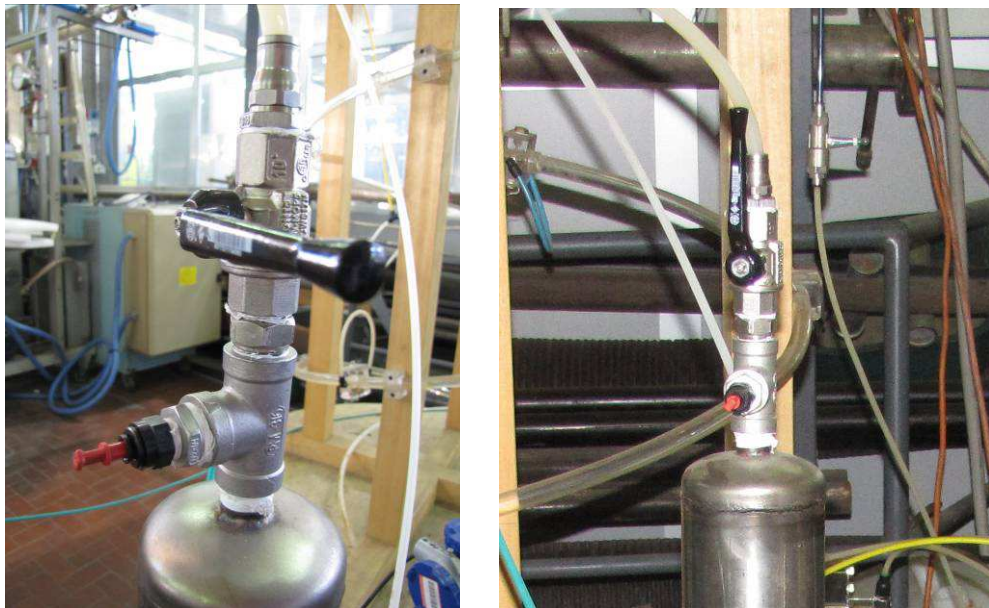


**Figura 26: Collettore e rami di alimentazione delle sezioni di prova. Circuito B.**

| Diametro collettori [cm] | Altezza collettori [cm] | Altezza collegamenti alle eliche [cm] | Diametro rami collegamento alle eliche [mm] | Angolo tra i rami collegati alle eliche |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---|---|
| 9                        | 84                      | 43                                    | 14  | 120°                                    |

**Tabella 15: Caratteristiche collettore di alimentazione e collettore di scarico. Circuito B.**

Sulla testa del collettore è posta una valvola manuale di sfiato ed una tubazione che porta fluido, di sfiato, alla vasca di alimentazione/scarico (Figura 27); mantenendo chiusa la suddetta valvola si minimizzano gli effetti di eventuali vortici all'interno del collettore.



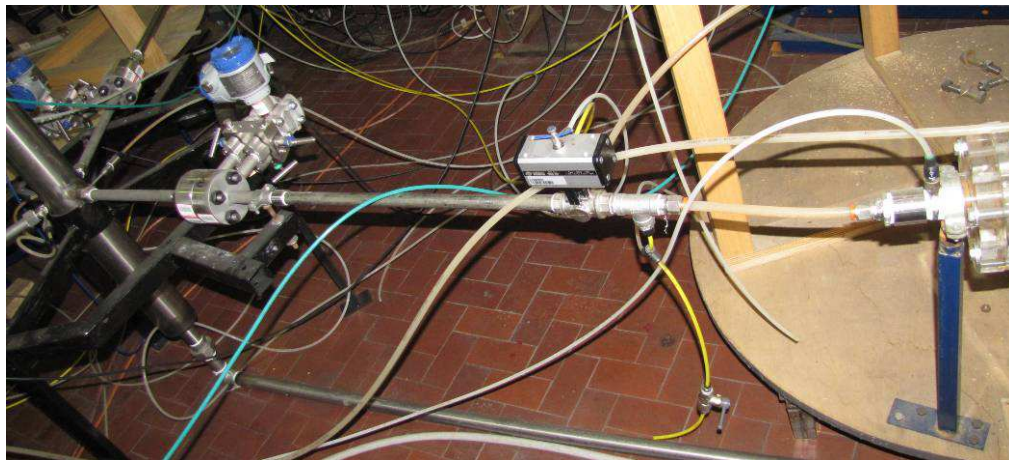
**Figura 27: Valvola manuale di sfiato del collettore di alimentazione. Circuito B.**

I rami di alimentazione delle tre eliche sono posti, come si vede nelle figure precedenti, a 120° l'uno dall'altro in modo simmetrico e si trovano a metà dell'altezza del collettore cilindrico; in Tabella 16 sono descritte le caratteristiche.

| Ramo | Diametro tubo [mm] | Lunghezza ramo acciaio [cm] | Lunghezza ramo rilsan [cm] | Sezione di prova collegata |
|------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1    | 14                 | 124                         | 20                         | elica D = 1,39 m           |
| 2    | 14                 | 124                         | 20                         | elica D = 1 m              |
| 3    | 14                 | 124                         | 20                         | elica D = 0,64 m           |

**Tabella 16: Caratteristiche rami di alimentazione dal collettore alle eliche. Circuito B.**

Ogni ramo orizzontale che collega il collettore cilindrico alla sezione di prova è dotato di misuratore di portata d'acqua e di prese per la rilevazione delle cadute di pressione.



**Figura 28: Esempio di ramo di alimentazione. Circuito B.**

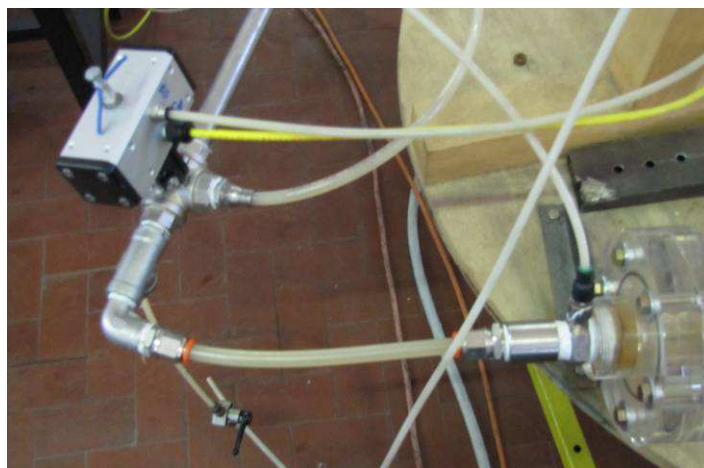
Tra le flange di ingresso delle eliche e i rami di alimento si hanno dei tubi incurvati in materiale plastico che sono collegati alle sezioni di prova; in Figura 29 si nota come il collegamento tra i rami e le sezioni di prova abbia angolazioni molto diverse: questo nasce dall'esigenza di contenere gli spazi essendo l'intero circuito di prova estremamente voluminoso all'interno del laboratorio.



Elica grande  $D = 1,39$  m



Elica media  $D = 1$  m

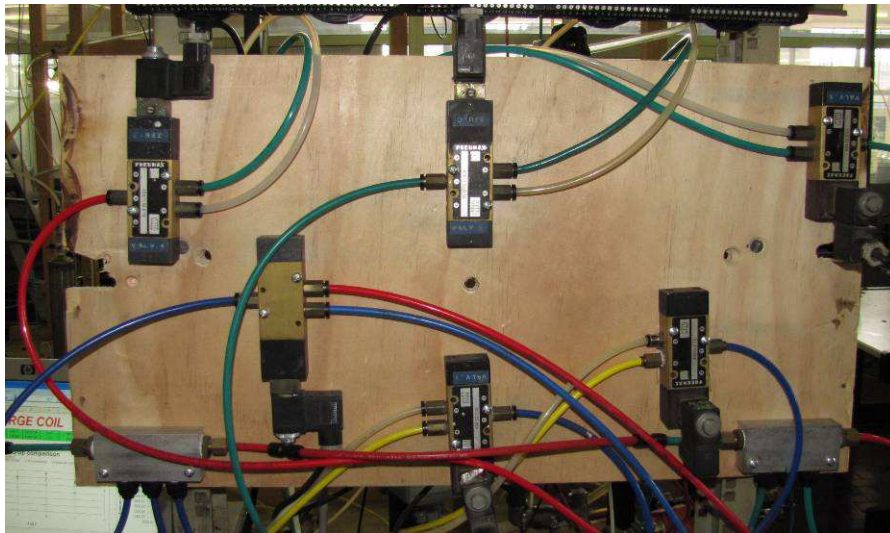


Elica piccola  $D = 0,64$  m

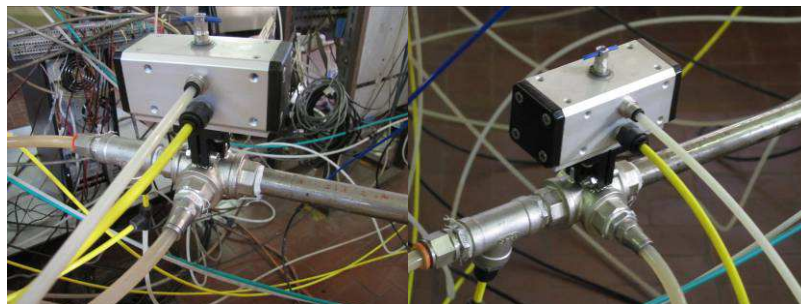
**Figura 29: Prese ingresso aria, flange ingresso eliche e presa di pressione n°1. Circuito B.**

Prima dell'ingresso alle sezioni di prova e all'uscita da esse si sono poste le valvole pneumatiche a chiusura rapida e contemporanea per l'intercettazione della miscela all'interno delle eliche per consentire la valutazione del grado di vuoto.

In Figura 30 è rappresentato il sistema di comando delle sei valvole pneumatiche.

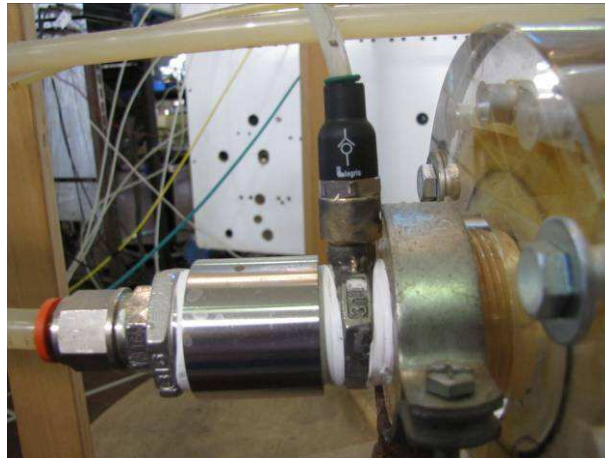


**Figura 30: Pannello di comando valvole pneumatiche per l'intercettazione. Circuito B.**



**Figura 31: Valvole pneumatiche in ingresso alle sezioni di prova. Circuito B.**

L'aria utilizzata per le prove in regime bifase, viene iniettata direttamente in questi condotti mediante un beccuccio come si può vedere in Figura 32.



**Figura 32: Beccuccio ingresso aria nella sezione di prova. Circuito B.**

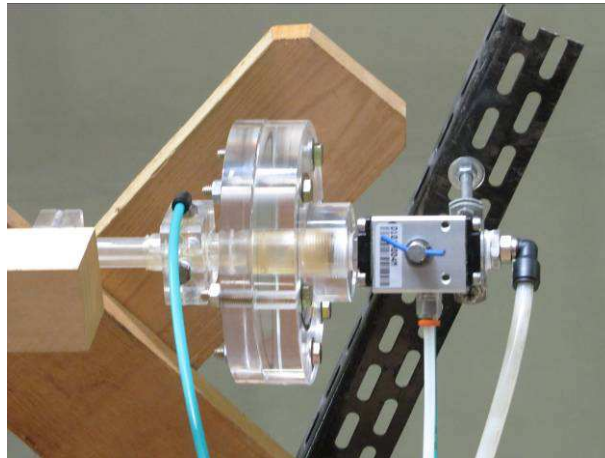


**Figura 33: Collettore di scarico delle sezioni di prova. Circuito B.**

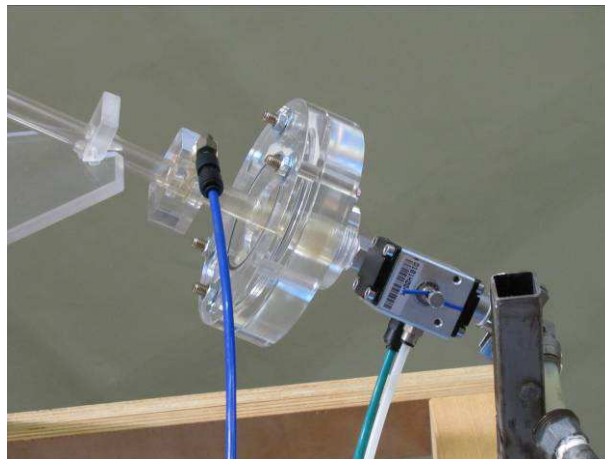
La sorgente di aria utilizzata deriva dalla rete di aria compressa del Politecnico di Torino. La lunghezza di miscelazione è breve e non influisce sull'analisi dei canali in parallelo.

Dopo le tre sezioni di prova e la valvola di intercettazione rapida, delle tubazioni, le cui caratteristiche geometriche sono riportate in Tabella 17, portano la miscela di acqua ed aria ad un collettore di scarico (Figura 33 e Tabella 15); da qui le fasi si

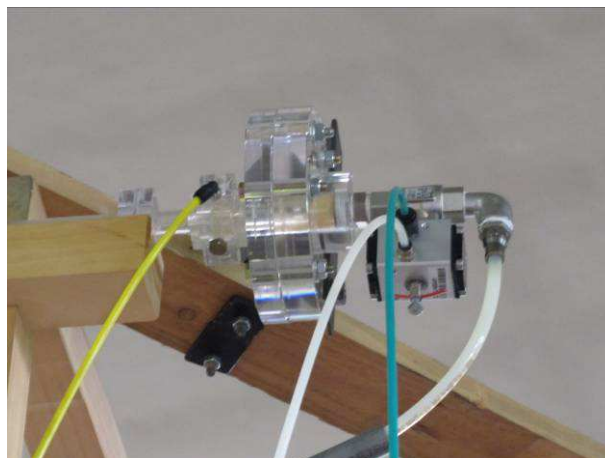
separano e, mentre l'aria viene liberata nell'ambiente, l'acqua viene inviata alla vasca di alimentazione.



Elica D = 0,64 m



Elica D = 1 m



Elica D = 1,39 m

**Figura 34: Flange uscita eliche, valvole pneumatiche uscita dalla sezioni di prova e scarico. Circuito B.**

| Ramo | Diametro tubo [mm] | Lunghezza tubazione [m] | Sezione di prova collegata |
|------|--------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1    | 14                 | 5,52                    | elica D = 1,39 m           |
| 2    | 14                 | 0,71                    | elica D = 1 m              |
| 3    | 14                 | 2,82                    | elica D = 0,64 m           |

**Tabella 17: Caratteristiche tubazioni dalle eliche al collettore di scarico. Circuito B.**

In Figura 35 è mostrata una vista delle tre sezioni di prova collegate al circuito B.



**Figura 35: Vista complessiva sezioni di prova e circuito B.**



## 4 Strumentazione di misura.

Nell'ambito di questa ricerca, come già detto precedentemente, si sono progettati e realizzati due distinti circuiti di prova con relativa configurazione di strumenti per le misurazioni da effettuare.

Si riportano in questo capitolo le grandezze misurate ed i relativi strumenti di misura.

### 4.1 Strumentazione di misura del circuito per eliche singole (A).

In questa campagna di prove sono state misurate:

- le portate di acqua e di aria,
- le differenze di pressione tra la prima presa e le successive otto,
- la pressione relativa dell'aria,
- la pressione relativa in ingresso alla sezione di prova,
- temperatura e pressione ambientali,
- il grado di vuoto, mediante il metodo della pesata.

Per la misura delle differenze di pressione ( $\Delta p$ ) tra la presa iniziale (presa 1) e le successive si sono utilizzati otto trasduttori *Statham* con fondo scala differente ed uscita in tensione, scelti in base alle cadute di pressione da misurare; ciascun trasduttore è stato verificato.

Le caratteristiche dei trasduttori utilizzati sono riportate in Tabella 18.

| Tipo           | N° di serie |         | Line pressature rating | Range [psid] | Differenza di pressione misurata |
|----------------|-------------|---------|------------------------|--------------|----------------------------------|
| <i>Statham</i> | 516         | PM814   | 2000 psig              | ±1.1         | $\Delta p(1,2)$                  |
| <i>Statham</i> | 306         | PM743   | 3000 psig              | ±2.5         | $\Delta p(1,3)$                  |
| <i>Statham</i> | 255         | PM743   | 5000 psig              | ±5           | $\Delta p(1,4)$                  |
| <i>Statham</i> | 308         | PM743TC | 3000 psig              | ±10          | $\Delta p(1,5)$                  |
| <i>Statham</i> | 515         | PM8142  | 2000 psig              | ±7.2         | $\Delta p(1,6)$                  |
| <i>Statham</i> | 1277        | PM8142  | 5000 psig              | ±7.2         | $\Delta p(1,7)$                  |
| <i>Statham</i> | 932         | PM8142  | 5000 psig              | ±14.4        | $\Delta p(1,8)$                  |
| <i>Statham</i> | 1175        | PM8142  | 5000 psig              | ±14.4        | $\Delta p(1,9)$                  |

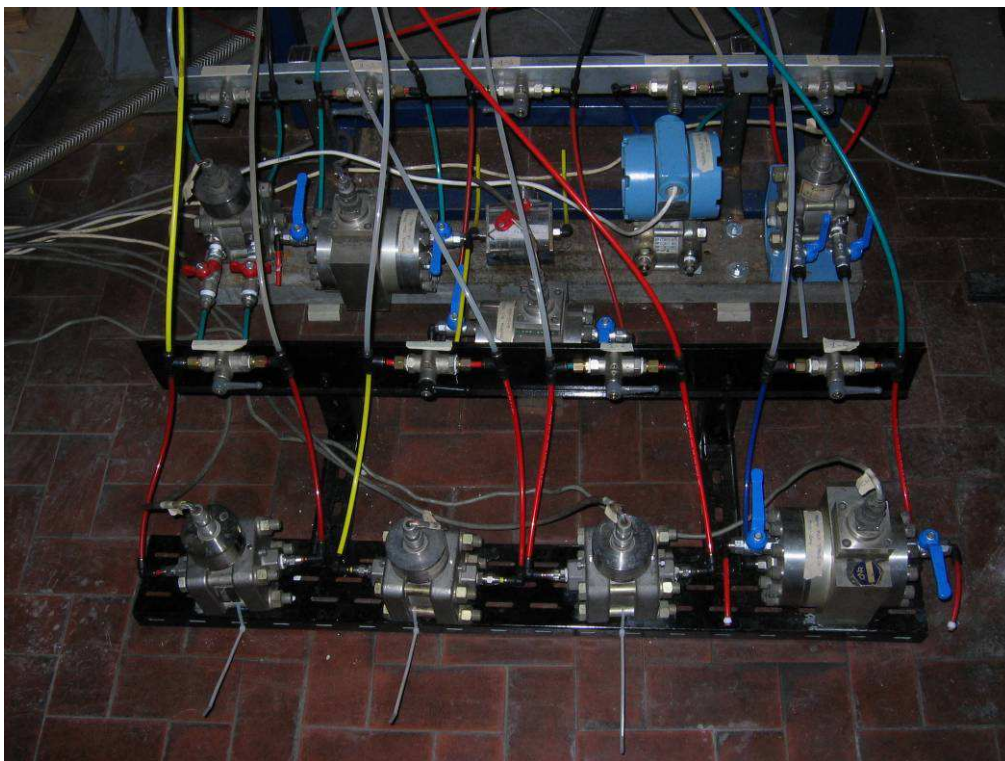
Tabella 18: Caratteristiche trasduttori di pressione *Statham*. Circuito A.

Sono state misurate la pressione relativa dell'aria e la pressione relativa dell'acqua mediante due trasduttori *Rosemount Alphaline*, con uscita in corrente (4 – 20 mA), le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 19.

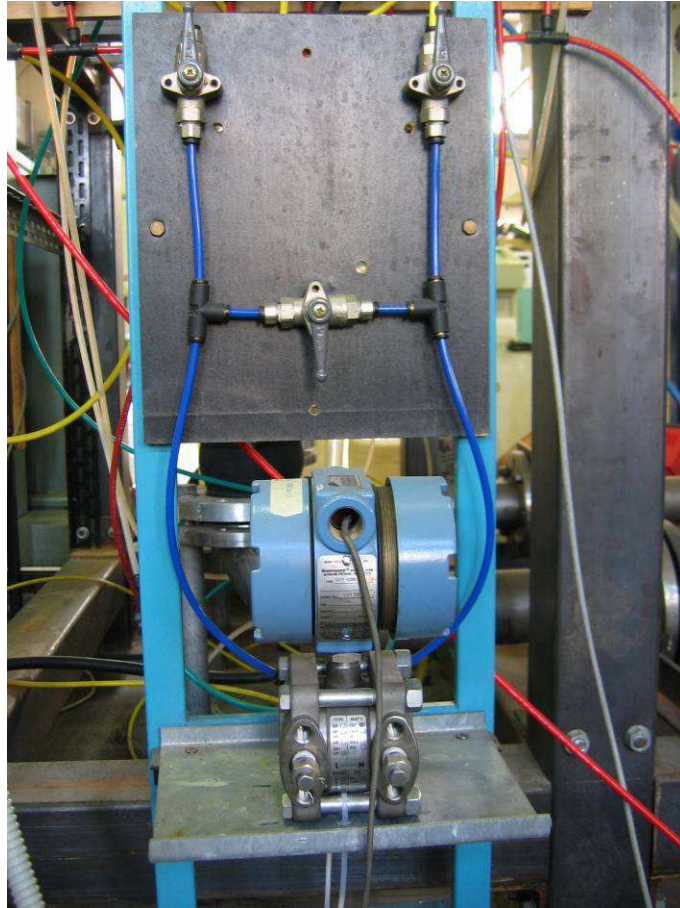
| Tipo                       | Modello    | N° di serie | Range [bar] | Max allowable pressare [bar] | Pressione misurata |
|----------------------------|------------|-------------|-------------|------------------------------|--------------------|
| <i>Rosemount alphaline</i> | 1151DP7E22 | 9212616     | 0 – 15      | 140                          | pressione aria     |
| <i>Rosemount alphaline</i> | 1151DP7E12 | 8502348     | 0 – 7       | 140                          | pressione acqua    |

**Tabella 19: Caratteristiche trasduttori di pressione *Rosemount Alphaline*. Circuito A.**

In Figura 36 e Figura 37 vengono mostrati i trasduttori utilizzati in questa campagna sperimentale.



**Figura 36: Trasduttori di pressione collegati alla sezione di prova. Circuito A.**



**Figura 37:**Trasduttore di pressione per la misura della pressione dell'aria. Circuito A.

Per la misura della portata di aria si è fatto uso di tre rotametri ASA (Figura 38) con intervalli di portata e caratteristiche riportate in Tabella 20.

| Tipo      | Matricola | Fluido | Portata [nl/h] | Pressione [mbar] | T [°C] |
|-----------|-----------|--------|----------------|------------------|--------|
| N5 2600 B | 30850     | aria   | 5000           | 1031             | 20     |
| N5 2400 B | 22755     | aria   | 1000           | 760              | 20     |
| N5 2300 B | 15009     | aria   | 340            | 760              | 20     |

**Tabella 20:** Caratteristiche asometri. Circuito A.



**Figura 38: Asametri per la misura della portata di aria. Circuito A.**

Per la misura di portate d'acqua minori di 400 [l/h] si è utilizzato un rotametro ASA (Figura 39) con intervallo di misurazione 50 – 400 [l/h] per acqua a 20 °C e uscita in corrente (rotametro 1); per portate maggiori di 400 [l/h] si è invece utilizzato rotametro ASA (Figura 40) con fondo scala di 1000 [l/h] (rotametro 2).

La temperatura e la pressione ambiente sono state rilevate tramite una centralina per la misura dei parametri ambientali.

La raccolta dei dati è stata effettuata mediante un acquisitore multicanale HP 3497A e software scritto in NI LabVIEW.



Figura 39: Rotametro 1 per la misura della portata di acqua. Circuito A.



Figura 40: Rotametro 2 per la misura della portata di acqua. Circuito A.

## 4.2 Strumentazione di misura del circuito per eliche in parallelo (B).

In questa campagna di prove sono state misurate:

- la portate di acqua totale,
- le portate di acqua nei tre rami,
- le portate di aria,
- le cadute di pressione tra la prima presa e l'ultima per le tre sezioni di prova,
- le cadute di pressione sui tre rami di ingresso,
- le cadute di pressione sui tre rami di scarico,
- la pressione media nelle tre sezioni di prova,
- temperatura e pressione ambientali,
- il grado di vuoto, mediante il metodo della pesata.

Per la misura delle differenze di pressione ( $\Delta p$ ) tra la prima presa e l'ultima delle tre sezioni di prova sono stati utilizzati tre trasduttori *Statham*, già verificati nel caso per la campagna di prove con il circuito A.

Nella tabella successiva sono riportati le caratteristiche dei trasduttori utilizzati e le differenze di pressione misurate.

| Tipo           | N° di serie |        | Line<br>pressature<br>rating | Range<br>[psid] | $\Delta p$ misurata      |
|----------------|-------------|--------|------------------------------|-----------------|--------------------------|
| <i>Statham</i> | 1277        | PM8142 | 5000 psig                    | $\pm 7,2$       | $\Delta p$ elica piccola |
| <i>Statham</i> | 932         | PM8142 | 5000 psig                    | $\pm 14,4$      | $\Delta p$ elica media   |
| <i>Statham</i> | 1175        | PM8142 | 5000 psig                    | $\pm 14,4$      | $\Delta p$ elica grande  |

**Tabella 21: Caratteristiche trasduttori di pressione *Statham*. Circuito B.**

Per la misura della portata di aria si sono impiegati, oltre che gli asometri già utilizzati per il circuito A (Figura 38 e Tabella 20), tre asometri ASA (Figura 41) con intervalli di portata e caratteristiche riportate in Tabella 22 e in Tabella 23.

Questi strumenti sono stati impiegati in modo differente, singolarmente o più di uno in contemporanea, a seconda del tipo di prova sperimentale effettuata.

| Tipo       | Range portata<br>[nm <sup>3</sup> /h] | Temperatura valutazione<br>[°C] | Pressione valutazione<br>[mbar] | Densità valutazione<br>[kg/nm <sup>3</sup> ] |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| COF 002068 | 0,077 – 0,77                          | 20                              | 1031                            | 1,205  |
| COF 002069 | 0,31 – 3,1                            | 20                              | 1031                            | 1,205  |

**Tabella 22: Caratteristiche asimetri elettronici. Circuito B.**

| Tipo      | Matricola | Portata<br>[nl/h] | Temperatura valutazione<br>[°C] | Pressione valutazione<br>[mmH <sub>2</sub> O] |
|-----------|-----------|-------------------|---------------------------------|---|
| N5 2600 B | 20974     | 5000              | 20                              | 1031  |

**Tabella 23: Caratteristiche asometro a galleggiante. Circuito B.**



**Figura 41: Asimetri elettronici per la misura delle portate di aria. Circuito B.**

La portata d'acqua totale è stata misurata utilizzando un rotametro (Figura 42) posto a valle della pompa le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 24.



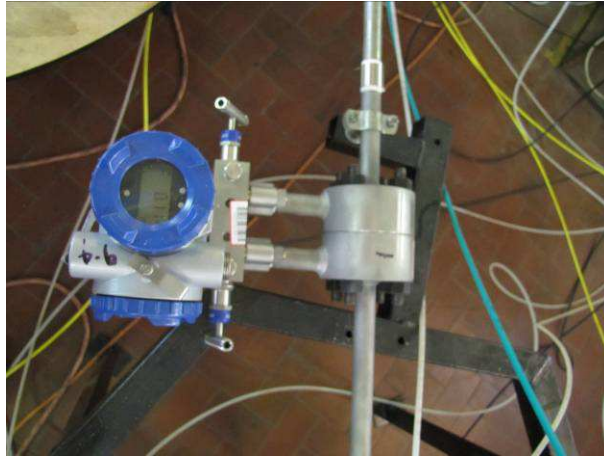
**Figura 42: Rotametro per la misura della portata d'acqua totale. Circuito B.**

| Modello | Range portata<br>[l/h] | Temperatura<br>valutazione<br>[°C] | Densità<br>valutazione<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Temperatura<br>max<br>[°C] | Pressione<br>max<br>[bar] |
|---------|------------------------|------------------------------------|--|----------------------------|---------------------------|
| G6      | 1600 - 16000           | 20                                 | 1000   | -10 - 150                  | 16                        |

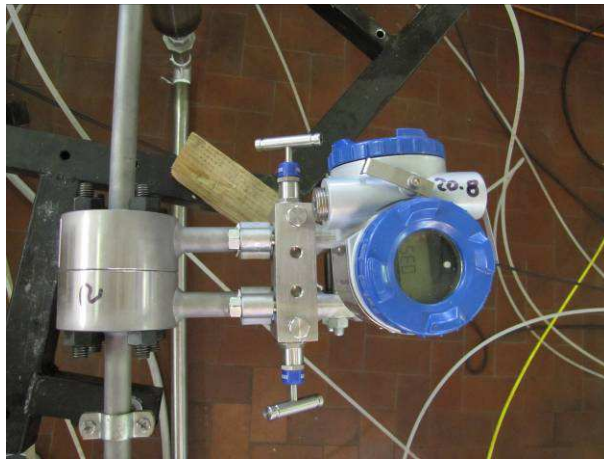
**Tabella 24: Caratteristiche rotametro per portata d'acqua totale. Circuito B.**

Per la misura della portata d'acqua nei tre rami di alimentazione dopo il collettore d'ingresso sono montati tre misuratori di portata a diaframma (Figura 43). Questi strumenti, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 25, sono in grado di determinare la portata circolante mediante la rilevazione della caduta di pressione differenziale.





Ramo 1 (Elica D = 1,39 m)



Ramo 2 (Elica D = 1 m)



Ramo 3 (Elica D = 0,64 m)

**Figura 43: Misuratori di portata a diaframma. Circuito B.**

| Modello    | N° di serie | Range<br>pressione<br>[kPa] | Portata<br>massima<br>[l/h] | Diametro<br>tubazioni<br>[mm] | Segnale<br>elettrico<br>[mA] | Portata<br>d'acqua<br>misurata |
|------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| FCX-AII-V5 | AAH1535F    | ±130                        | 800                         | 13,8                          | 4-20                         | Ramo 1                         |
| FCX-AII-V5 | ABF0872F    | ±130                        | 800                         | 13,8                          | 4-20                         | Ramo 2                         |
| FCX-AII-V5 | AAH1526F    | ±130                        | 800                         | 13,8                          | 4-20                         | Ramo 3                         |

**Tabella 25: Caratteristiche misuratori di portata a diaframma. Circuito B.**

Sono state misurate le pressioni medie nelle tre sezioni di prova mediante tre trasduttori di pressione *Rosemount Alphaline*, le cui caratteristiche sono riportate nella tabella successiva.

| Tipo                           | Modello    | N° di<br>serie | Range<br>[bar] | Max<br>allowable<br>pressare | Pressione media<br>misurata |
|--------------------------------|------------|----------------|----------------|------------------------------|-----------------------------|
| <i>Rosemount<br/>alphaline</i> | 1151DP4E22 | 9212819        | 0 – 2          | 2                            | elica D = 1,39 m            |
| <i>Rosemount<br/>alphaline</i> | 1151DP7E22 | 9212616        | 0 – 15         | 140                          | elica D = 1 m               |
| <i>Rosemount<br/>alphaline</i> | 1151DP7E12 | 8502348        | 0 – 7          | 140                          | elica D = 0,64 m            |

**Tabella 26: Caratteristiche trasduttori di pressione *Rosemount Alphaline*. Circuito B.**

La pressione ambiente è stata rilevata tramite una centralina per la misura dei parametri ambientali. La pressione dell'aria è stata rilevata mediante un manometro montato sulla linea dell'aria prima dell'ingresso degli asimetri.

La temperatura dell'acqua e la temperatura ambientale sono state rilevate con l'utilizzo di due termocoppie.

Come per il circuito A la raccolta dei dati è stata effettuata mediante un acquisitore multicanale HP 3497A e relativo software di acquisizione dati in LabVIEW.

---

### **4.3 Incertezza di misura.**

In considerazione delle apparecchiature e strumentazioni utilizzate, nelle condizioni peggiori, si è stimata un'incertezza estesa  $U$  inferiore all'8%. L'incertezza estesa è espressa come incertezza tipo moltiplicata per il fattore di copertura  $k=2$ , che per una distribuzione normale corrisponde ad una probabilità di copertura di circa il 95 %.

## 5 Prove in deflusso monofase.

Lo scopo di queste prove è quello di caratterizzare le cadute di pressione nelle sezioni di prova, determinando la dipendenza del  $\Delta p$  di attrito dalla portata e dalla lunghezza. Inoltre si vogliono caratterizzare le tre sezioni di prova in termini di coefficiente d'attrito, mettendo in evidenza l'effetto della curvatura e della torsione delle eliche, cioè valutare di quanto i dati sperimentali si discostano dai valori ricavati con formulazioni valide per tubi dritti. Per raggiungere questo obiettivo si è studiato il risultato fornito dalle prove sperimentali svolte, valutandone la linearità e la costanza lungo tutto lo sviluppo delle eliche. In seguito si è calcolato il fattore d'attrito confrontandolo con quello ottenuto tramite correlazioni, teoriche o sperimentali, presenti nella letteratura di settore.

Le prove sono state effettuate con entrambi i circuiti di prova, tuttavia l'analisi approfondita dei dati è stata eseguita solo per le misurazioni realizzate con il circuito per il test delle singole sezioni di prova (circuito A). Le prove in regime monofase eseguite con il circuito per eliche in parallelo (circuito B) sono state solamente confrontate per verificarne la congruenza con i dati raccolti nella prima campagna di prove.

Per le prove in deflusso monofase relative al circuito A si è proceduto utilizzando come unico fluido l'acqua. Prima di ogni serie di acquisizioni si è imposto lo zero ai trasduttori di pressione *Statham*. In questa serie di misure si sono acquisite la media e la varianza della portata di acqua e delle differenze di pressione tra la prima presa e le successive, attraverso l'acquisitore multicanale HP 3497A.

Le condizioni di misura sono riportate nella matrice sperimentale (Tabella 27).

|   |           |
|---|-----------|
| Intervallo della portata (W) di acqua [l/h] | 200 - 800 |
| $\Delta W$ [l/h]                            | 20        |

**Tabella 27: Matrice sperimentale prove monofase. Circuito A.**

Nel caso del circuito B si sono utilizzate alcune portate campione in un intervallo simile a quello utilizzato nel caso del circuito A per poter procedere al confronto dei risultati ottenuti.

## **5.1 Risultati sperimentali prove monofase con circuito A.**

### ***5.1.1 Differenze di pressione monofase .Circuito A.***

Le differenze di pressione misurate rappresentano le cadute di pressione per attrito sulla lunghezza compresa tra due prese di pressione. In Figura 44, in Figura 45 e in Figura 46 si riportano i risultati ottenuti in funzione della portata per le tre eliche in esame. Da questi diagrammi si evince che le cadute di pressione in funzione della portata in massa di liquido presentano un andamento circa parabolico e, come atteso, la caduta di pressione  $\Delta p$  aumenta al crescere della portata d'acqua e della lunghezza del tratto di tubazione in esame.

Si è tracciato quindi l'andamento delle cadute di pressione misurate per ogni presa di pressione in funzione della portata in massa di acqua (Figura 44, Figura 45 e Figura 46).

In Figura 47, Figura 48 e Figura 49 sono rappresentate le cadute di pressione in rapporto rispetto alla loro lunghezza di riferimento in modo da poter confrontare i risultati ottenuti.

Per valutare l'influenza sulle misure delle singolarità delle sezioni di prova, vale a dire prese di pressione, incollaggi e irregolarità nelle sezioni e nel passo delle eliche, in Figura 50 si sono diagrammate le cadute di pressione normalizzate rispetto alla  $\Delta p(1,9)$  (caduta di pressione misurata tra la prima presa e l'ultima) in funzione delle lunghezze dei tratti interessati normalizzate rispetto a  $L(1,9)$  (lunghezza tratto di elica tra la prima presa e l'ultima). I punti di tale diagramma sono approssimabili con una retta: si può quindi asserire che le singolarità, così come gli effetti di imbocco, non sono significative ai fini della valutazione delle cadute di pressione.

Per questo motivo le cadute di pressione misurate sono sostanzialmente dovute all'attrito continuo.

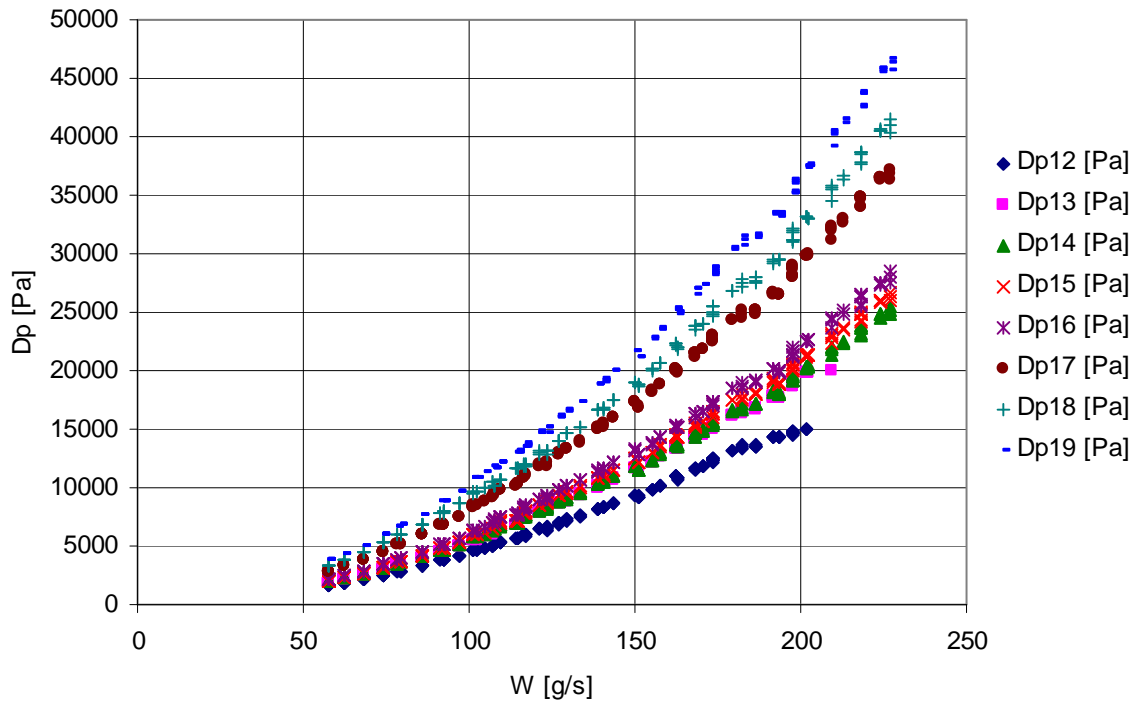


Figura 44: Andamento  $\Delta p$  in funzione della portata in massa di acqua [D = 0,64]. Circuito A.

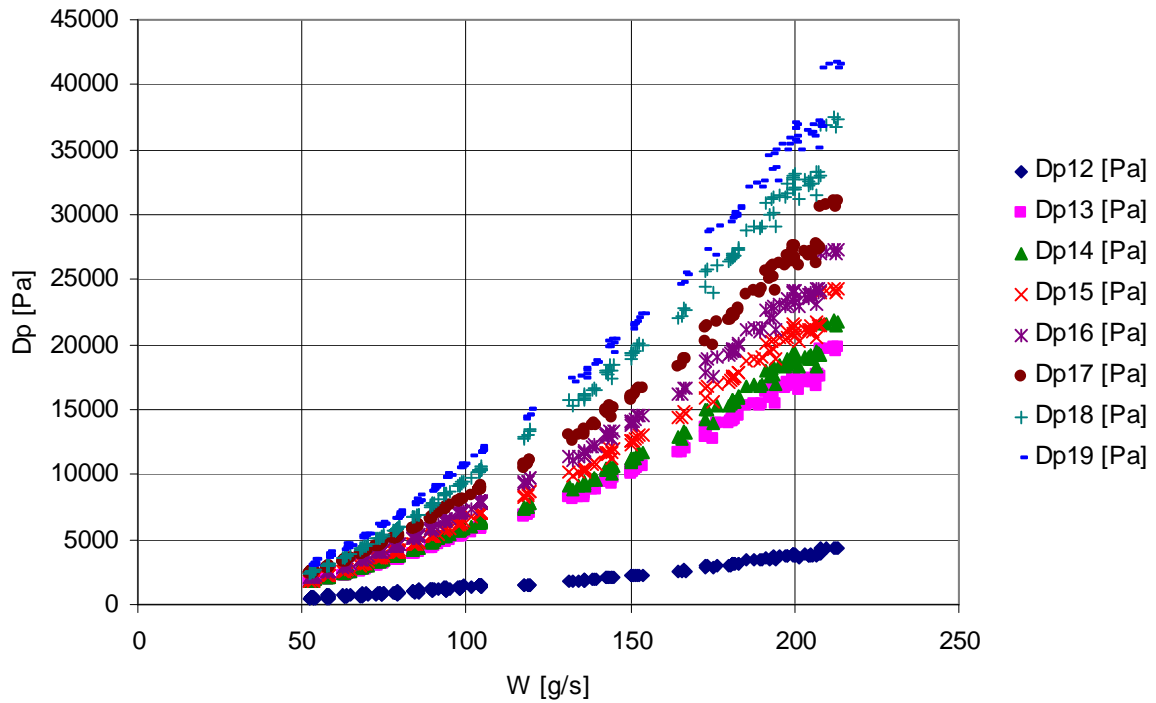


Figura 45: Andamento  $\Delta p$  in funzione della portata in massa di acqua [D = 1]. Circuito A.

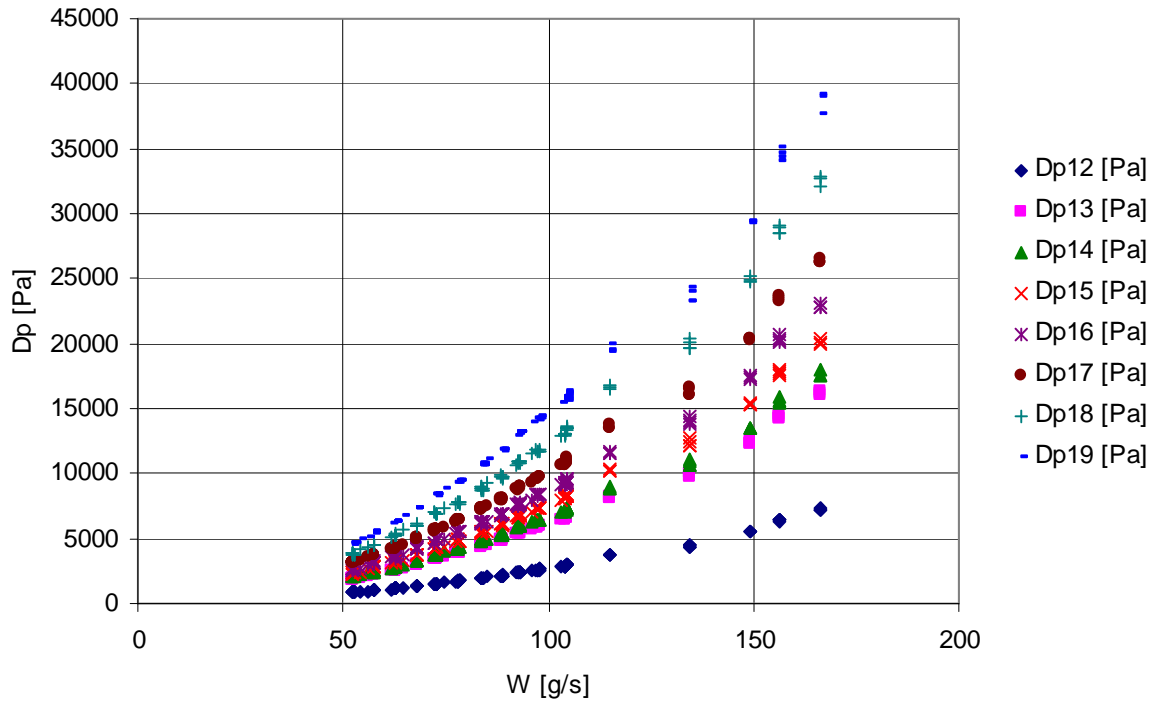


Figura 46: Andamento  $\Delta p$  in funzione della portata in massa di acqua [ $D = 1,39$ ]. Circuito A.

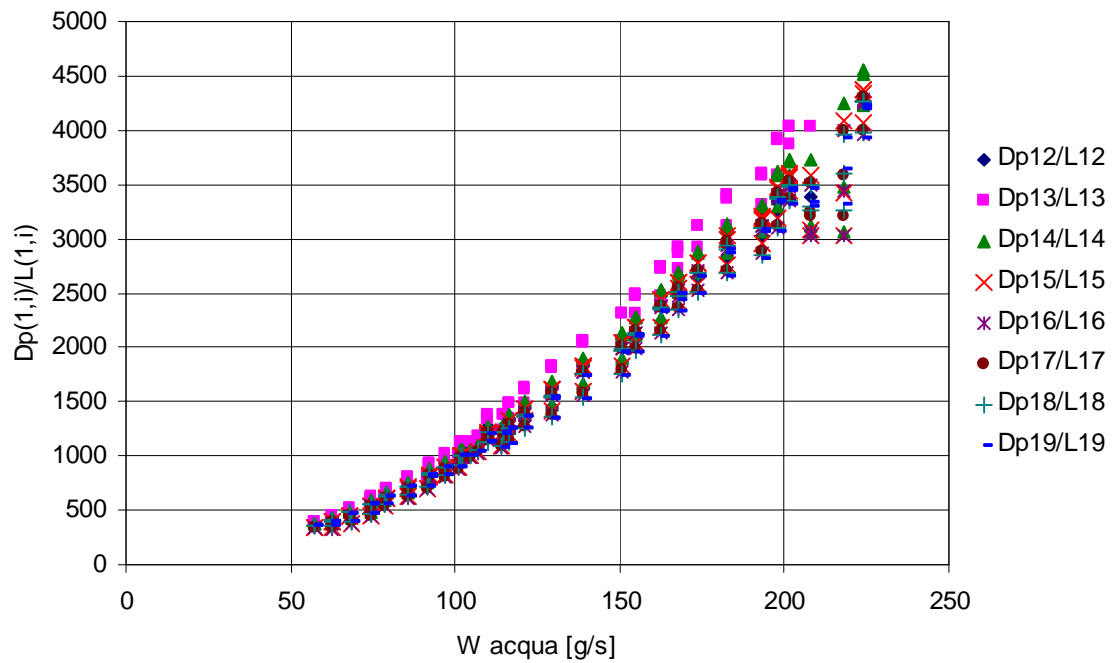


Figura 47: Andamento  $\Delta p(1,i)/L(1,i)$  in funzione della portata in massa di acqua [ $D = 0,64$ ]. Circuito A.

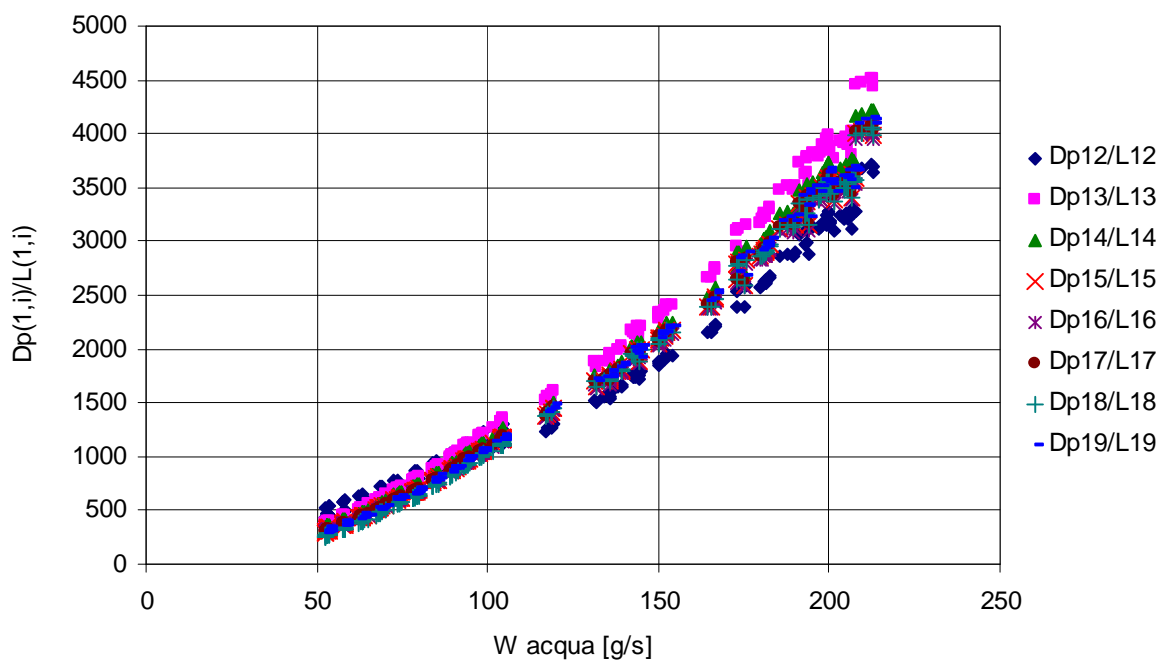


Figura 48: Andamento  $\Delta p(1,i)/L(1,i)$  in funzione della portata in massa di acqua [ $D = 1$ ]. Circuito A.

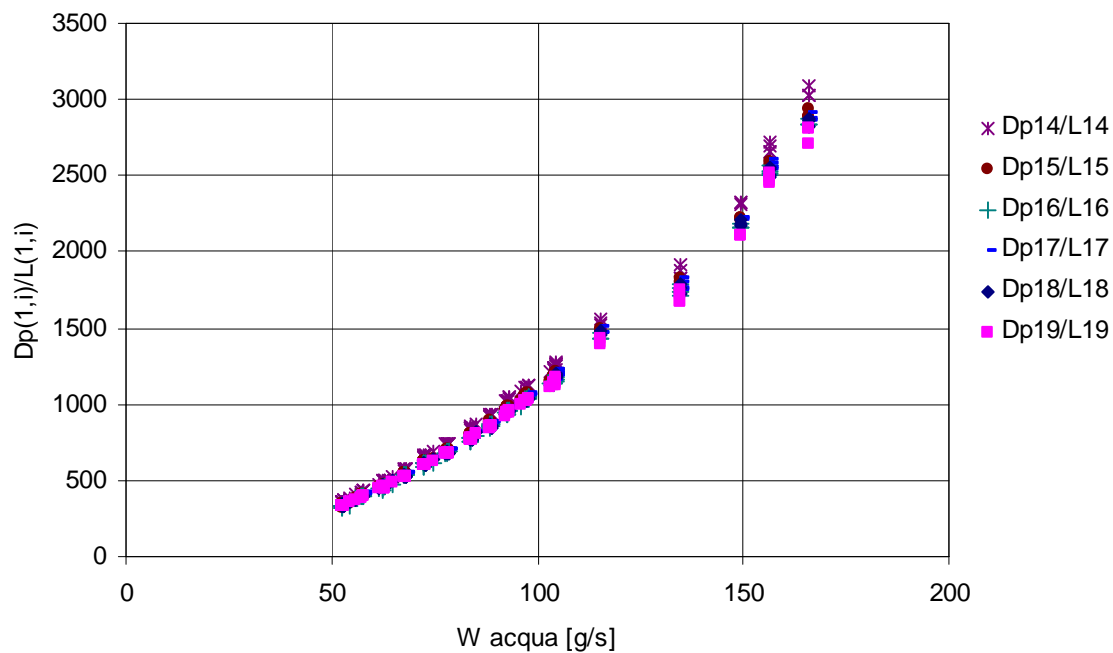
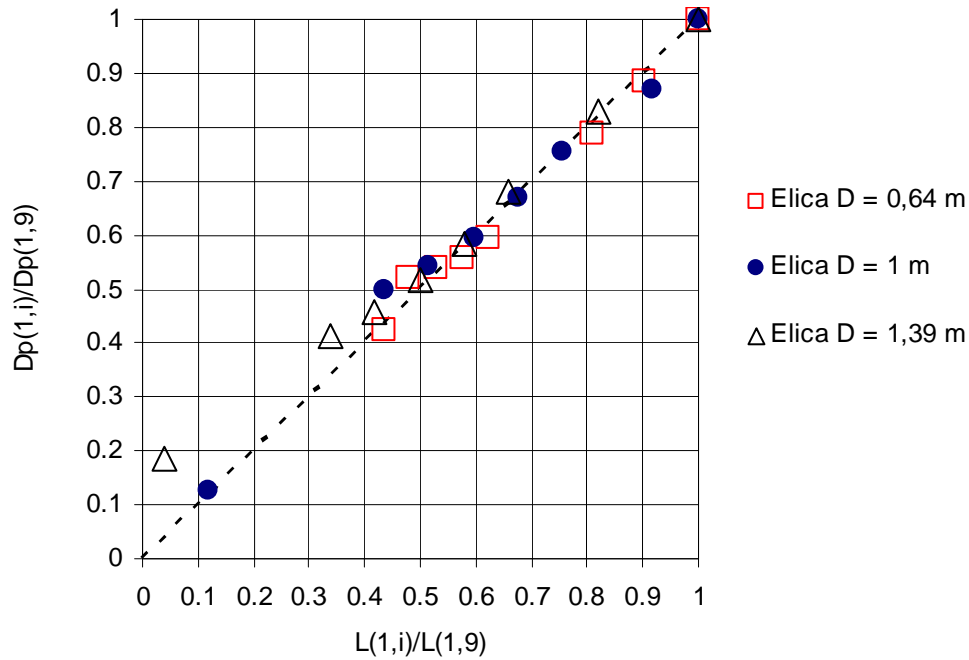


Figura 49: Andamento  $\Delta p(1,i)/L(1,i)$  in funzione della portata in massa di acqua [ $D = 1,39$ ]. Circuito A.





**Figura 50: Andamento pressioni normalizzate in funzione delle lunghezze normalizzate. Circuito A.**

Si sono diagrammati il rapporto  $\Delta p(1,9)/L(1,9)$  medio per le tre eliche in funzione della portata di acqua (Figura 51). Successivamente si sono ottenute tre curve (Figura 52) le cui equazioni del tipo  $\frac{\Delta p}{L} = c \cdot W^m$  sono riportate in Tabella 28.

Si osserva che il coefficiente  $c$  decresce con il diametro e l'esponente  $m$  è costante fino alla seconda cifra decimale.

|                    |  |
|--------------------|--|
| Elica $D = 1,39$ m | $\frac{\Delta p}{L} = 0.2211 \cdot W^{1.8163}$ |
| Elica $D = 1$ m    | $\frac{\Delta p}{L} = 0.2354 \cdot W^{1.8171}$ |
| Elica $D = 0,64$ m | $\frac{\Delta p}{L} = 0.253 \cdot W^{1.8122}$  |

**Tabella 28: Equazioni  $Dp/L$  in funzione della portata  $W$ . Circuito A.**

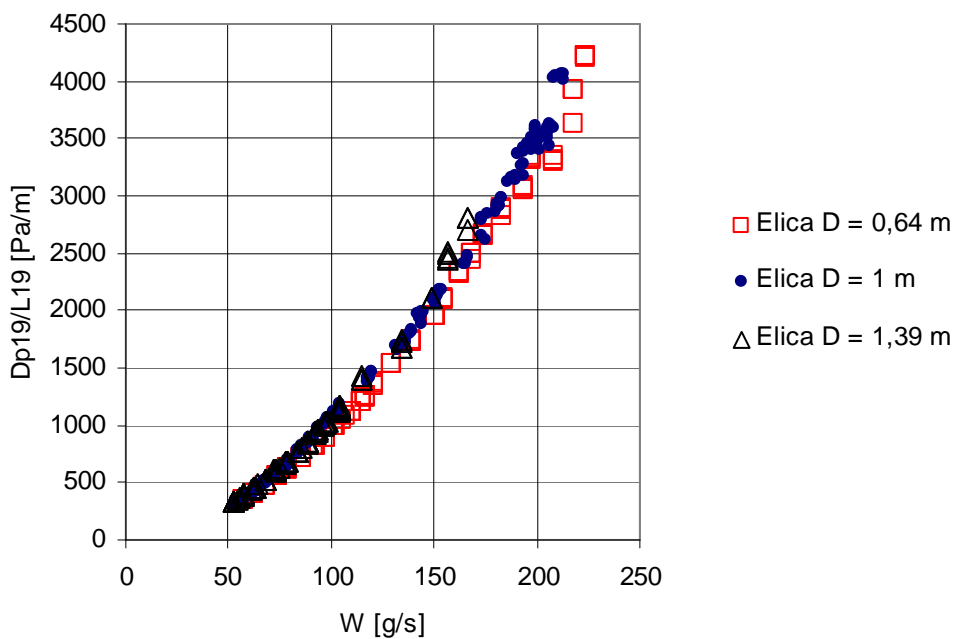


Figura 51: Andamento  $\Delta p(1,9)/L(1,9)$  medio in funzione della portata d'acqua. Circuito A.

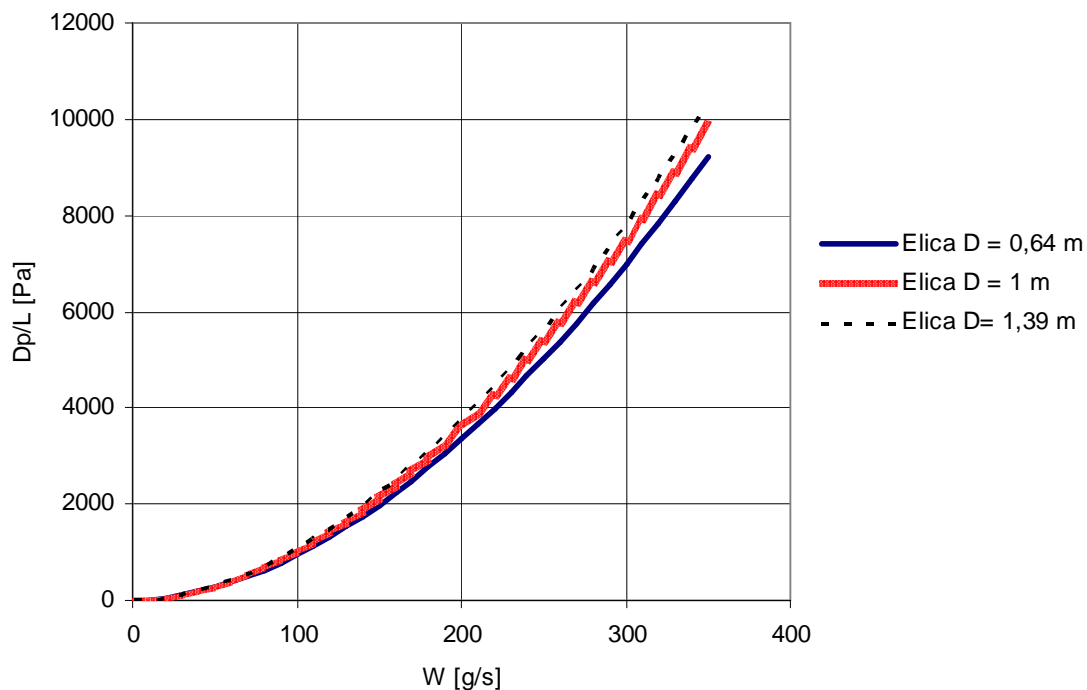


Figura 52: Andamento  $\Delta p/L$  in funzione della portata in massa di acqua. Circuito A.

**5.1.2 Regimi di moto e transizione laminare – turbolento. Circuito A.**

Si è ricavata la velocità del fluido  $u$  come :

$$u = \frac{W}{A \cdot \rho}$$

in cui  $W$  è la portata in massa misurata, l'area di passaggio  $A$  è circa  $113 \text{ mm}^2$  e la densità è approssimata a  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

Le prove sperimentali sono caratterizzate da una portata specifica  $G$  compresa tra circa 500 e 2000  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ .

Si è proceduto con il calcolo del numero di Reynolds per ogni portata d'acqua con la formula:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu}$$

I valori del numero di Reynolds ottenuti per queste serie di prove è compreso negli intervalli riportati in Tabella 29.

|            | Elica D = 0,64 m | Elica D = 1 m | Elica D = 1,39 m |
|------------|------------------|---------------|------------------|
| Re minimo  | 6100             | 5500          | 6660             |
| Re massimo | 23800            | 22650         | 23600            |

**Tabella 29: Intervalli numeri di Reynolds nelle prove sperimentali. Circuito A.**

La transizione laminare – turbolenta dipende dal rapporto  $d/D$ , come si può verificare confrontando le correlazioni proposte dai vari autori .

Con le correlazioni riportate in Tabella 30 si sono valutati i numeri di Reynolds di transizione e le corrispondenti portate di transizione; i valori ottenuti sono riportati in Tabella 31 e in Tabella 32.

| Autore     | Correlazione   |
|------------|--|
| Ito        | $Re_{transizione} = 20000 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0.32}$                           |
| Srinivasan | $Re_{transizione} = 2100 \cdot \left[1 + 12 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0.5}\right]$   |
| Collier    | $Re_{transizione} = 2300 \cdot \left[1 + 8.6 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0.45}\right]$ |

**Tabella 30: Correlazioni numero di Reynolds di transizione deflusso laminare – turbolento.**

| Autore     | $Re_{transizione}$<br>Elica D = 0,64 m | $Re_{transizione}$<br>Elica D = 1 m | $Re_{transizione}$<br>Elica D = 1,39 m |
|------------|--|-------------------------------------|--|
| Ito        | 5602,6                                 | 4857                                | 4371,23                                |
| Srinivasan | 5550,65                                | 4860,5                              | 4441,44                                |
| Collier    | 5604,28                                | 5003,07                             | 4630,78                                |

**Tabella 31: Numeri di Re di transizione deflusso laminare – turbolento per i vari autori. Circuito A.**

| Autore     | $W_{transizione}$<br>Elica D = 0,64 m<br>[kg/s] | $W_{transizione}$<br>Elica D = 1 m<br>[kg/s] | $W_{transizione}$<br>Elica D = 1,39 m<br>[kg/s] |
|------------|---|--|---|
| Ito        | 0,053   | 0,0457                                       | 0,0412  |
| Srinivasan | 0,0523  | 0,0458                                       | 0,0419  |
| Collier    | 0,053   | 0,047  | 0,0436  |

**Tabella 32: Portata d'acqua di transizione deflusso laminare – turbolento per i vari autori. Circuito A.**

### 5.1.3 Fattore d'attrito. Circuito A.

Il fattore d'attrito di Blasius è stato calcolato utilizzando la seguente correlazione:

$$f_{Blasius} = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot d}{\rho \cdot u^2 \cdot L}$$

in cui  $\Delta p$  è la differenza di pressione misurata in Pa,  $u$  è la velocità del fluido in m/s valutata in precedenza,  $L$  è la lunghezza in metri tra le prese interessate dalla caduta di pressione,  $d$  è il diametro interno in metri delle tubazioni elicoidali. La densità è approssimata a  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

Per analizzare i risultati ottenuti si è utilizzato il fattore d'attrito di Fanning:

$$f_{Fanning} = \frac{f_{Blasius}}{4}$$

I fattori d'attrito, ottenuti per ogni tratto delle eliche in esame, sono stati diagrammati in funzione del numero di Reynolds (Figura 53, Figura 54 e Figura 55).

Si sono successivamente mediati i valori dei fattori d'attrito a parità di numero di Reynolds, ottenendo un'unica serie di punti (Figura 56, Figura 57 e Figura 58). In questi diagrammi si sono voluti confrontare i dati sperimentali ottenuti con i risultati ricavati applicando i nostri parametri geometrici a correlazioni reperibili in letteratura. Esistono diverse correlazioni empiriche e/o teoriche per il calcolo del fattore d'attrito in tubi curvi (elicoidali, toroidali, circolari, ecc), sia nel caso di deflusso laminare che turbolento (Appendice A). Si sono confrontate tra loro alcune di queste correlazioni, riportate in Tabella 33 e Tabella 34.

Per il moto laminare le correlazioni confrontate sono quelle di Manlapaz-Churchill, White, Schmidt e di Ito; mentre per il moto turbolento le correlazioni confrontate sono quelle di White, Srinivasan, Ruffel e di Ito.

|                               |   |  |
|-------------------------------|---|--|
| <p>Manlapaz<br/>Churchill</p> | $f = f_s \cdot \left[ \left( 1 - \frac{0,18}{\left[ 1 + \left( \frac{35}{D_e} \right)^2 \right]^{0,5}} \right)^m + \left( 1 + \frac{d}{D_{coil}} \right)^2 \cdot \left( \frac{D_e}{8833} \right) \right]^{0,5}$ | <p>Con: <math>f_s = \frac{16}{Re}</math> e</p> $D_e = Re \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)^{0,5}$ <p>m = 2 per <math>D_e &lt; 20</math>;<br/> m = 1 per <math>20 &lt; D_e &lt; 40</math>;<br/> m = 0 per <math>D_e &gt; 40</math>;</p> |
| <p>White</p>                  | $f = f_s \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \left[ \frac{0,25}{Re \cdot \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)^{0,5}} \right]^{0,45} \right]^{\frac{1}{0,45}} \right\}$  | $f_s = \frac{64}{Re}$  |
| <p>Schmidt</p>                | $f = f_s \cdot \left[ 1 + 0,14 \cdot \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)^{0,97} \cdot Re \right]^i$   | $i = 1 - 0,644 \cdot \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)^{0,312}$ $f_s = \frac{64}{Re}$  |
| <p>Ito</p>                    | $f_c = \frac{344 \cdot \left( \frac{D_{coil}}{d} \right)^{-0,5}}{\left\{ 1,56 + \log_{10} \left[ Re \cdot \left( \frac{D_{coil}}{d} \right)^{-0,5} \right] \right\}^{5,73}}$                                    | <p>valida per</p> $135 \cdot \left( \frac{D_{coil}}{d} \right)^{0,5} \leq Re \leq 2000 \left[ 1 + 132 \cdot \left( \frac{D_{coil}}{d} \right)^{-0,6} \right]$ <p>e</p> $5 \leq \frac{D_{coil}}{d} \leq 2000 ;$                         |

**Tabella 33: Correlazioni di per il calcolo del fattore d'attrito turbolento.**

|            |   |
|------------|---|
| White      | $f = 0,31 \cdot \left[ \log\left(\frac{Re}{7}\right)^{-2} + 0,04\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)^{0,5} \right]$  |
| Srinivasan | $f = 1,334 Re^{-0,2} \cdot \left(\frac{d}{D_{coil}}\right)^{0,1}$   |
| Ruffel     | $f = 0,06 + 0,12 \cdot \left(\frac{d}{D_{coil}}\right)^{0,275} Re^{-0,4}$   |
| Ito        | $f_c = 0,07 \cdot Re^{-0,25} + 0,00725 \cdot \left(\frac{D_{coil}}{d}\right)^{-0,5}$<br>valida per: $Re \leq 15000$ e $5 \leq \frac{D_{coil}}{d} \leq 2000$ |

**Tabella 34: Correlazioni di per il calcolo del fattore d'attrito laminare.**

In queste correlazioni intervengono il numero di Reynolds e il rapporto  $D/d$ , in particolare interviene il numero di Dean che definisce l'influenza della geometria del condotto, della portata e delle proprietà del fluido. Questo numero è definito come:

$$D_e = Re \cdot \left(\frac{d}{D_{coil}}\right)^{0,5}$$

Si è scelto di prendere in esame la correlazione di Ito per deflusso laminare e la correlazione di Ito per deflusso turbolento riportate nelle tabelle precedenti.

Successivamente si sono confrontati i risultati ottenuti, applicando queste correlazioni alle condizioni geometriche in esame, con i dati sperimentali.

|                            | Limiti di validità<br>Elica D = 0,64 m | Limiti di validità<br>Elica D = 1 m | Limiti di validità<br>Elica D = 1,39 m |
|----------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Ito<br>deflusso laminare   | $9,8 < Re < 4451,9$                    | $123,24 < Re < 3858,3$              | $145,3 < Re < 3525,12$                 |
| Ito<br>deflusso turbolento | $Re > 15000$                           | $Re > 15000$                        | $Re > 15000$                           |

**Tabella 35: Limiti di validità correlazioni di Ito. Circuito A.**

Si è proceduto ad un ulteriore confronto tra i valori sperimentali ottenuti ed i fattori d'attrito ricavati utilizzando correlazioni per tubi dritti riportate in Tabella 36.

| Tipo di deflusso | Fattore d'attrito di Blasius   | Fattore d'attrito di Fanning    |
|------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| laminare         | $f_s = \frac{64}{Re}$          | $f_s = \frac{16}{Re}$           |
| turbolento       | $f_s = 0,314 \cdot Re^{-0,25}$ | $f_s = 0,0785 \cdot Re^{-0,25}$ |

**Tabella 36: Correlazioni per il calcolo del fattore d'attrito in tubi dritti.**

Per i numeri di Reynolds considerati, nella zona turbolenta, vi è un buon accordo tra i dati sperimentali e i risultati ottenuti attraverso correlazioni per tubi dritti.



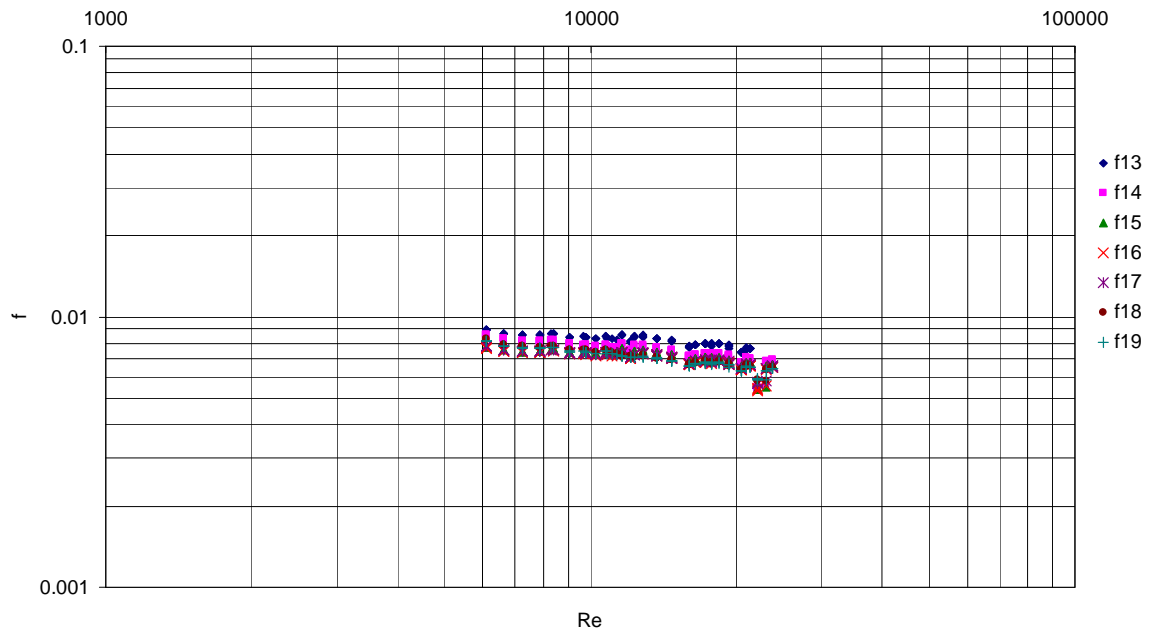


Figura 53: Andamento fattore d'attrito di Fanning in funzione del numero di Reynolds [ $D = 0,64$ ]. Circuito A.

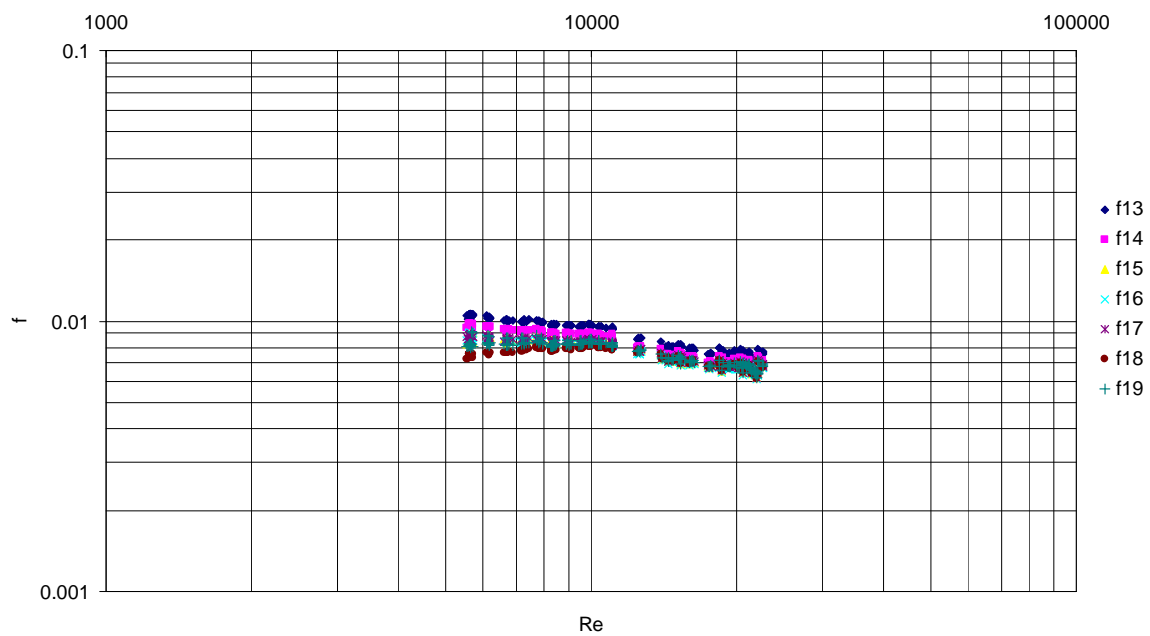


Figura 54: Andamento fattore d'attrito di Fanning in funzione del numero di Reynolds [ $D = 1$ ]. Circuito A.

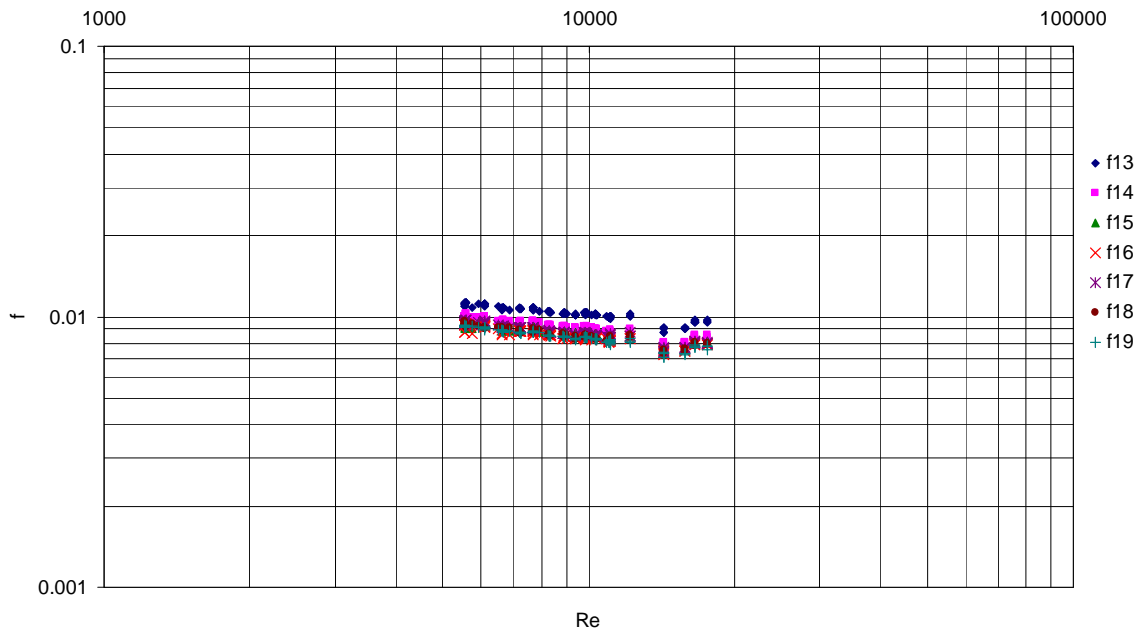


Figura 55: Andamento fattore d'attrito di Fanning in funzione del numero di Reynolds [ $D = 1,39$ ]. Circuito A.

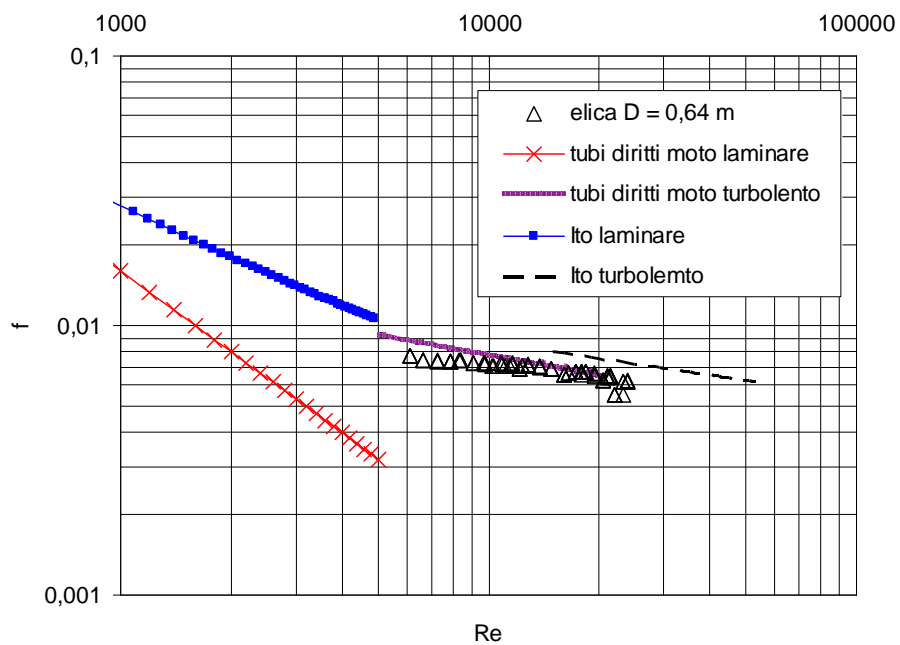


Figura 56: Confronto fattore d'attrito sperimentale - correlazioni per tubi dritti e correlazioni di Ito [ $D = 0,64$ ]. Circuito A.

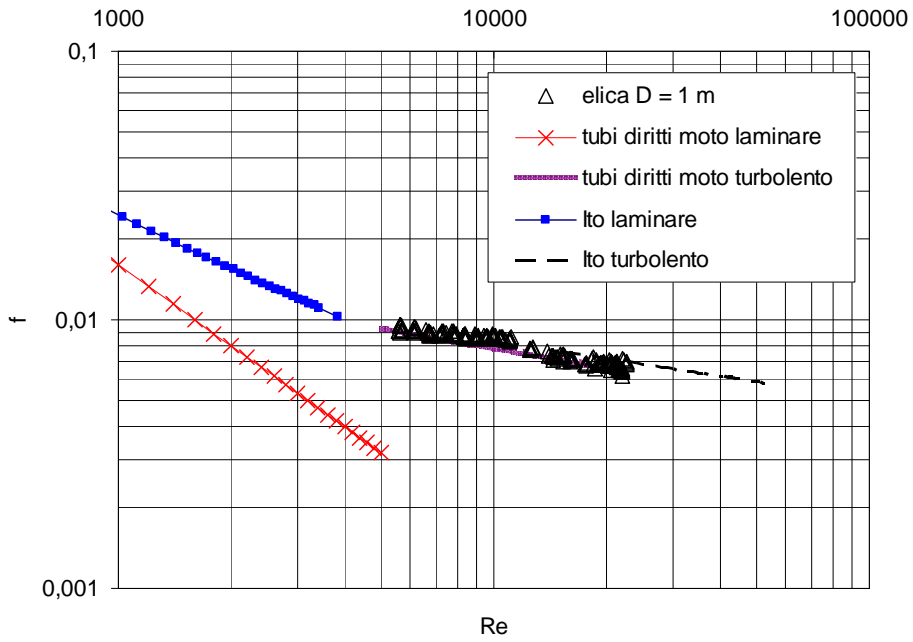


Figura 57: Confronto fattore d'attrito sperimentale - correlazioni per tubi dritti e correlazioni di Ito [ $D = 1$ ]. Circuito A.

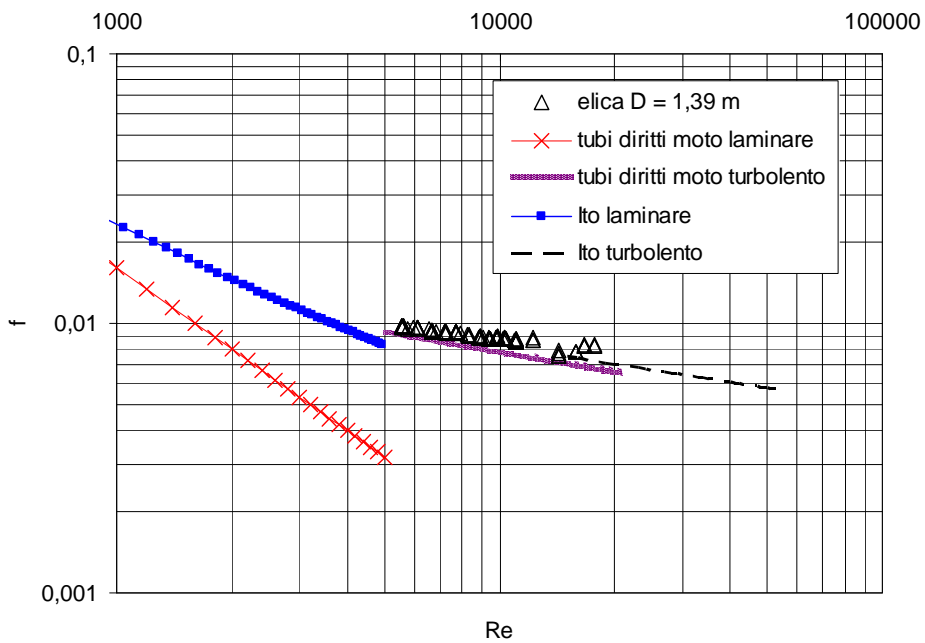


Figura 58: Confronto fattore d'attrito sperimentale - correlazioni per tubi dritti e correlazioni di Ito [ $D = 1,39$ ]. Circuito A.

Dall'analisi dei risultati sperimentali si è potuto stabilire che il fattore d'attrito, a parità di numero di Reynolds, cresce al crescere del diametro  $D$  e del passo  $p$  dell'elica, mentre decresce al crescere del rapporto  $L/D$  tra la lunghezza  $L$  dell'elica considerata ed il suo diametro  $D$ .

In Figura 59 sono rappresentati gli andamenti del fattore d'attrito in funzione del numero di Reynolds per le tre sezioni di prova.

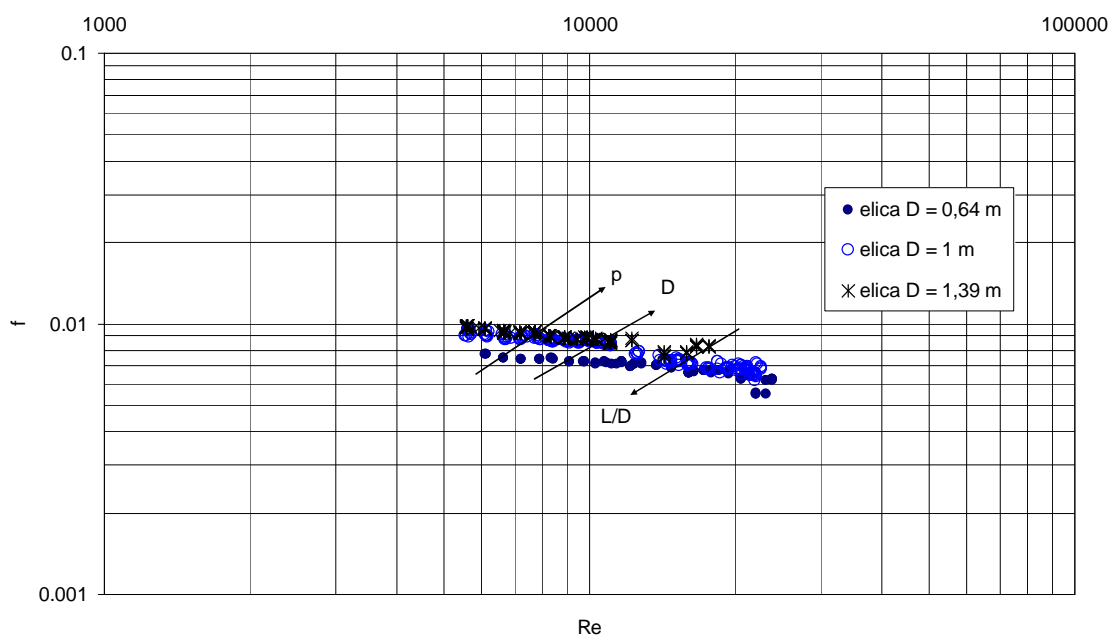


Figura 59: Confronto fattore d'attrito sperimentale per le tre eliche. Circuito A.

## **5.2 Risultati sperimentali prove monofase con circuito B.**

### ***5.2.1 Differenze di pressione monofase. Circuito B.***

Sono state effettuate una serie di prove in regime monofase (solo acqua) anche con il circuito con le eliche poste in parallelo (circuito B). Le tre sezioni di prova sono state testate contemporaneamente utilizzando differenti portate totali in ingresso al collettore di alimentazione; tali portate sono state imposte utilizzando la valvola di bypass posta dopo la pompa e sono state ricavate come somma delle portate misurate sui singoli rami di alimento delle eliche.

Dall'analisi delle misurazioni effettuate si può osservare che, nonostante l'utilizzo di strumentazioni e di configurazione differenti, le cadute di pressione rilevate tra ingresso ed uscita delle sezioni di prova sono coerenti con quelle precedentemente misurate con il circuito A.

Si sono analizzati due casi distinti:

- valvola di sfiato del collettore di alimentazione aperta,
- valvola di sfiato del collettore di alimentazione chiusa.

Il confronto tra le misurazioni effettuate con il circuito A e le misurazioni effettuate con il circuito B nei due casi considerati è riportato in Figura 60, Figura 61 e Figura 62.

Nel caso dell'elica più grande ( $D = 1,39$  m) si nota un leggero scostamento tra la misurazione effettuata con il circuito A e quella effettuata con il circuito B; questa differenza può essere imputata alla maggiore accuratezza di misura della portata di alimentazione nel circuito per eliche in parallelo.

Si è verificato inoltre che le misurazioni effettuate con la valvola di sfiato del collettore di alimentazione chiusa sono maggiormente stabili e si scostano meno dalle curve sperimentali ricavate per le cadute di pressione in regime monofase con il circuito A.

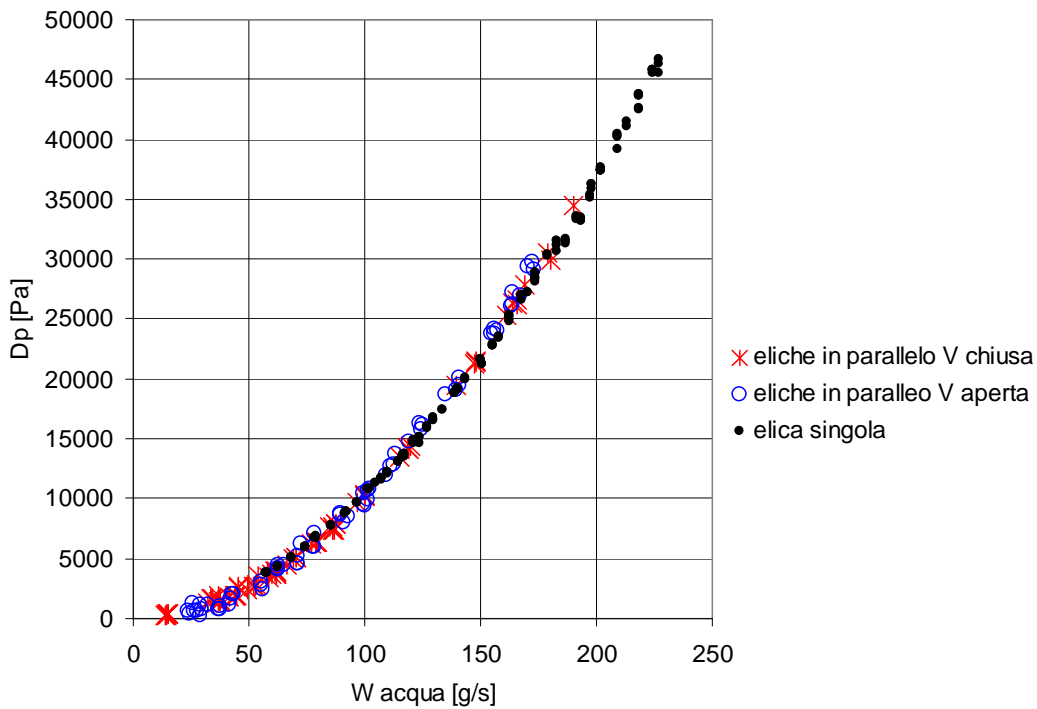


Figura 60: Confronto cadute di pressione monofase elica  $D = 0,64$  m

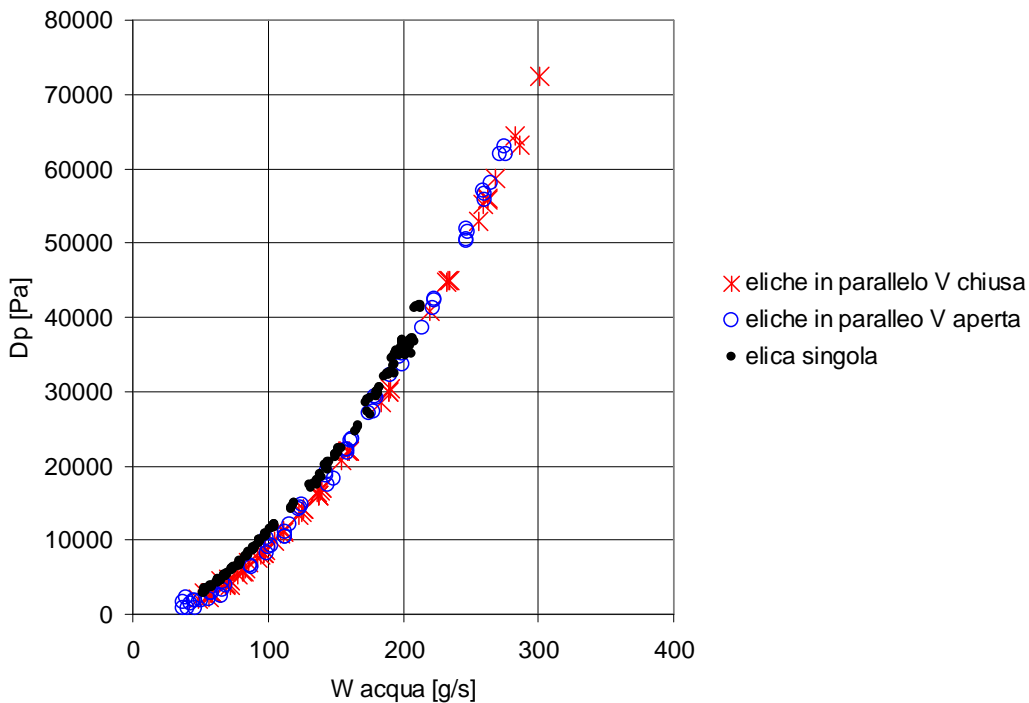
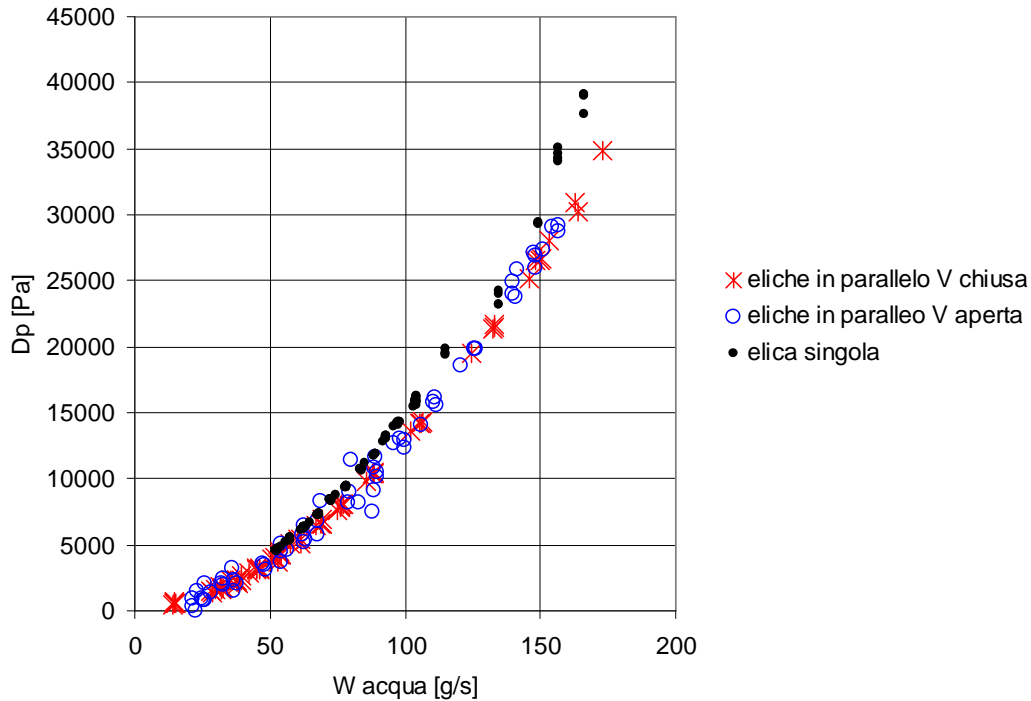


Figura 61: Confronto cadute di pressione monofase elica  $D = 1$  m



**Figura 62: Confronto cadute di pressione monofase elica  $D = 1,39$  m**

Si sono valutate anche le cadute di pressione sui rami di ingresso delle eliche; in particolare si sono considerate le cadute di pressione sui tre rami tra l'uscita del collettore d'ingresso e l'ingresso delle eliche.

I risultati di queste prove sono riportati in Figura 63. Si nota come le cadute di pressione per attrito siano differenti sui tre rami. La causa di questo scostamento, a parità di lunghezza dei rami, può essere attribuito ad imperfezioni nelle saldature effettuate per l'inserimento delle prese di pressione e nel montaggio dei misuratori di portata.

I rami di scarico, che dall'uscita delle sezioni di prova portano il fluido o la miscela al collettore di scarico, hanno lunghezze molto diverse e quindi risultano avere cadute di pressione che differiscono fortemente tra loro (un esempio delle misurazioni effettuate è riportato in Figura 64); questa differenza risulterà essere estremamente critica per l'uniformità della distribuzione della portata nei tre canali della quale influenzerà fortemente l'esito.

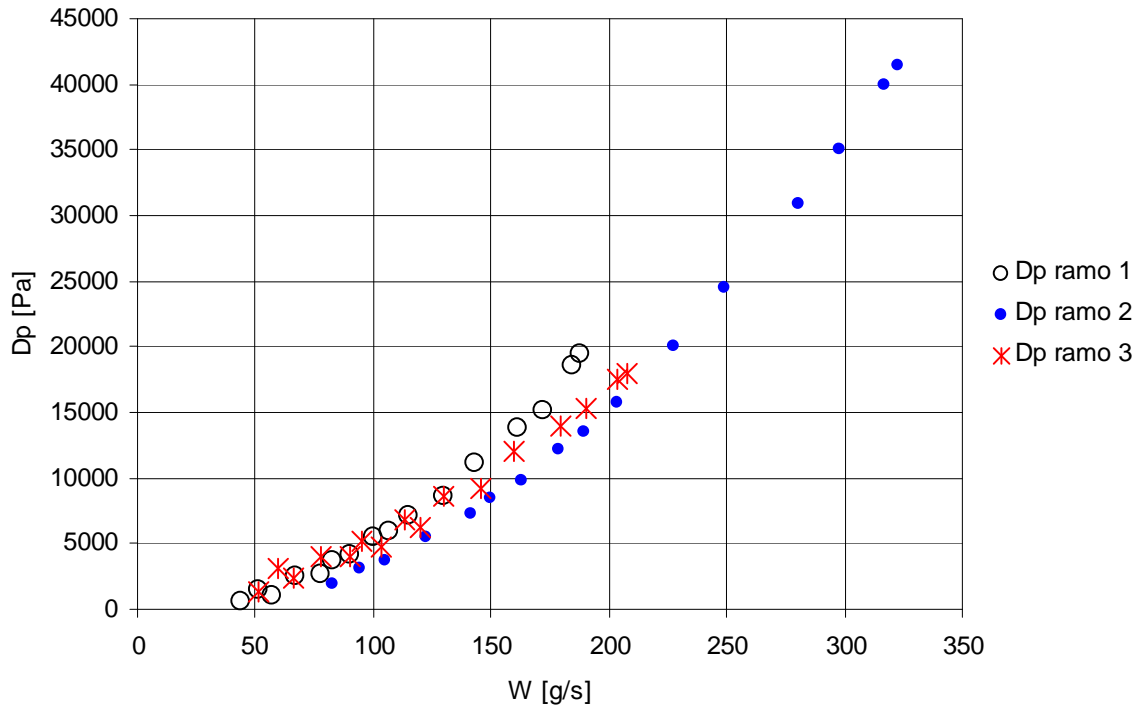


Figura 63: Cadute di pressione sui rami di alimentazione. Circuito B.

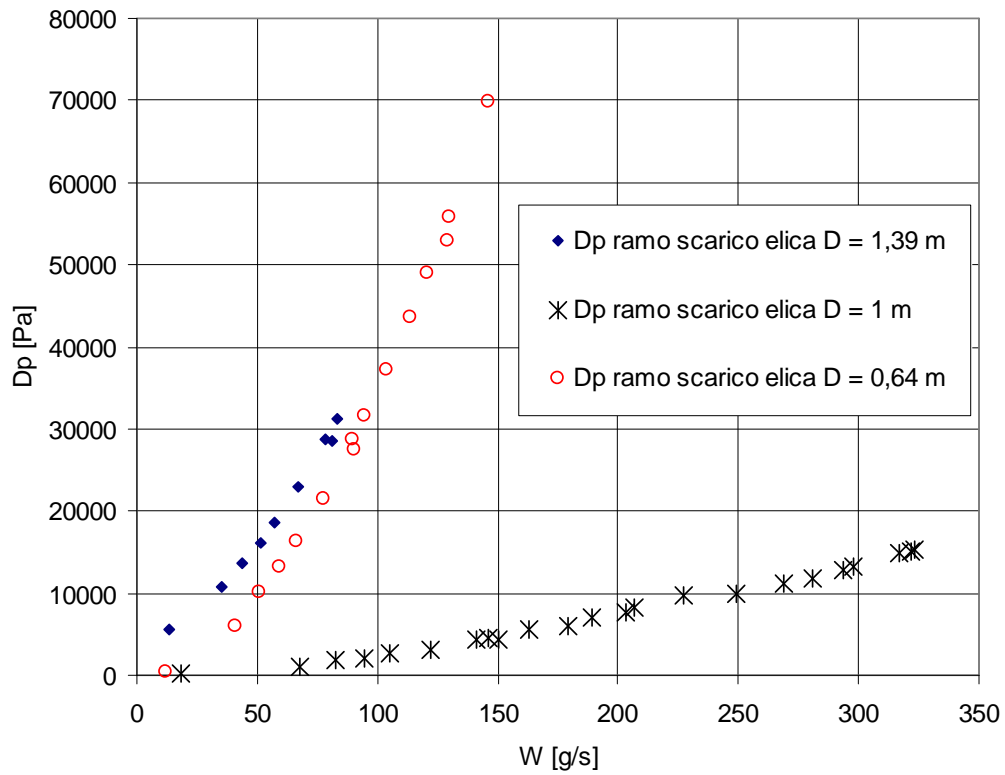


Figura 64: Cadute di pressione sui rami di scarico. Circuito B.



### **5.2.2 Fattore d'attrito. Circuito B.**

Si sono confrontati i fattori d'attrito ricavati con queste prove sperimentali con quelli ottenuti con le prove effettuate con il circuito A. Per questo raffronto si sono utilizzate le formule riportate nei paragrafi precedenti.

L'analisi è stata effettuata considerando separatamente le due configurazioni di prova, cioè con la valvola di sfiato del collettore di alimentazione aperta e chiusa.

Dal confronto dei risultati ottenuti risulta esserci, a parità di numero di Reynolds, un buon accordo tra i fattori d'attrito stimati con il circuito A e quelli stimati con il circuito B con la valvola di sfiato chiusa (Figura 65, Figura 66 e Figura 67).

Per numeri di Reynolds tipici del deflusso laminare i fattori d'attrito risultano seguire l'andamento della correlazione di Ito per deflusso laminare nel caso dell'elica con diametro pari a 1,39 m e la correlazione per tubi dritti con deflusso laminare nel caso delle eliche con diametro pari a 0,64 m e a 1 m.

Se si considerano invece le prove effettuate con la valvola di sfiato aperta (Figura 68, Figura 69 e Figura 70) i valori del fattore d'attrito risultano essere confrontabili con quelli relativi all'analisi effettuata con il circuito A solo per numeri di Reynolds elevati; negli altri casi si hanno dei fattori d'attrito che non possono essere stimati da nessuna correlazione. Questo fatto può essere imputato alle basse portate d'acqua che scorrono nei rami se la valvola di sfiato viene lasciata aperta; infatti per portate troppo basse non è possibile effettuare una corretta misurazione di queste grandezze.

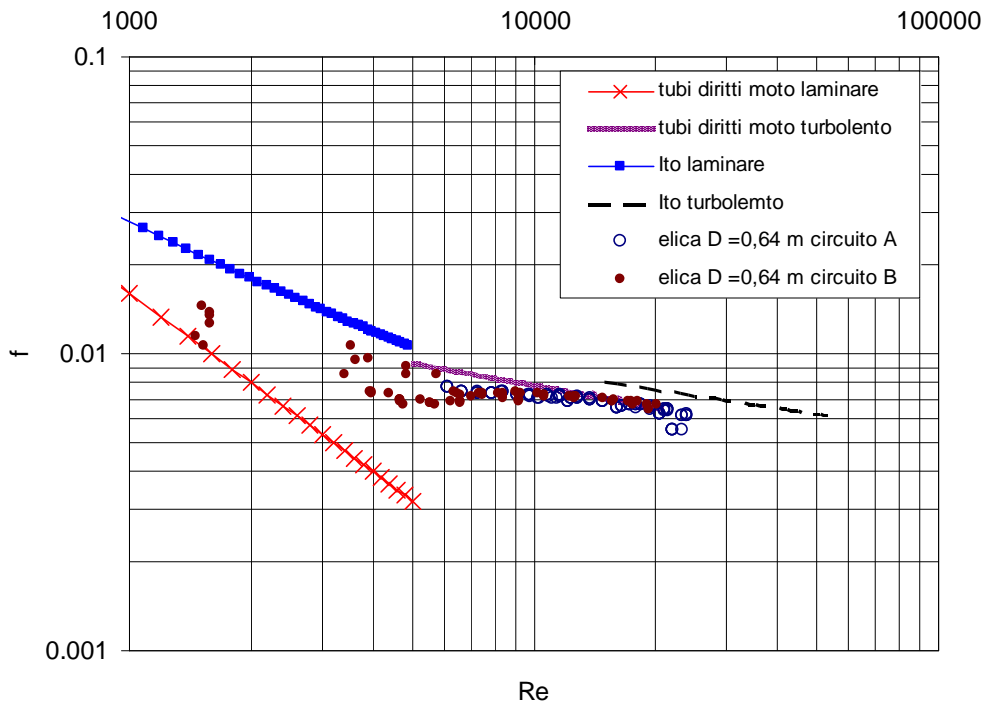


Figura 65: Fattore d'attrito sperimentale per i due circuiti di prova con valvola chiusa [D = 0,64 m].

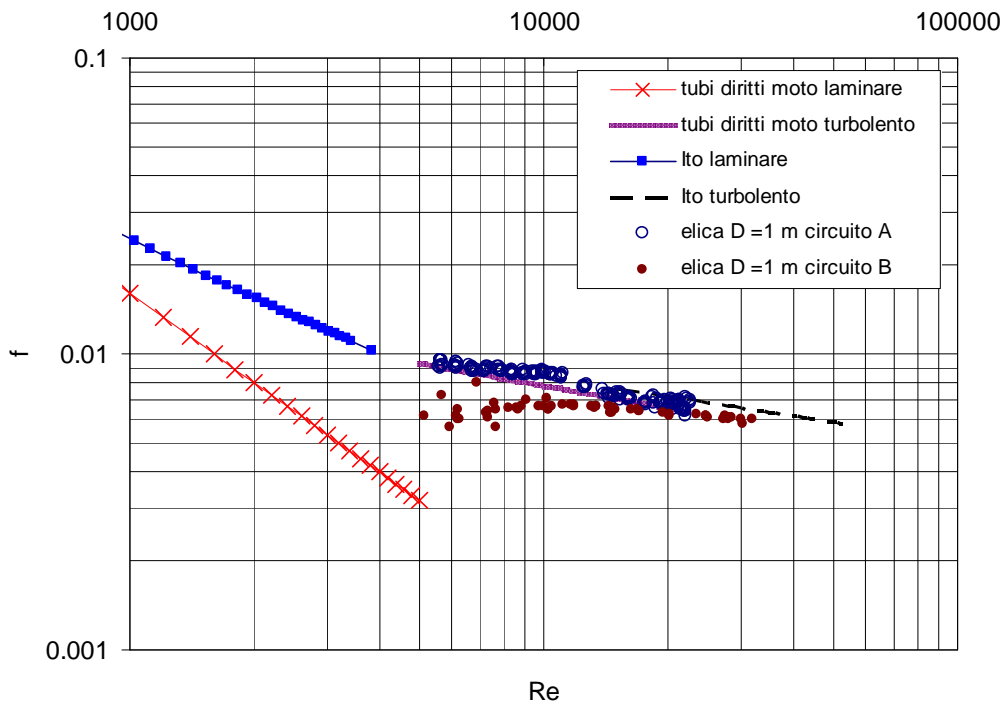


Figura 66: Fattore d'attrito sperimentale per i due circuiti di prova con valvola chiusa [D = 1 m].

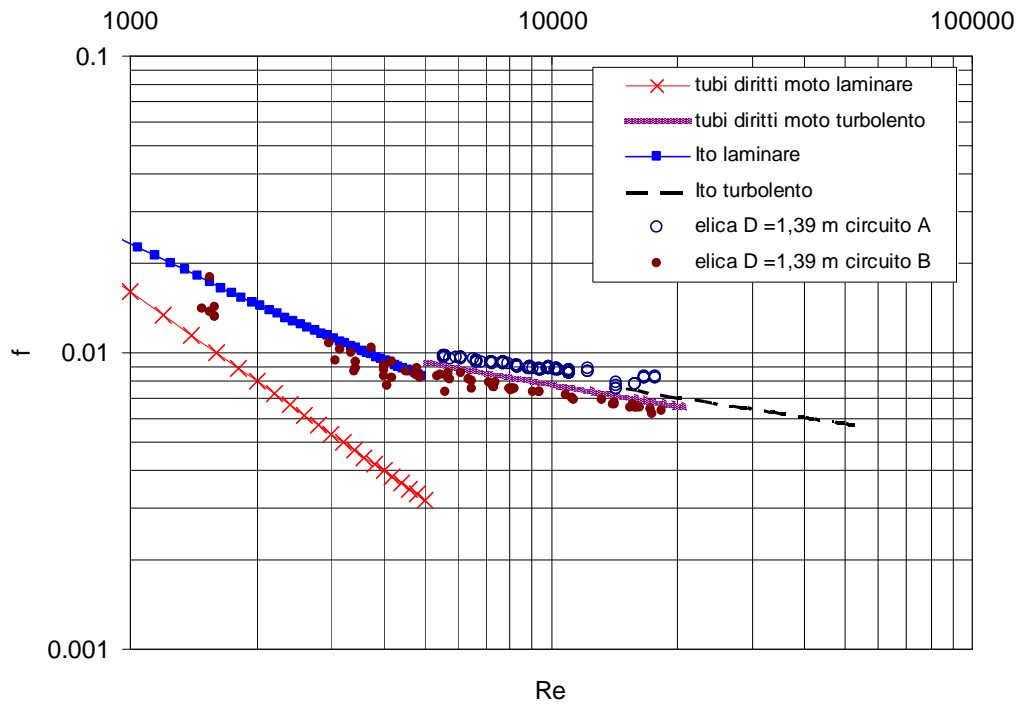


Figura 67: Fattore d'attrito sperimentale per i due circuiti di prova con valvola chiusa [D = 1,39 m].

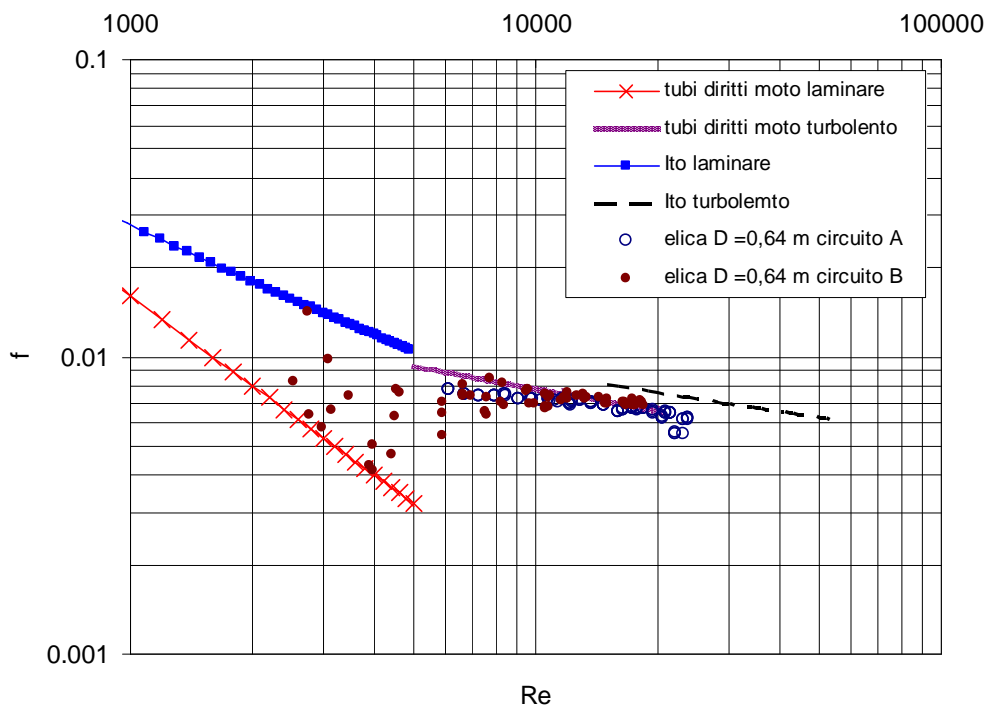


Figura 68: Fattore d'attrito sperimentale per i due circuiti di prova con valvola aperta [D = 0,64 m].

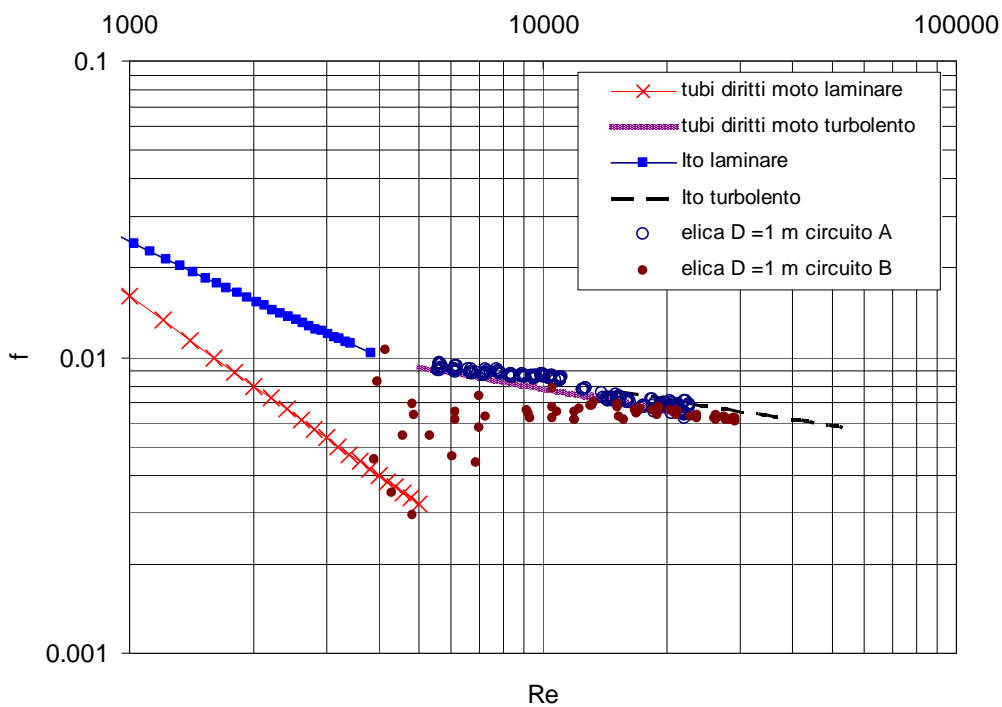


Figura 69: Fattore d'attrito sperimentale per i due circuiti di prova con valvola aperta [ $D = 1$  m].

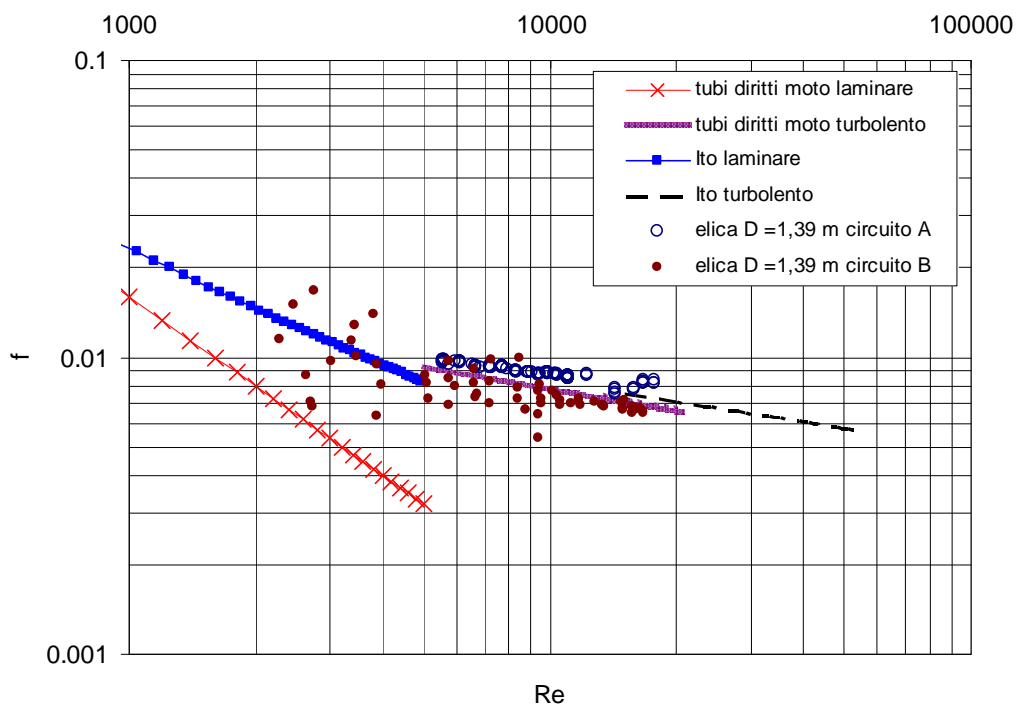


Figura 70: Fattore d'attrito sperimentale per i due circuiti di prova con valvola aperta [ $D = 1,39$  m].

## 6 Prove in deflusso bifase con circuito A.

Questo capitolo è rivolto al confronto tra i parametri ricavati dalle misurazioni sperimentali ed i risultati ottenuti mediante correlazioni teoriche: in particolare si sono ricavati il parametro di Martinelli e il moltiplicatore bifase per attrito.

I risultati sono stati ottenuti con l'utilizzo del circuito per il test delle singole sezioni di prova (circuito A) descritto nei capitoli precedenti.

### 6.1 Procedura sperimentale prove in deflusso bifase. Circuito A.

Per ogni serie di misure, si sono ricavate, dai dati acquisiti, la media e la varianza delle differenze di pressione tra la prima presa e le successive otto, la pressione assoluta dell'aria, la pressione relativa in ingresso alla sezione di prova e, per le portate minori di 400 l/h, anche la portata d'acqua; per portate maggiori di tale valore si è utilizzato un asometro con lettura su scala graduata del valore dalla portata. È stata utilizzata una centralina per la misura dei parametri ambientali (temperatura e pressione). La temperatura del fluido all'ingresso del tubo ad elica in esame è stata misurata con l'ausilio di una termocoppia.

Le prove sono state realizzate fissando la portata d'acqua e variando la portata di aria in modo discreto tra 0 (prova monofase) ed una portata massima compatibile con il fondo scala degli strumenti utilizzati

Si riporta in Tabella 37 la matrice sperimentale.

|   |           |
|---|-----------|
| Intervallo portata (W) di acqua [l/h]           | 200 – 800 |
| $\Delta W$ [l/h]                                | 100       |
| Intervallo portata ( $W_{aria}$ ) di aria [g/s] | 0 – 0,26  |
| $\Delta W_{aria}$ [g/s]                         | 0,043     |

**Tabella 37: Matrice sperimentale prove in deflusso bifase; circuito A.**

Dopo un sufficiente intervallo di tempo, dopo cui il deflusso si è ritenuto essere stabilizzato e stazionario, si è proceduto alla misura delle principali grandezze d'interesse (portate e pressioni differenziali) valutandone il valore medio e la varianza su 50 punti. Successivamente si è proceduto all'intercettazione rapida del deflusso, mediante le valvole a chiusura rapida, e alla misura mediante pesata dell'acqua intercettata per la valutazione del grado di vuoto.

## 6.2 Risultati sperimentali prove in deflusso bifase Circuito A.

### 6.2.1 Pressione nella sezione di prova. Circuito A.

La pressione media nella sezione di prova non è stata regolata nel corso delle prove, per questo motivo, poiché lo scarico è alla pressione atmosferica, la pressione media aumenta (anche se di poco) al crescere della portate d'aria e d'acqua.

La pressione media risente anche dell'assetto del circuito, infatti modifiche apportate sul condotto di scarico comportano una significativa variazione del livello della pressione media nel circuito.

La pressione media è importante perché influisce sulla densità dell'aria e quindi sulla frazione di vuoto e sul titolo. Si riportano gli andamenti delle pressioni medie nelle sezioni di prova e delle pressioni in ingresso ad esse in funzione della portata di aria.

La pressione media del circuito di prova è stata valutata con la formula seguente.

$$p_{media} = p_{ingresso} - \frac{\Delta p_{19-correcto}}{2}$$

in cui

$$\Delta p_{19-correcto} = \Delta p_{19-misurato} - \Delta p_{19-elevazione-monofase}$$

Anche se i valori della pressione in ingresso e il valore della pressione media non si discostano in modo considerevole (Tabella 37), si sono utilizzati, per il calcolo della densità dell'aria presente nel circuito, le pressioni medie nelle eliche.

Poiché la temperatura dell'aria si mantiene circa costante nel corso delle prove essa non influisce significativamente sul calcolo della densità.

Si osserva come la pressione in ingresso aumenti in modo significativo con la portata di acqua (all'incirca in modo quadratico) mentre la variazione al crescere della portata di aria dipende dalla portata di acqua: alle basse portate d'acqua la variazione è trascurabile, mentre alle alte portate si ha un aumento della pressione in ingresso alla sezione di prova.

| Portata d'acqua<br>[l/h] | Range $p_{\text{assoluta}}$ ingresso elica<br>D = 0,64 m |               | Range $p_{\text{assoluta}}$ media<br>nell'elica D = 0,64 m |               |
|--------------------------|--|---------------|--|---------------|
|                          | [bar]  | [MPa]         | [bar]  | [MPa]         |
| 200                      | 1,41 – 1,42  | 0,141 – 0,142 | 1,27 – 1,31  | 0,127 – 0,131 |
| 300                      | 1,49 – 1,61  | 0,149 – 0,161 | 1,34 – 1,45  | 0,134 – 0,145 |
| 400                      | 1,6 – 1,83   | 0,16 – 0,183  | 1,42 – 1,61  | 0,142 – 0,161 |
| 600                      | 1,88 – 2,41  | 0,188 – 0,241 | 1,65 – 2,03  | 0,165 – 0,203 |
| 800                      | 2,3 – 2,92   | 0,23 – 0,292  | 1,95 – 2,44  | 0,195 – 0,244 |

**Tabella 38: Pressioni in ingresso e medie nella sezione di prova elica D = 0,64 m. Circuito A.**

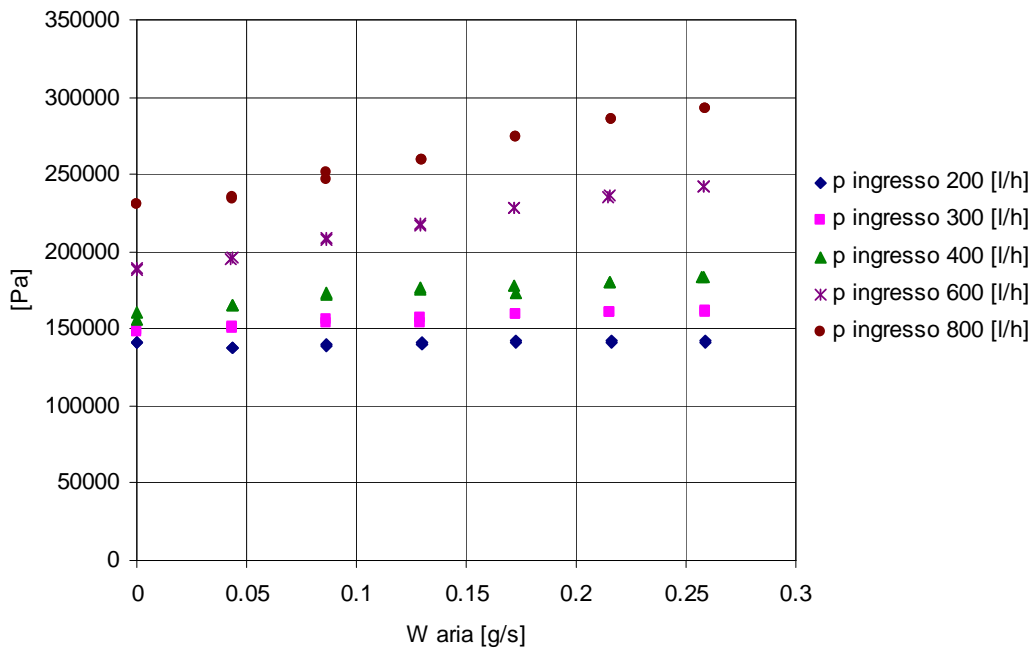
| Portata d'acqua<br>[l/h] | Range $p_{\text{assoluta}}$ ingresso elica<br>D = 1 m |               | Range $p_{\text{assoluta}}$ media<br>nell'elica D = 1 m |               |
|--------------------------|---|---------------|---|---------------|
|                          | [bar]   | [MPa]         | [bar]   | [MPa]         |
| 200                      | 1,44 – 1,48   | 0,144 – 0,148 | 1,31 – 1,40   | 0,131 – 0,14  |
| 300                      | 1,55 – 1,7  | 0,155 – 0,17  | 1,40 – 1,58   | 0,14 – 0,158  |
| 400                      | 1,75 – 1,95   | 0,175 – 0,195 | 1,53 – 1,76   | 0,153 – 0,176 |
| 400                      | 1,89 – 2,28   | 0,189 – 0,228 | 1,68 – 2,07   | 0,168 – 0,207 |
| 600                      | 2,99 – 3,26   | 0,299 – 0,326 | 2,44 – 2,98   | 0,244 – 0,298 |
| 800                      | 3,75 – 4,47   | 0,375 – 0,447 | 2,85 – 4,14   | 0,285 – 0,414 |

**Tabella 39: Pressioni in ingresso e medie nella sezione di prova elica D = 1 m. Circuito A.**

| Portata d'acqua<br>[l/h] | Range $p_{\text{assoluta}}$ ingresso elica<br>D = 1,39 m |               | Range $p_{\text{assoluta}}$ media<br>nell'elica D = 1,39 m |               |
|--------------------------|--|---------------|--|---------------|
|                          | [bar]  | [MPa]         | [bar]  | [MPa]         |
| 200                      | 1,47 – 1,49  | 0,147 – 0,149 | 1,33 – 1,35  | 0,133 – 0,135 |
| 300                      | 1,59 – 1,71  | 0,159 – 0,171 | 1,4 – 1,52   | 0,14 – 0,152  |

**Tabella 40: Pressioni in ingresso e medie nella sezione di prova elica D = 1,39 m. Circuito A.**

In Figura 71, Figura 72 e Figura 73 sono riportati gli andamenti della pressione assoluta in ingresso alle sezioni di prova in funzione della portata d'aria per le diverse portate d'acqua testate.



**Figura 71: Andamento pressioni in ingresso alla sezione di prova nell'elica con D = 0,64 m. Circuito A.**



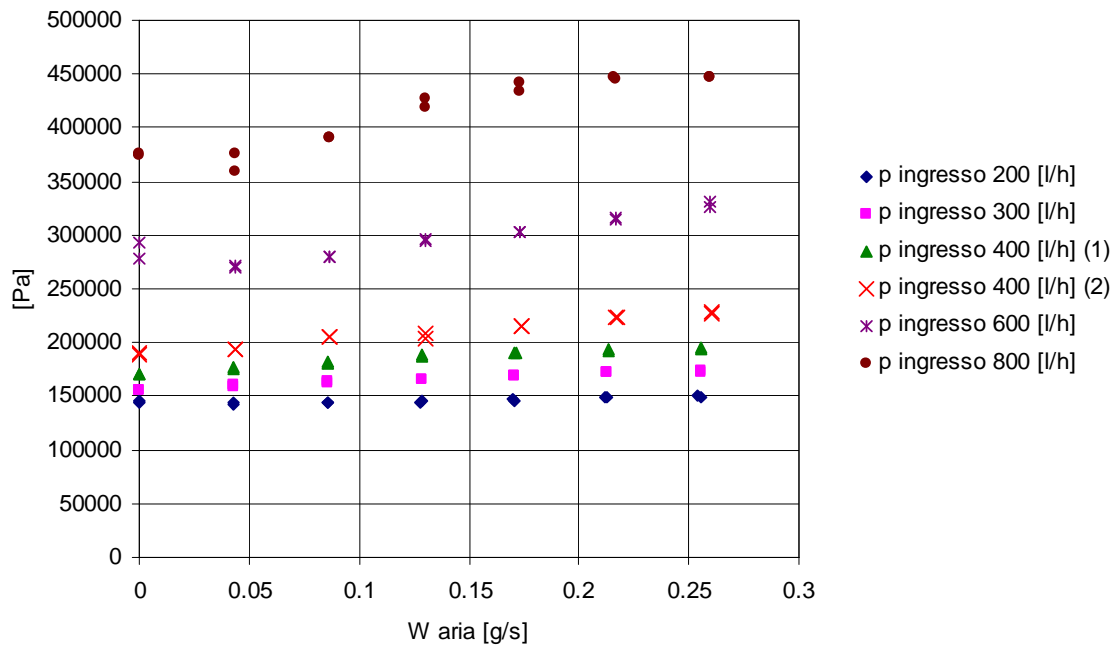


Figura 72: Andamento pressioni in ingresso alla sezione di prova nell'elica con  $D = 1$  m. Circuito A.

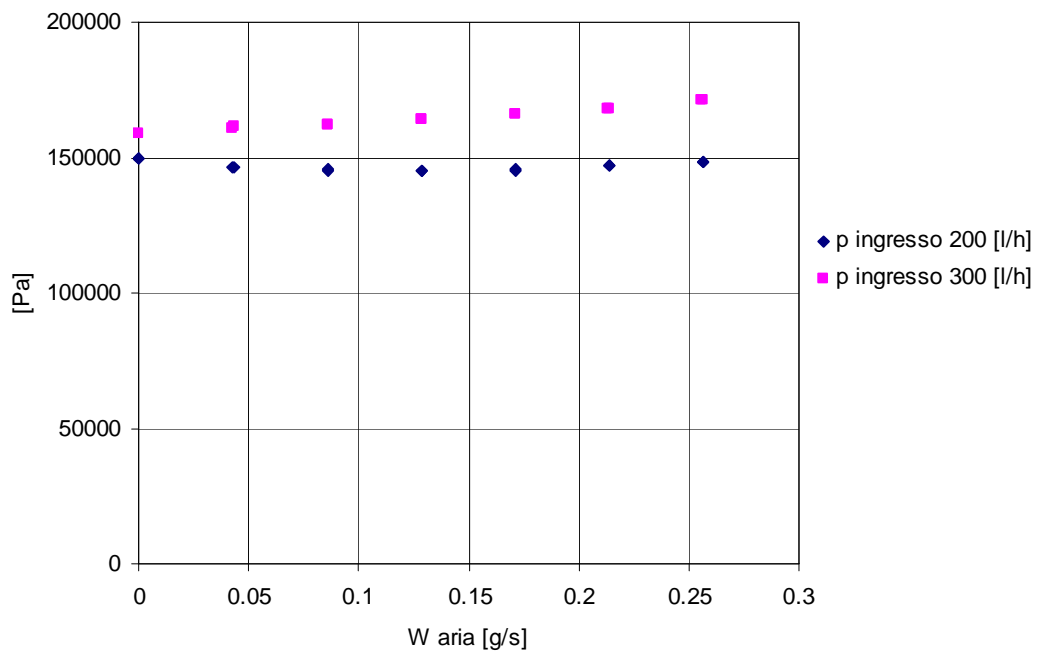


Figura 73: Andamento pressioni in ingresso alla sezione di prova nell'elica con  $D = 1,39$  m. Circuito A.

### 6.2.2 Calcolo della portata in massa di aria. Circuito A.

Per il calcolo della portata d'aria, dopo aver letto tramite l'asometro il valore in NI/h, è stato necessario procedere alla conversione in kg/s attraverso la formula qui riportata, poiché la densità dell'aria varia con la pressione e la temperatura:

$$W_{aria} (kg / s) = W_{aria} (l / h) \cdot \rho_{no\ min\ ale} \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{P_{assoluta\_aria} (bar)}{P_{no\ min\ ale} (bar)}} \cdot \sqrt{\frac{T_{no\ min\ ale} (K)}{T_{ambiente} (K)}} \cdot \frac{1}{3600}$$

in cui:

$$T_{nominale} = 20^{\circ}C$$

$$P_{nominale} = 1,013\ bar$$

$$\rho_{nominale} = \text{densità dell'acqua a } 20^{\circ}C \text{ e } 1,013\ bar = 1,205\ kg/m^3.$$

La scala dei rotometri è riportata in condizioni nominali (temperatura di 20°C e pressione pari a 1,013 bar). La pressione di esercizio dei rotometri nelle prove eseguite è stata di circa 6 bar.

L'asometro utilizzato in questa campagna di prove (le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 41) è quello con portata minima tra quelli disponibili per questo circuito di prova.

| Tipo      | Matricola | Fluido | Portata<br>[NI/h] | Pressione<br>[mbar] | Temperatura<br>[°C] |
|-----------|-----------|--------|-------------------|---------------------|---------------------|
| N5 2300 B | 15009     | aria   | 340               | 760                 | 20                  |

**Tabella 41: Caratteristiche asometro utilizzato nelle prove. Circuito A.**

Le portate d'aria utilizzate in questa serie di misure sono comprese tra 0,043 g/s e 0,26 g/s, con un incremento di 0,043 g/s per ogni *step*.

Per ogni serie di prove al variare della portata d'acqua si è effettuata una prima acquisizione in deflusso monofase, in questo modo si è potuto avere un controllo sistematico attraverso un confronto immediato dei risultati ottenuti con le prove in monofase preliminari precedentemente descritte. Questa metodologia consente di valutare eventuali variazioni geometriche o fisiche del circuito utilizzato.

### 6.2.3 Grado di vuoto, titolo in massa e titolo volumetrico. Circuito A.

La procedura per il calcolo del grado di vuoto richiede la valutazione della massa di acqua presente nell'elica in condizioni di deflusso monofase. Tale valore viene quindi rapportato con quello dell'acqua presente al momento della chiusura delle valvole di intercettazione rapida.

Si è valutato il grado di vuoto  $\alpha$  attraverso la formula:

$$\alpha = 1 - \frac{M_{bifase}}{M_{monofase}} = \frac{V_{gas}}{V_{monofase}}$$

in cui  $M$  è la massa in grammi e  $V$  il volume in  $m^3$ .

Per il calcolo del titolo in massa  $x$  e del titolo volumetrico  $\beta$  si sono utilizzate le formule:

$$x = \frac{W_{gas}}{W_{totale}}$$

$$\beta = \frac{Q_{gas}}{Q_{totale}}$$

$$Q_{totale} = \frac{W_{totale}}{\rho_{bifase}} = \frac{W_{totale}}{\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l}$$

in cui  $W$  è la portata in massa in g/s e  $Q$  è la portata volumetrica in  $m^3/s$ .

Dalla Figura 74 alla Figura 84 è riportato l'andamento del grado di vuoto in funzione della portata d'aria per le diverse portate di acqua ed in funzione del titolo in massa e del titolo volumetrico.

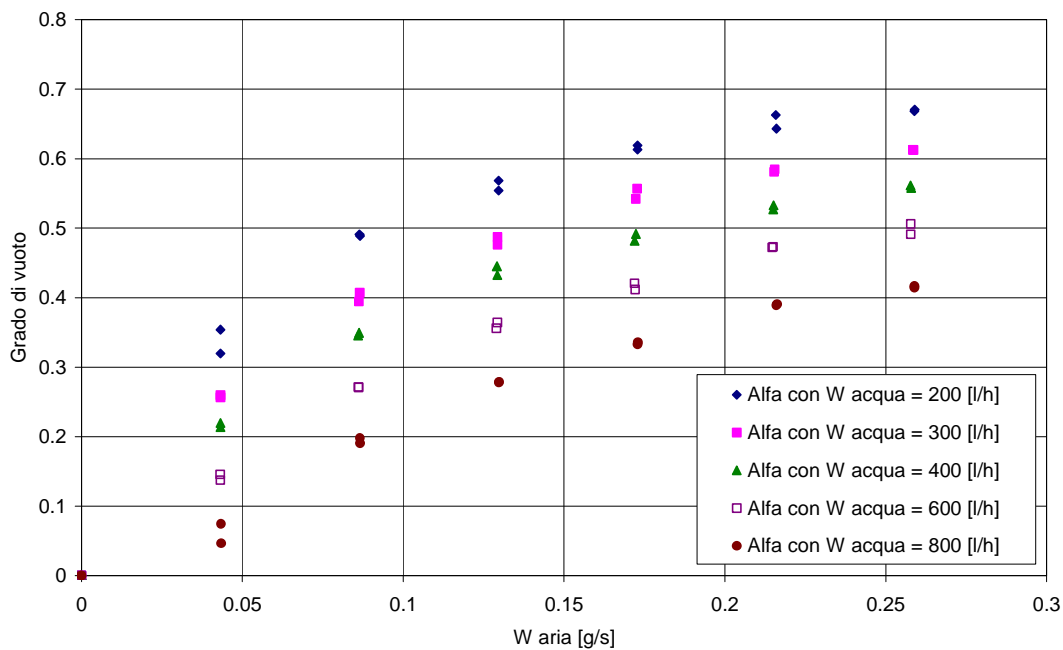


Figura 74: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria elica  $D = 0,64$  m. Circuito A.

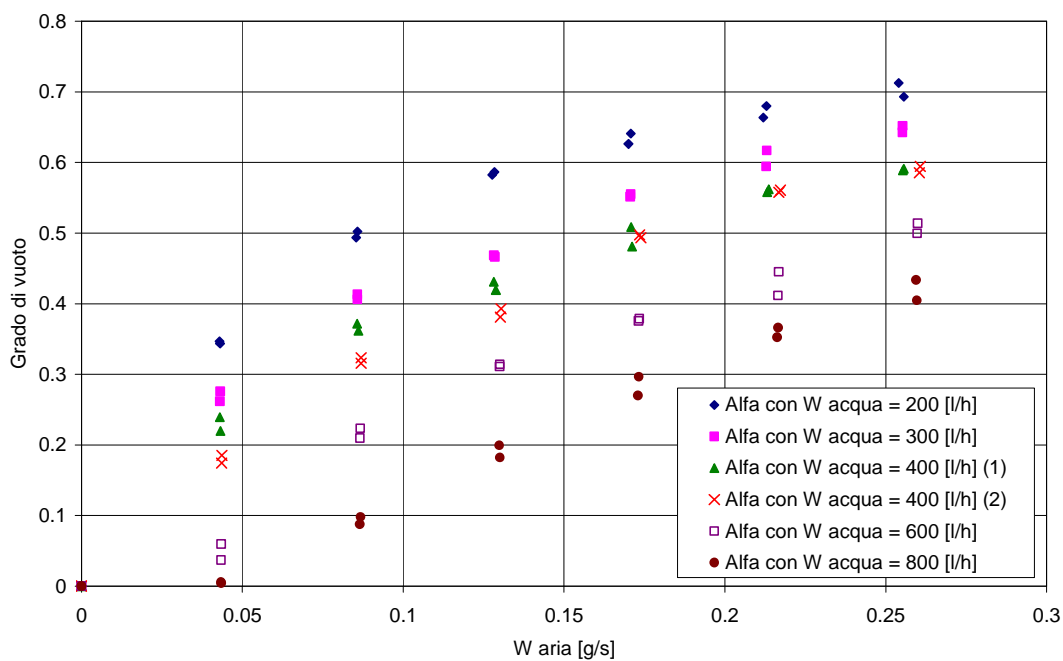


Figura 75: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria elica  $D = 1$  m. Circuito A.

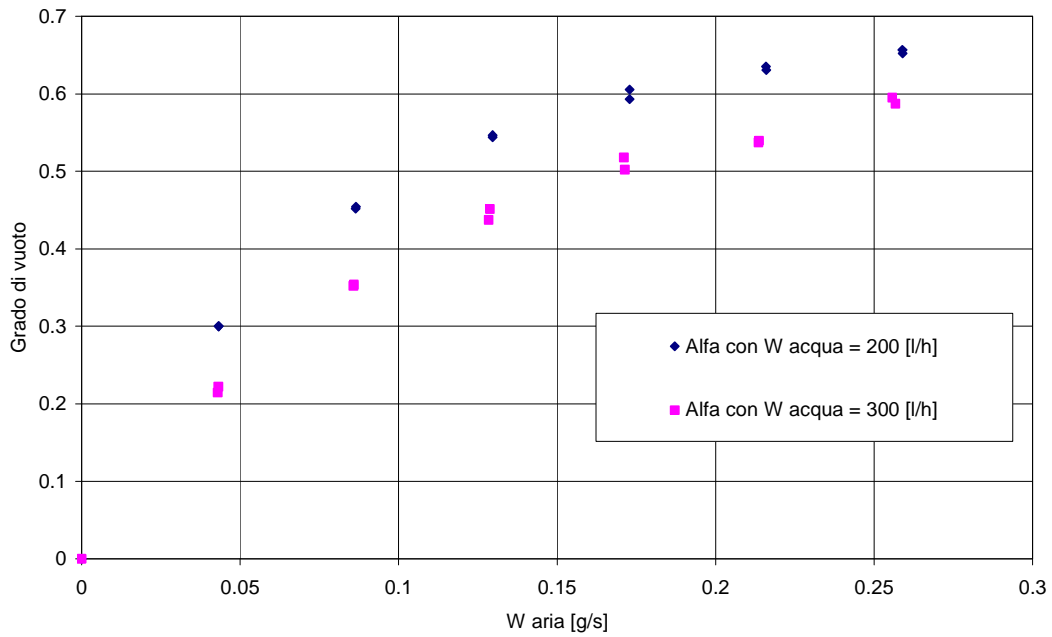


Figura 76: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria elica  $D = 1,39$  m. Circuito A.

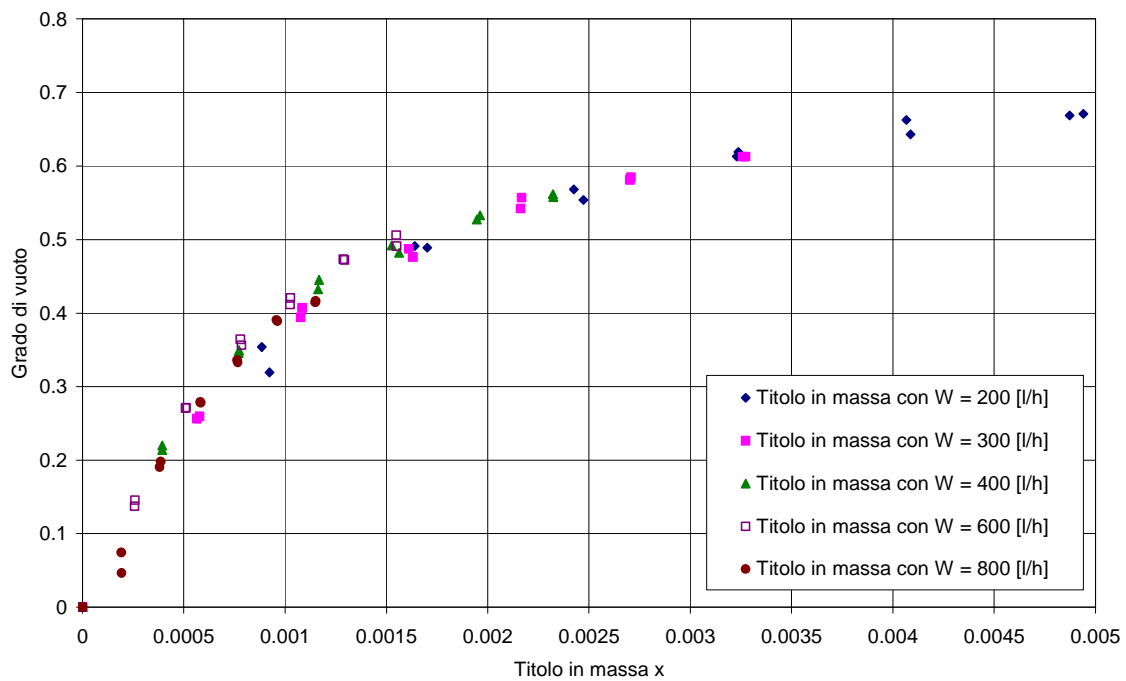


Figura 77: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione del titolo in massa  $x$ , elica  $D = 0,64$  m. Circuito A.

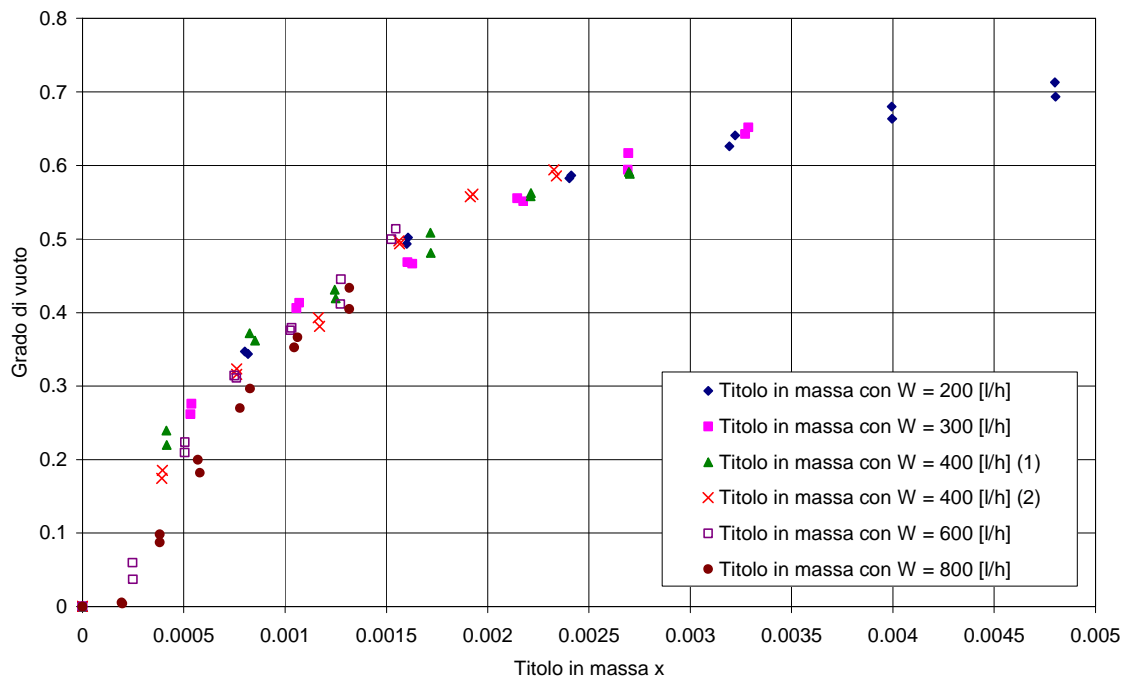


Figura 78: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione del titolo in massa  $x$ , elica  $D = 1$  m. Circuito A.

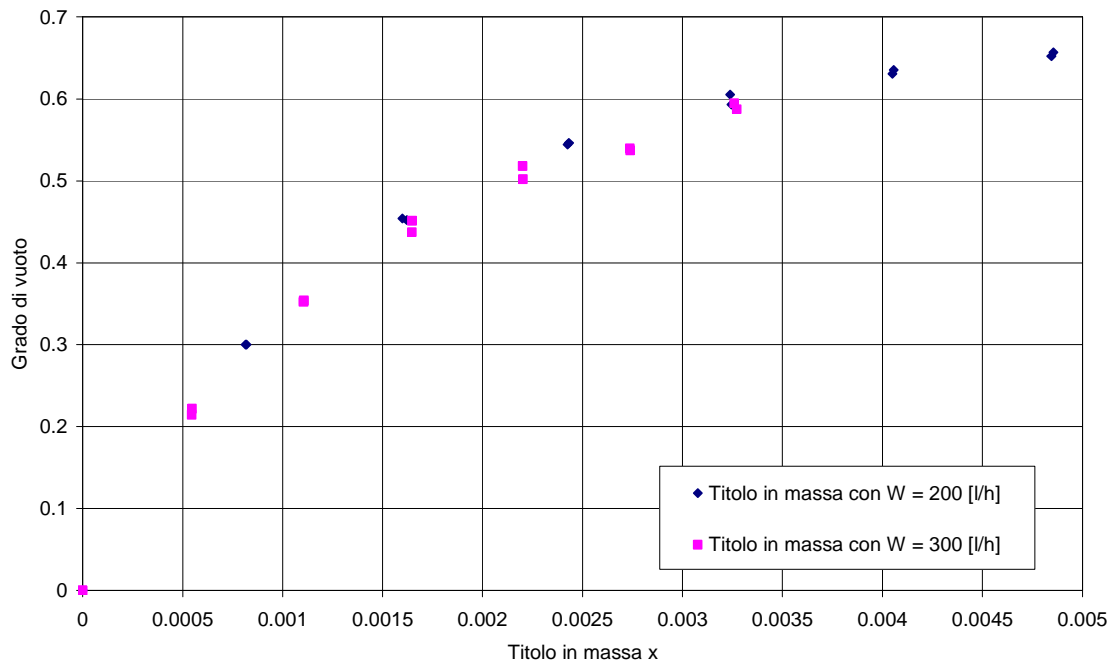


Figura 79: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione del titolo in massa  $x$ , elica  $D = 1,39$  m. Circuito A.

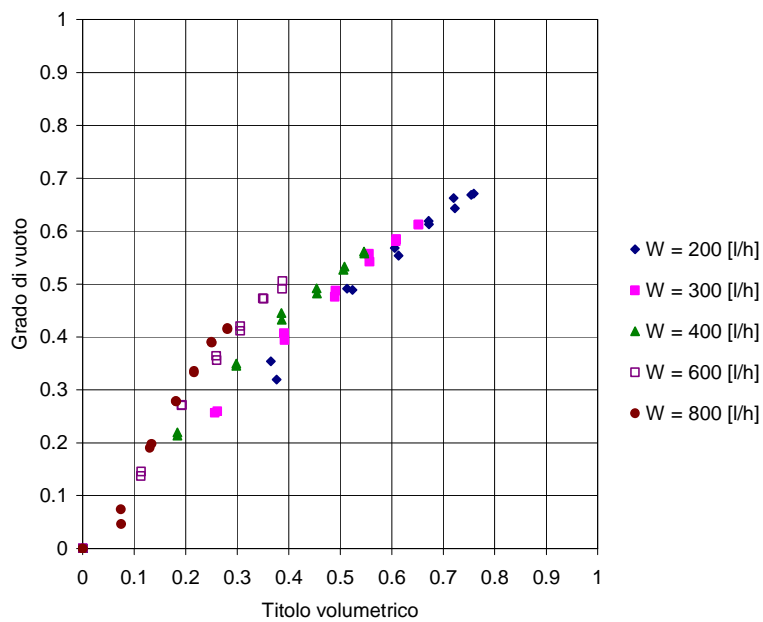


Figura 80: Andamento grado di vuoto in funzione del titolo volumetrico; elica D = 0,64 m. Circuito A.

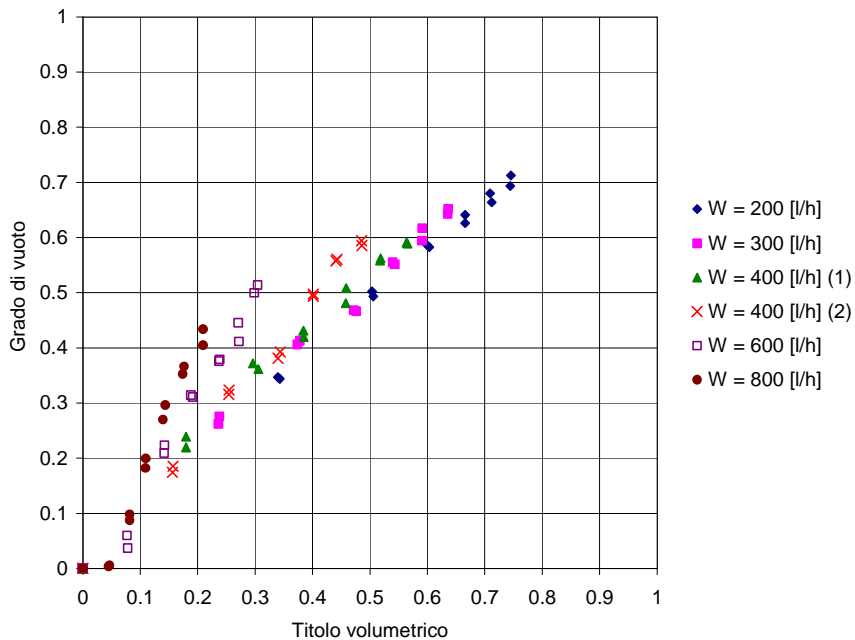


Figura 81: Andamento grado di vuoto in funzione del titolo volumetrico; elica D = 1 m. Circuito A.

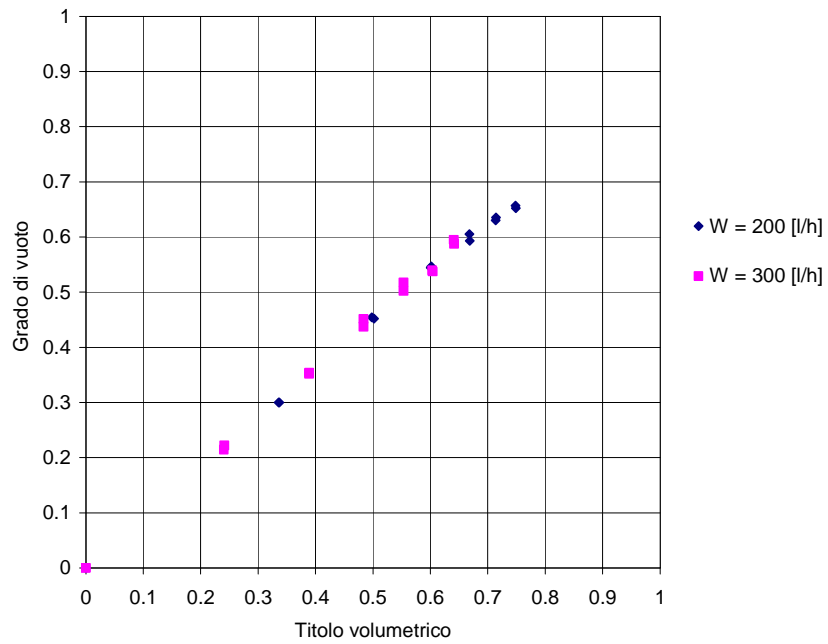


Figura 82: Andamento grado di vuoto in funzione del titolo volumetrico; elica  $D = 1,39$  m. Circuito A.

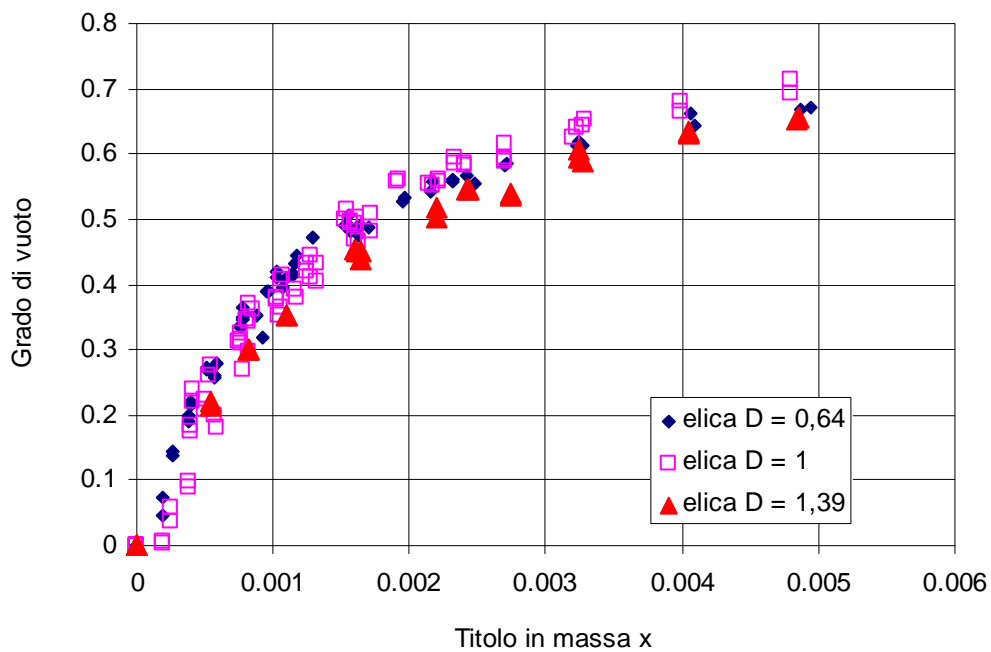


Figura 83: Andamento grado di vuoto in funzione del titolo in massa x medio per le eliche. Circuito A.



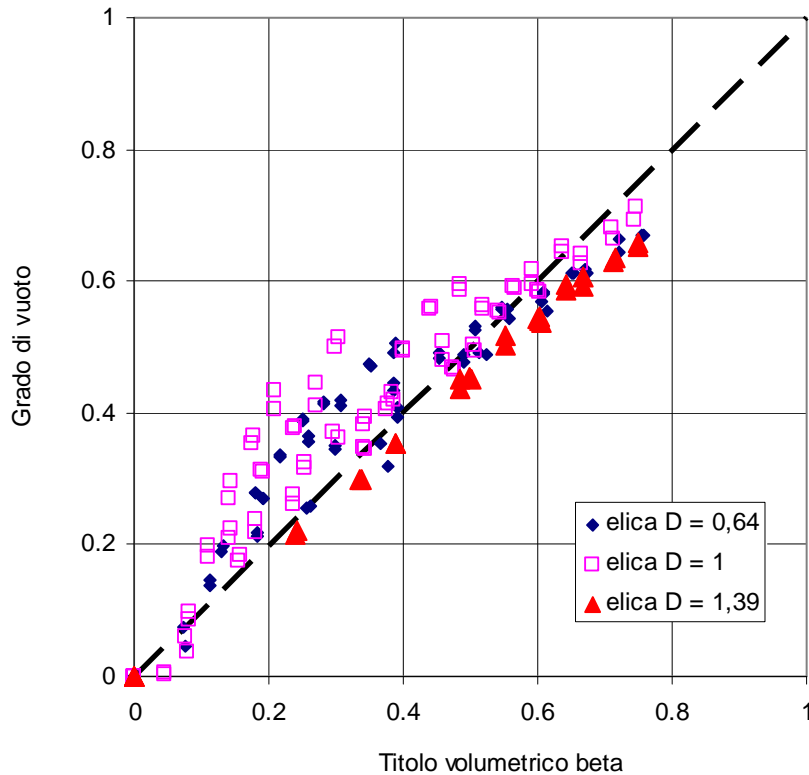


Figura 84: Andamento grado di vuoto in funzione del titolo volumetrico medio per le eliche. Circuito A.

Per quasi tutte le portate di liquido testate il grado di vuoto risulta essere maggiore del titolo volumetrico (Figura 84), fenomeno che si evidenzia maggiormente per le portate d'acqua più elevate. Questo indica che lo *slip ratio*  $S$  (cioè il rapporto tra le velocità medie della fase gassosa  $u_g$  e della fase liquida  $u_l$ ) è minore di uno per gran parte dei punti sperimentali, per cui la fase liquida percorre l'elica a velocità maggiore della fase gassosa. Lo *slip ratio*  $S$  è stato calcolato con la formula:

$$S = \frac{u_g}{u_l}$$

| Portate d'acqua              | Elica D = 0,64 m | Elica D = 1 m | Elica D = 1,39 m |
|------------------------------|------------------|---------------|------------------|
| W H <sub>2</sub> O > 400 l/h | 0,8 < S < 1,5    | 0,6 < S < 1,3 | 1,1 < S < 1,6    |
| W H <sub>2</sub> O < 400 l/h | 0,5 < S < 1      | 0,3 < S < 0,9 | _____            |

Tabella 42: Valori dello *slip ratio*. Circuito A.

### 6.2.4 Velocità media della miscela. Circuito A.

Si è calcolata la velocità media della miscela  $j$  in m/s, mediante la formulazione seguente:

$$j = \frac{Q_{totale}}{A}$$

dove la  $Q$  rappresenta la portata volumetrica in  $m^3/s$  ed  $A$  è l'area di passaggio della sezione dei tubi elicoidali ed è pari a circa  $113 \text{ mm}^2$ .

Da Figura 85 a Figura 90 sono riportati gli andamenti della velocità media della miscela in funzione del titolo in massa  $x$  e del titolo volumetrico  $\beta$ .

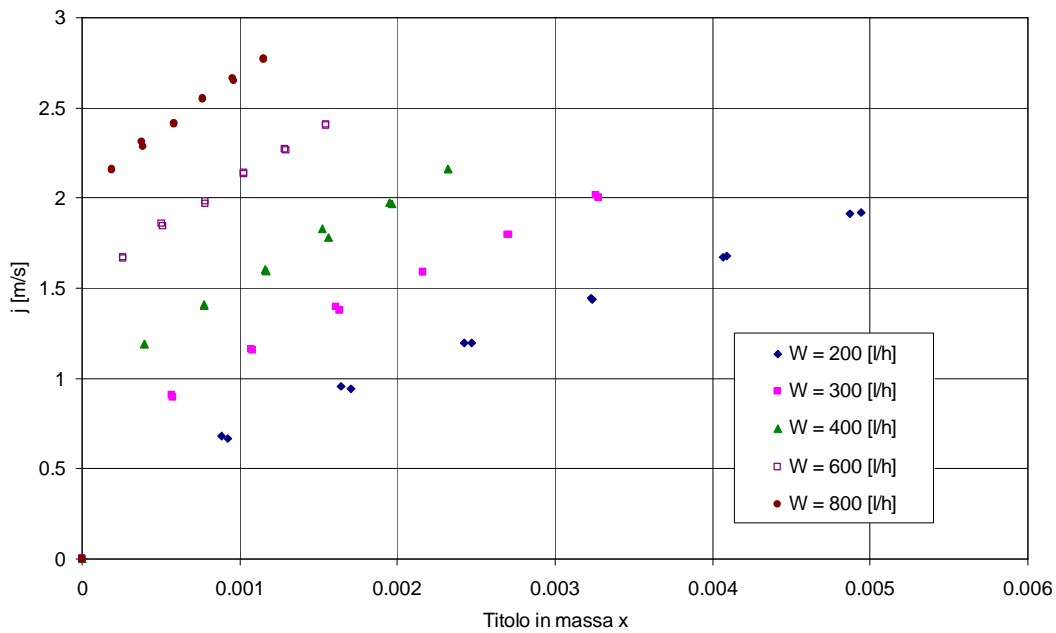


Figura 85: Velocità della miscela in funzione del titolo in massa  $x$ ; elica  $D = 0,64 \text{ m}$ . Circuito A.

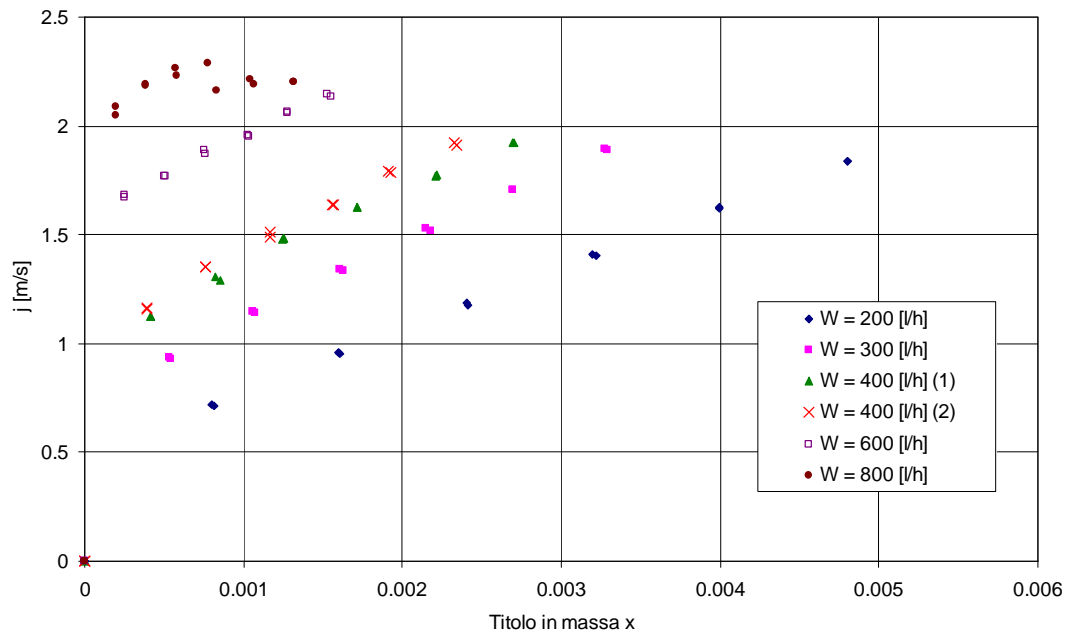


Figura 86: Velocità della miscela in funzione del titolo in massa x; elica D = 1 m. Circuito A.

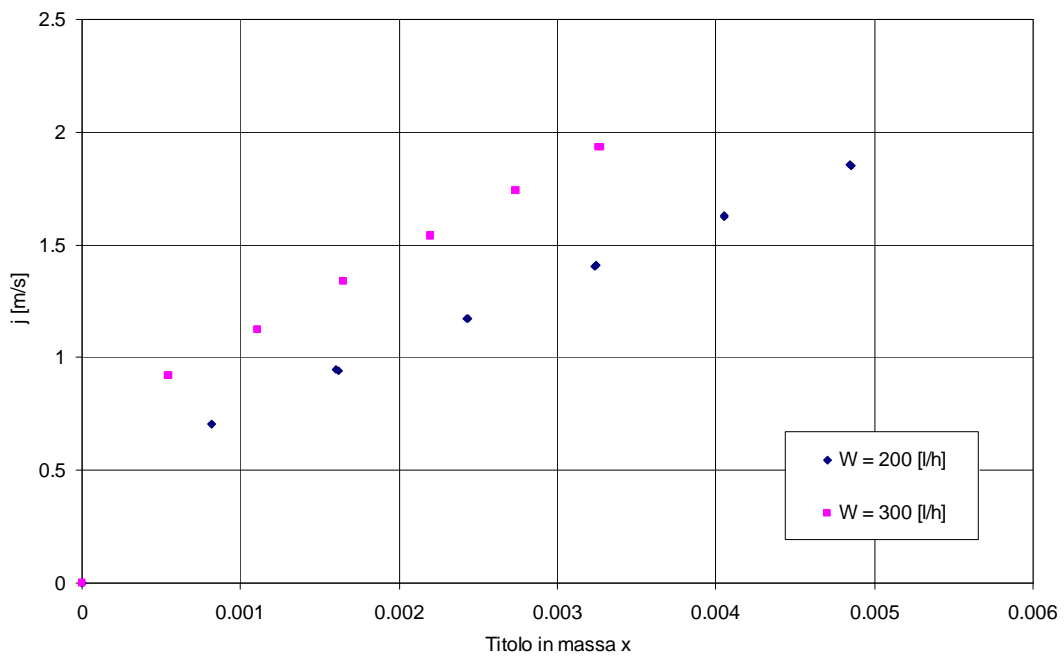


Figura 87: Velocità della miscela in funzione del titolo in massa x; elica D = 1,39 m. Circuito A.

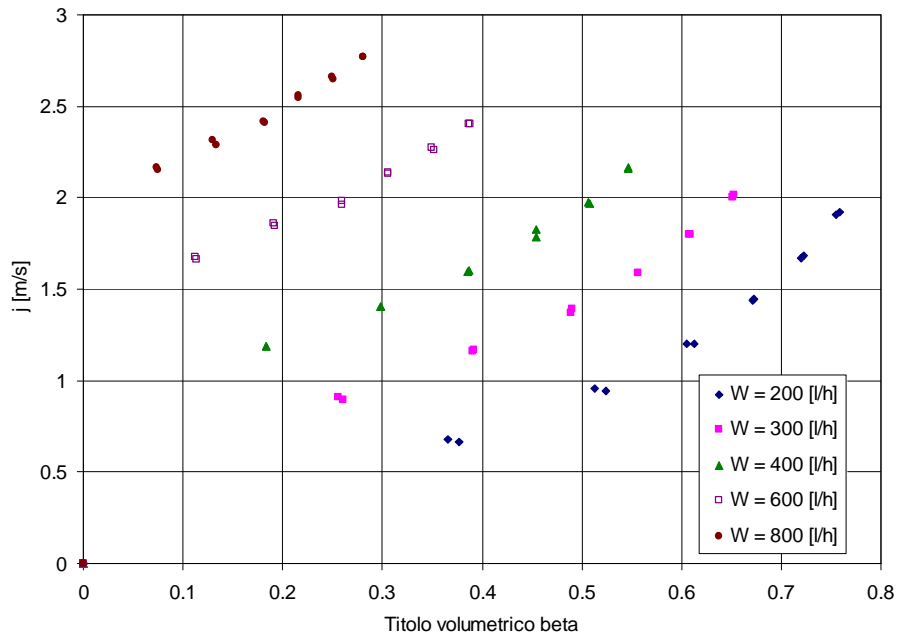


Figura 88: Velocità della miscela in funzione del titolo volumetrico  $\beta$ ; elica  $D = 0,64$  m. Circuito A.

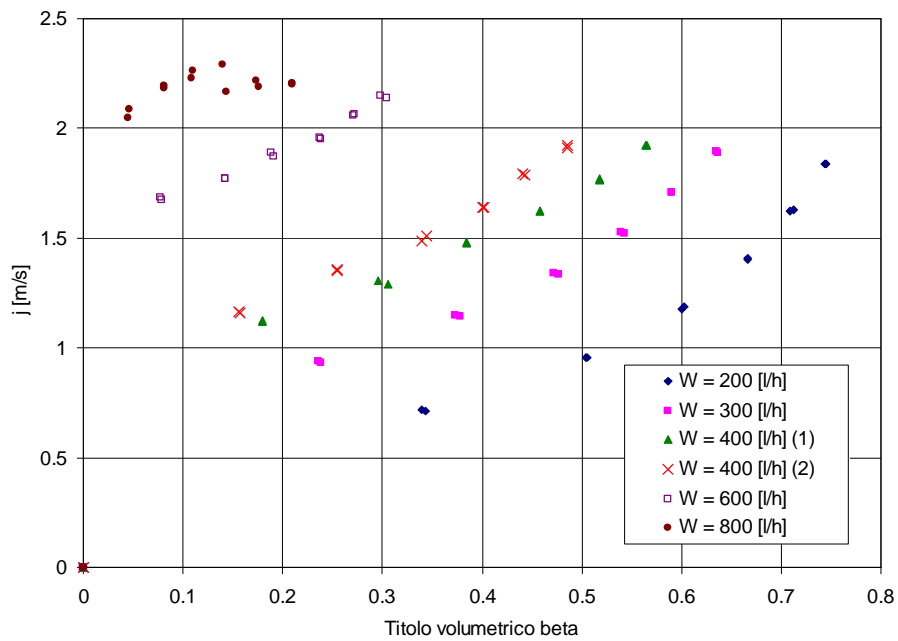
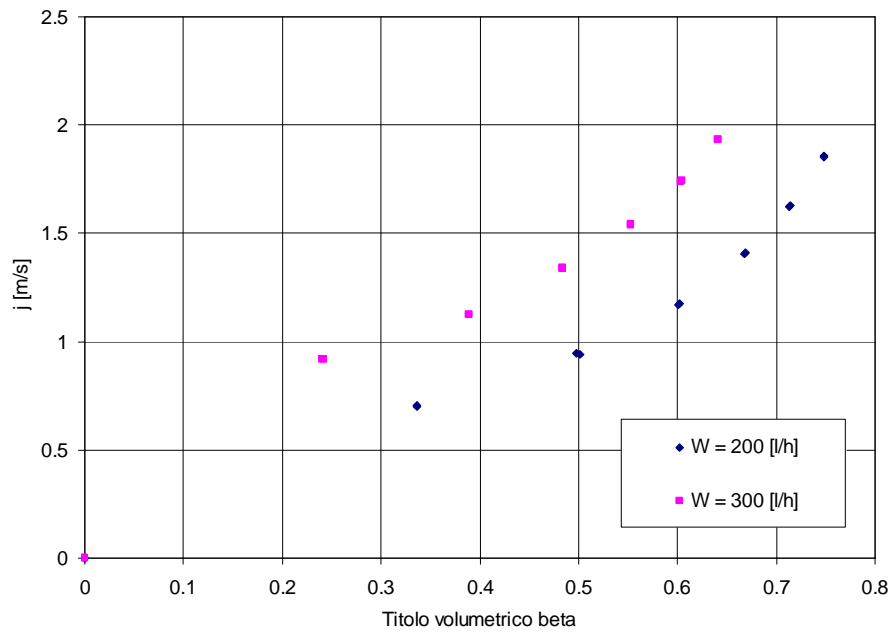


Figura 89: Velocità della miscela in funzione del titolo volumetrico  $\beta$ ; elica  $D = 1$  m. Circuito A.



**Figura 90: Velocità della miscela in funzione del titolo volumetrico  $\beta$ ; elica  $D = 1,39$  m. Circuito A.**

Dall'analisi dei diagrammi si desume che la velocità media della miscela, oltre a crescere con continuità all'aumentare sia del titolo in massa  $x$  che del titolo volumetrico  $\beta$ , e quindi all'aumentare della portata d'aria, incrementa il suo valore anche con l'aumentare della portata d'acqua.

Per portate d'acqua maggiori di 400 l/h si hanno velocità medie della miscela elevate, oltre i due metri al secondo.

### 6.2.5 Differenze di pressione bifase. Circuito A.

Si riporta in Figura 91 lo schema di collegamento tra la sezione di prova ed i trasduttori di pressione differenziali. Da questo si ha che:

$$p_x = p_B$$

$$p_y = p_A + \rho_{acqua} \cdot g \cdot \Delta z$$

$$\Delta p_{misurato} = p_x - p_y = p_B - (p_A + \rho_{acqua} \cdot g \cdot \Delta z)$$

quindi :

$$\Delta p_{misurato} = p_B - p_A - \rho_{acqua} \cdot g \cdot \Delta z$$

$$p_B - p_A = \Delta p_{misurato} + \rho_{acqua} \cdot g \cdot \Delta z$$

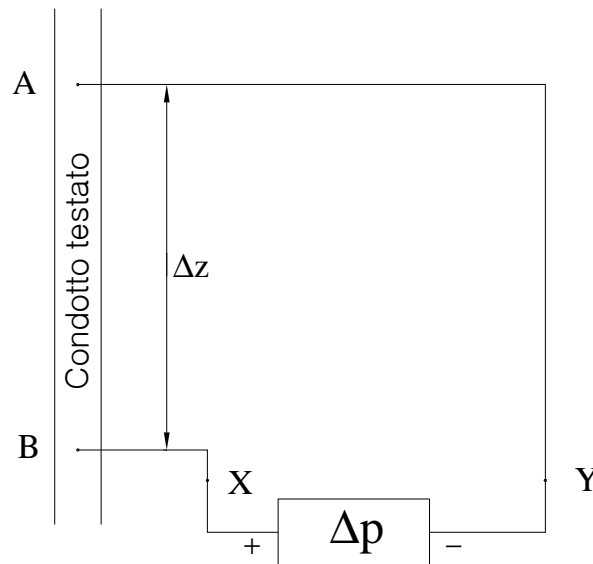


Figura 91: Schema collegamento trasduttori di pressione.

La caduta di pressione  $p_B - p_A$  in un deflusso bifase risulta essere la somma di tre componenti:

$$p_B - p_A = \Delta p_{\text{attrito}} + \Delta p_{\text{elevazione}} + \Delta p_{\text{accelerazione}}$$

dove:

$$\Delta p_{\text{elevazione}} = \rho \cdot g \cdot \Delta z(1, i)$$

Il termine di accelerazione viene trascurato poiché non si hanno significative variazioni di velocità.

Poiché:

$$p_B - p_A = \Delta p_{\text{attrito}} + \Delta p_{\text{elevazione-bifase}}$$

in cui

$$\Delta p_{\text{elevazione-bifase}} = \rho_{\text{bifase}} \cdot g \cdot \Delta z(1, i)$$

con:

$$\rho_{\text{bifase}} = \alpha \cdot \rho_g + (1 - \alpha) \cdot \rho_l$$

in cui  $\rho_g$  e  $\rho_l$  sono rispettivamente la densità della fase gassosa e della fase liquida; si è potuto ricavare le componenti delle cadute di pressione riferite al solo attrito:

$$\Delta p_{\text{attrito}} = (p_B - p_A) - \Delta p_{\text{elevazione-bifase}} = (p_B - p_A) - [\alpha \cdot \rho_{\text{aria}} + (1 - \alpha) \cdot \rho_{\text{acqua}}] \cdot g \cdot \Delta z$$

I diagrammi relativi alle cadute di pressione misurate e alle cadute di pressione per attrito sono riportate in Appendice B.

### 6.2.6 Parametro di Martinelli e moltiplicatori bifase per attrito. Circuito A.

Al fine di confrontare le formulazioni presenti in letteratura, per il calcolo del fattore di moltiplicazione bifase per tubi dritti, con i risultati ottenuti dall'analisi delle prove effettuate, si è valutato il parametro di Martinelli  $\chi^2$  nelle condizioni sperimentali e i moltiplicatori bifase per attrito  $\Phi_{lo}^2$  e  $\Phi_{go}^2$  con le seguenti formulazioni:

$$\chi^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{attrito, monofase-liquido}}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{attrito, monofase-gas}}}$$

$$\Phi_{lo}^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{bifase}}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{monofase-acqua}}}$$

$$\Phi_{go}^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{bifase}}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{monofase-gas}}}$$

in cui i gradienti di pressione in condizioni di deflusso monofase sono stati così calcolati:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{monofase-acqua/gas}} = 4 \cdot f_{\text{acqua/gas}} \cdot \frac{\rho_{\text{acqua/gas}} \cdot u_{\text{acqua/gas}}^2}{2} \cdot \frac{L}{d}$$

Il fattore di attrito  $f$ , nella formula precedente, è stato valutato mediante le correlazioni di Ito per deflusso laminare e per deflusso turbolento in condizioni monofase.

In Figura 92, Figura 93 e Figura 94 è rappresentato, per le tre eliche, l'andamento del moltiplicatore bifase per attrito, per ogni tratto di tubazione preso in esame in questa analisi, in funzione del parametro di Martinelli: la tendenza della distribuzione dei



punti è in accordo con le previsioni dei modelli e delle correlazioni sperimentali reperibili in letteratura.

Successivamente al calcolo di questi parametri, utilizzando i dati sperimentali, si è proceduto con il loro confronto con il modello di Lockhart - Martinelli le cui formule sono qui riportate:

$$\Phi_l^2 = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2}$$

$$\Phi_g^2 = 1 + C\chi + \chi^2$$

Il parametro  $C$  dipende dal tipo di deflusso (Tabella 43) ed è compreso per i tubi dritti tra 5 e 20. Si sono tracciati i moltiplicatori ricavati per moto turbolento di entrambe le fasi ( $C = 20$ ) e per moto laminare di entrambe le fasi ( $C = 5$ ).

| Deflusso fase liquida. | Deflusso fase gassosa. | Coefficiente $C$ . |
|------------------------|------------------------|--------------------|
| turbolento             | turbolento             | 20                 |
| turbolento             | laminare               | 10                 |
| laminare               | turbolento             | 12                 |
| laminare               | laminare               | 5                  |

**Tabella 43: Coefficiente  $C$ .**

Dal confronto tra i risultati del modello ed i risultati dell'analisi sperimentale risulta che i valori dei moltiplicatori bifase previsti dal modello di Lockhart - Martinelli sono inferiori a quelli ottenuti applicando le formulazioni ai dati sperimentali.

Xin e al. applicando il modello di Lockhart - Martinelli a condotti elicoidali con sezione anulare ha trovato per il coefficiente  $C$  il valore di 10,64. Per ottenere un buon accordo con i dati sperimentali del presente lavoro di ricerca per le tre eliche il parametro  $C$  deve essere pari a 36,85.

Da Figura 92 a Figura 99 sono riportati i diagrammi dei punti sperimentali ed i confronti effettuati.

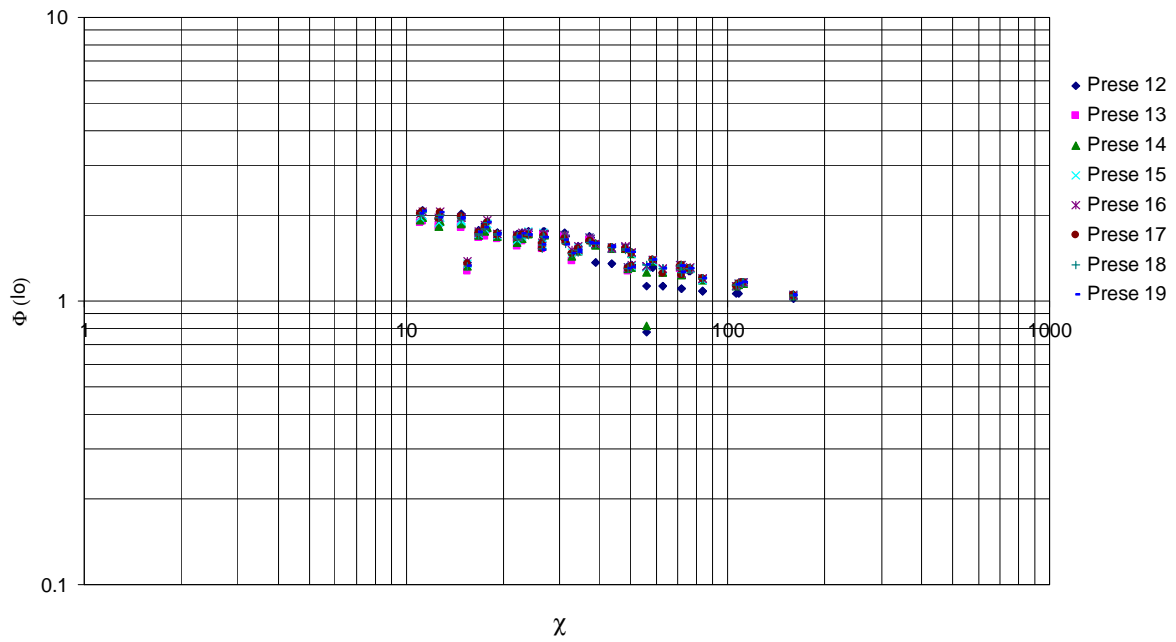


Figura 92: Andamento  $\chi$  e moltiplicatore bifase liquido. Elica D = 0,64 m. Circuito A.

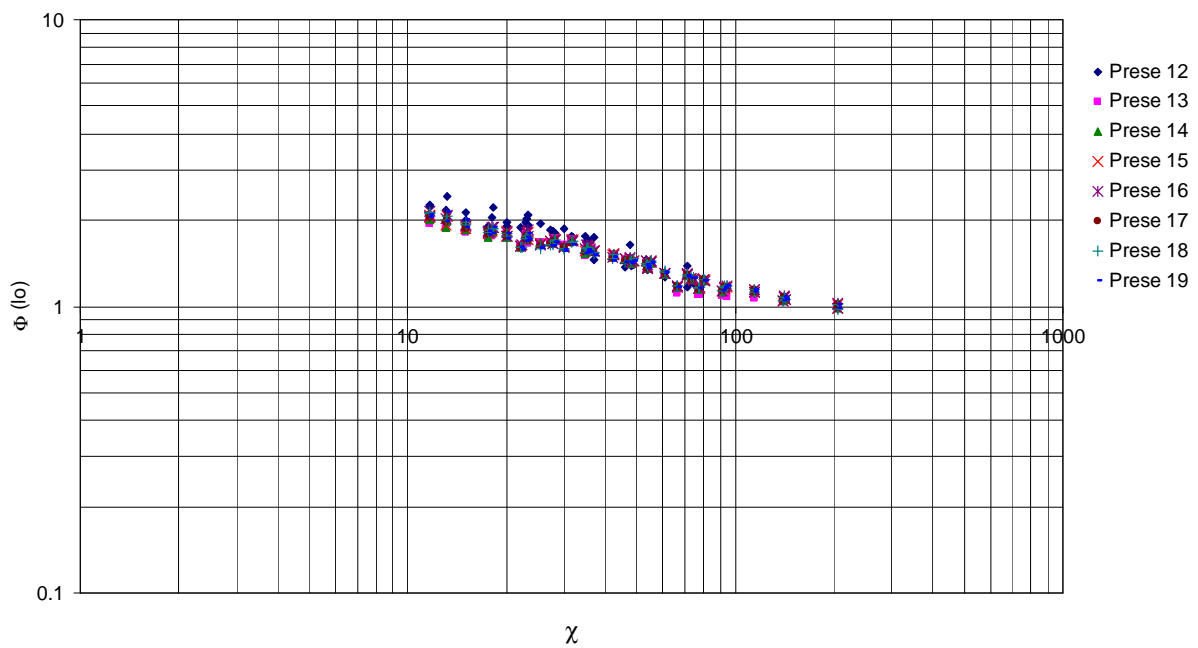


Figura 93: Andamento  $\chi$  e moltiplicatore bifase liquido. Elica D = 1 m. Circuito A.

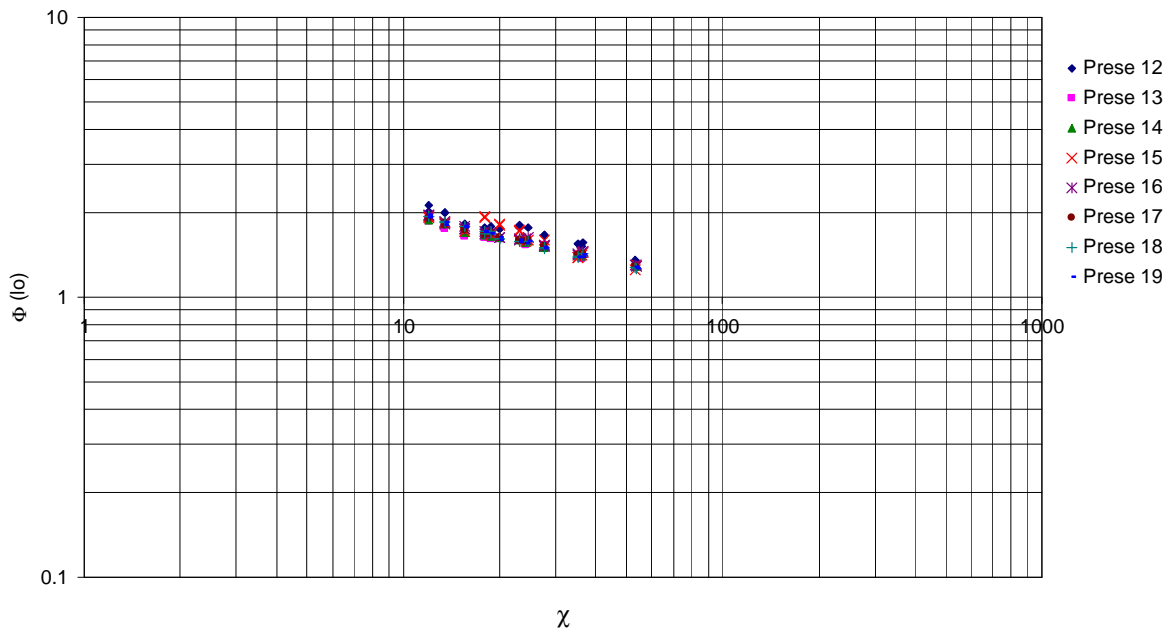


Figura 94: Andamento  $\chi$  e moltiplicatore bifase liquido. Elica D = 1,39 m. Circuito A.

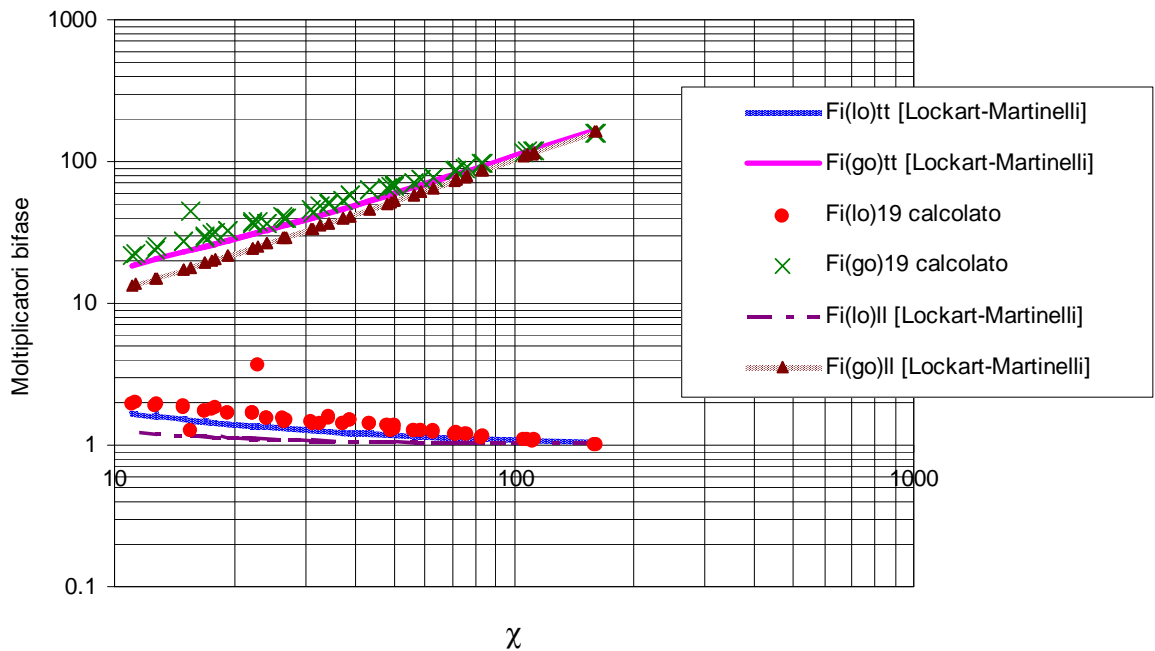


Figura 95: Confronto tra risultati sperim. e modello di Lockhart - Martinelli. Elica D = 0,64 m. Circuito A.

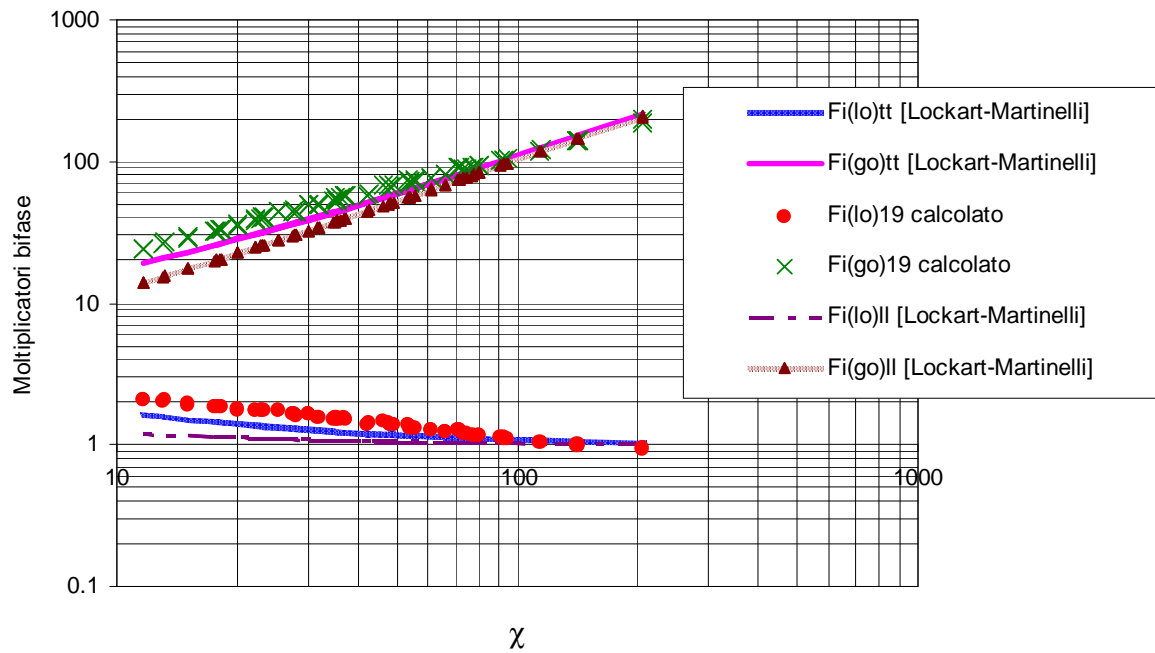


Figura 96: Confronto tra risultati sperim. e modello di Lockhart - Martinelli. Elica  $D = 1$  m. Circuito A.

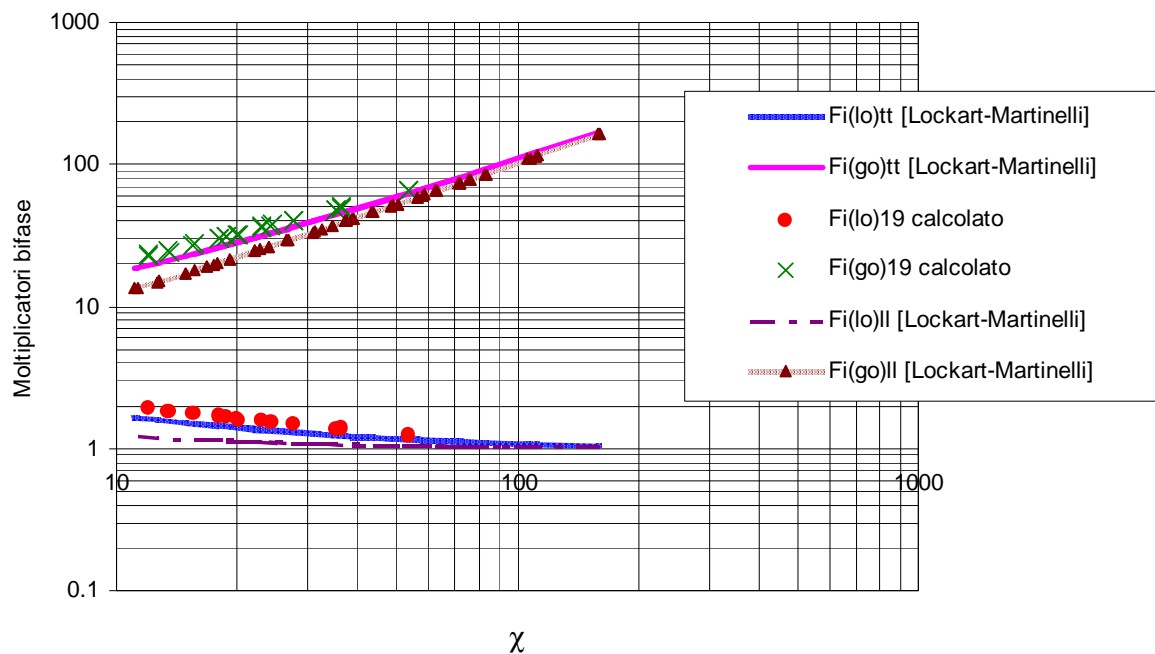


Figura 97: Confronto tra risultati sperim. e modello di Lockhart - Martinelli. Elica  $D = 1,39$  m Circuito A.

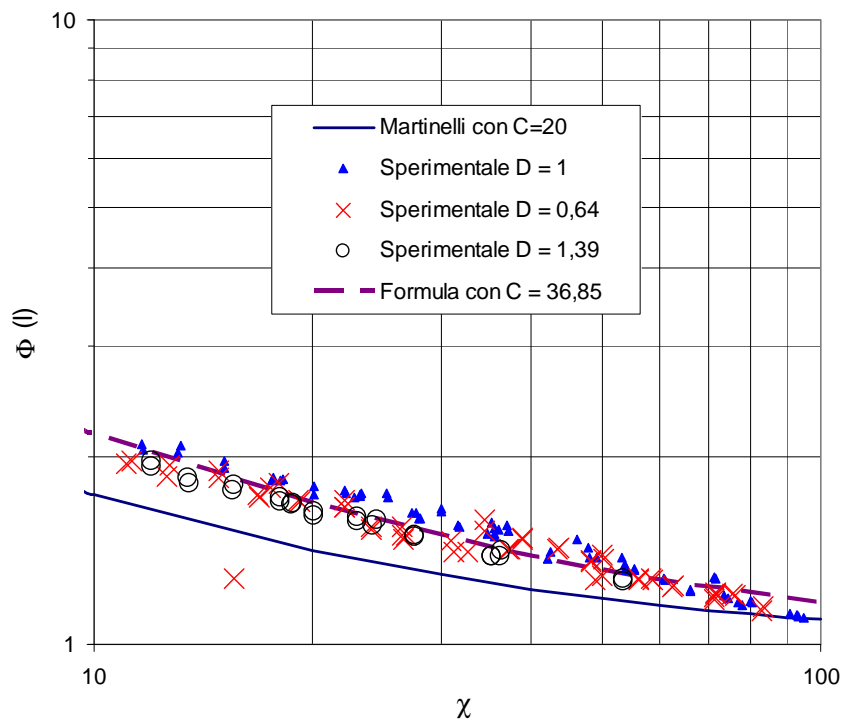


Figura 98: Moltiplicatore bifase attrito fase liquida e confronto con curve con parametro  $C$  diversi. Circuito A

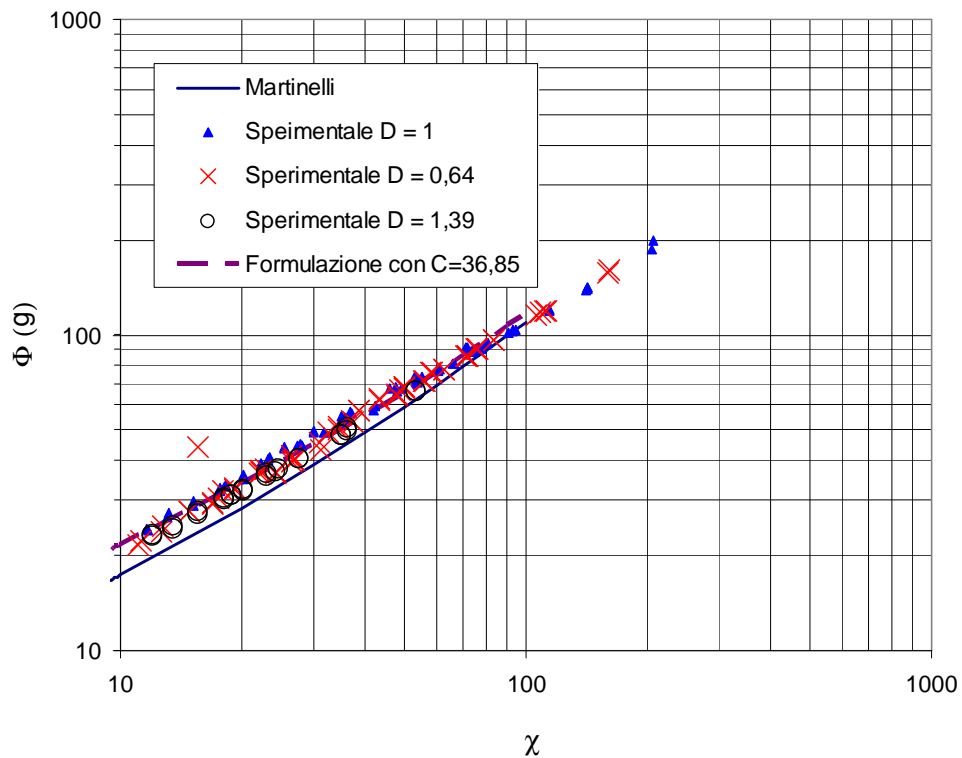


Figura 99: Moltiplicatore bifase attrito fase gassosa e confronto con curve con parametro  $C$  diversi. Circuito A.

### 6.2.7 Grado di vuoto sperimentale e correlazioni teoriche. Circuito A.

Si è calcolato il grado di vuoto teorico con la formulazione di Lockhart, riportata qui di seguito:

$$\alpha_{Lockhart} = 1 - \frac{1}{\Phi_{lo}}$$

Da Figura 100 a Figura 103 sono stati riportati i diagrammi in cui sono confrontati i gradi di vuoto misurati e quelli teorici determinati utilizzando il modello a parità del parametro  $\chi$ .

Dal confronto risulta che il grado di vuoto sperimentale è maggiore del grado di vuoto previsto dal modello. Solo per gradi di vuoto molto bassi (minori di 0,1 per le eliche con diametro 1 m e 0,64 m e minori di 0,3 per la terza elica) il modello dà previsioni attendibili.

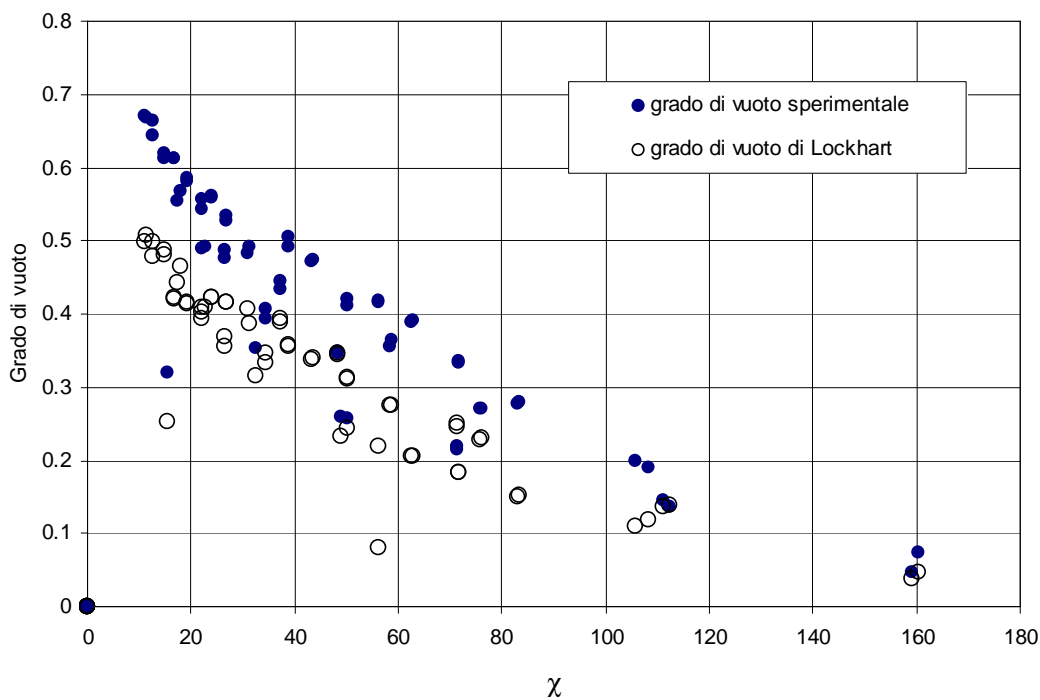


Figura 100: Confronto grado di vuoto sperimentale – grado di vuoto calcolato; elica D = 0,64 m Circuito A.

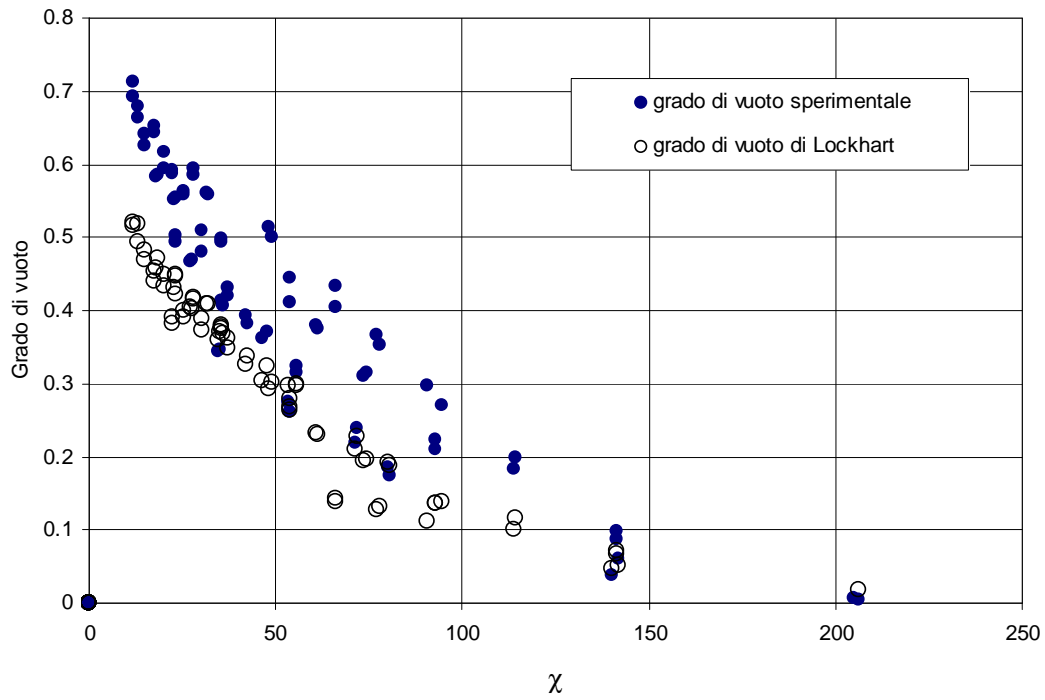


Figura 101: Confronto grado di vuoto sperimentale – grado di vuoto calcolato; elica D = 1 m Circuito A.

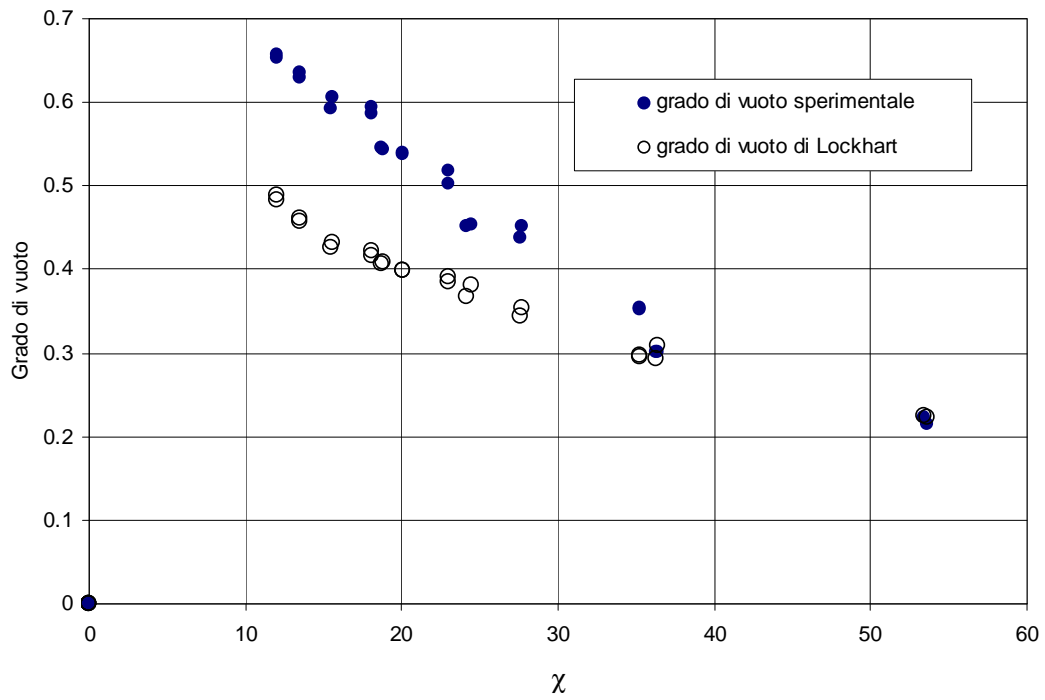
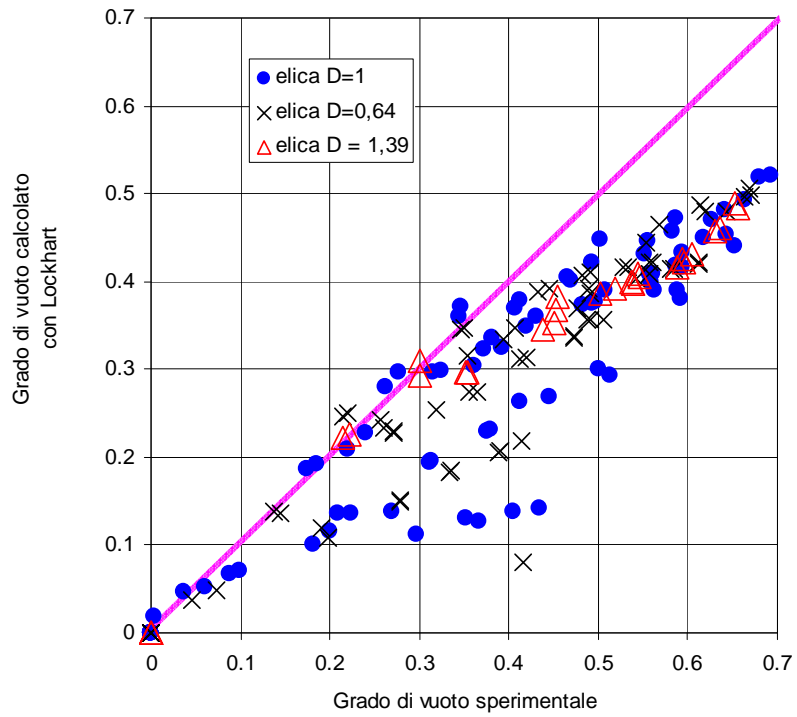


Figura 102: Confronto grado di vuoto sperimentale – grado di vuoto calcolato; elica D = 1,39 m Circuito A.



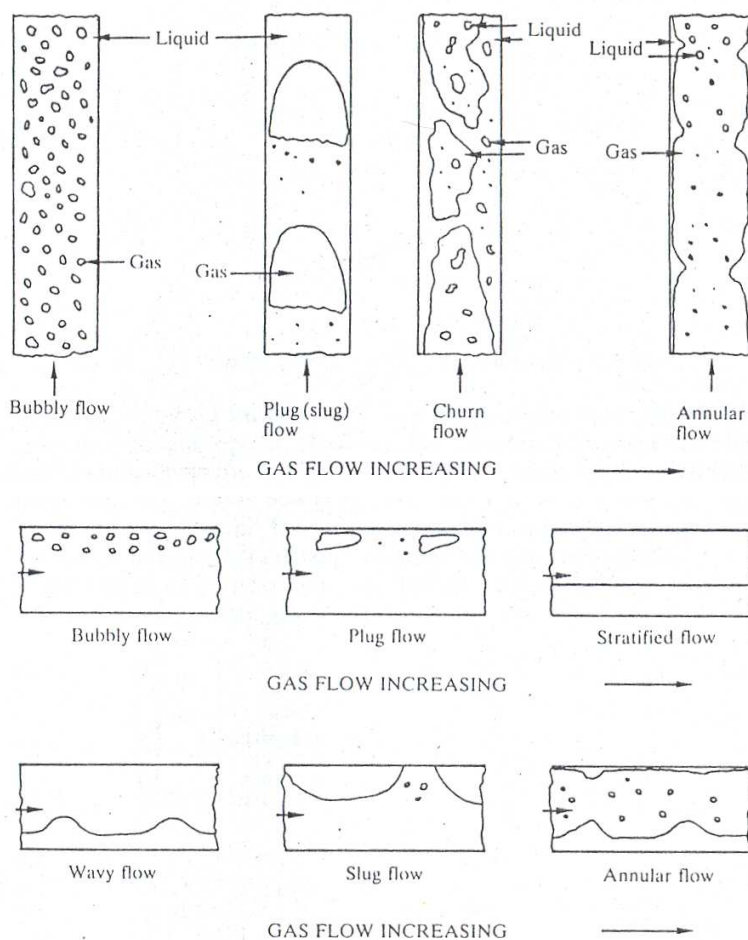
**Figura 103: Confronto grado di vuoto sperimentale e grado di vuoto calcolato con modello Lockhart – Martinelli. Circuito A.**



### 6.2.8 Flow pattern. Circuito A.

L'analisi dei *flow pattern*, da cui dipendono le cadute di pressione e lo scambio termico, è stata possibile sia mediante osservazioni durante lo svolgimento delle prove, sia utilizzando una videocamera ad alta definizione Panasonic AG-DVC30.

In Figura 104 sono illustrati i *flow pattern* per tubo verticali, con moto verso l'alto, e per tubi orizzontali.



**Figura 104: Flow pattern in tubi verticali e moto verso l'alto e in tubi orizzontali.**

A questa analisi si è aggiunto un confronto tra i risultati ricavati attraverso l'utilizzo di mappe per la previsione dei *flow pattern* e le osservazioni fatte. A causa della poca inclinazione rispetto all'orizzontale dei tubi ad elica, il deflusso risulta essere più facilmente approssimabile ad un moto orizzontale; questo è rilevabile dal fatto che le mappe per deflussi in condotti orizzontali, benché imprecise per la previsione del *flow*

*pattern* nelle sezioni di prova, diano previsioni che meglio approssimano quelli ottenuti durante le prove sperimentali.

Si sono confrontate la mappa di Baker, la mappa di Hewitt - Roberts, e la mappa di Taitel - Dukler con i risultati delle prove effettuate.

- **Mappa di Baker**

La mappa di Baker, valida per deflussi in tubi diritti orizzontali, ha come parametri caratteristici  $Gg/\lambda$  e  $Gh\psi$  in cui:

$G$  è la portata areica,

$$\lambda = \left( \frac{\rho_g \cdot \rho_l}{\rho_{aria} \cdot \rho_{acqua}} \right),$$

$$\psi = \frac{\sigma_{acqua}}{\sigma} \cdot \left[ \frac{\mu_l}{\mu_{acqua}} \cdot \left( \frac{\rho_{acqua}}{\rho_l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}}$$

dove :

$$\rho_{aria} = 1,23 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{acqua} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{acqua} = 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$$

$$\sigma_{acqua} = 0,072 \text{ N/m}.$$

I risultati ottenuti dalle prove sperimentali sono riportati graficamente in Figura 105, Figura 106 e Figura 107: secondo le previsioni della mappa di Baker si possono instaurare due tipi di *flow pattern*: *slug* e *plug*.

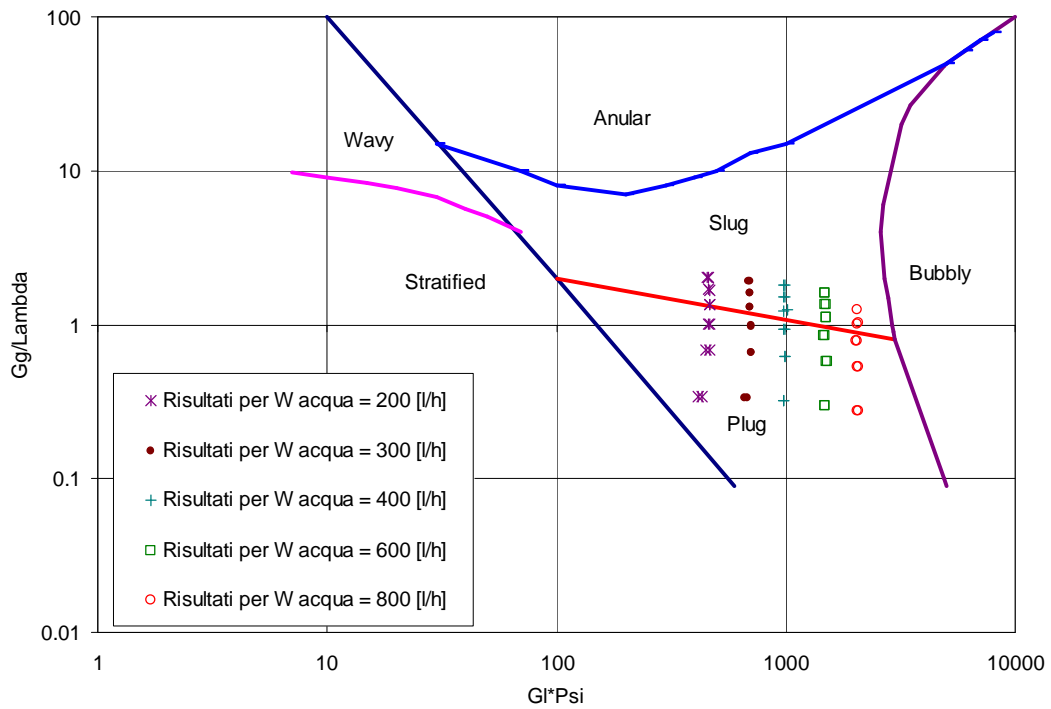


Figura 105: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per l'elica  $D = 0,64$  m. Circuito A.

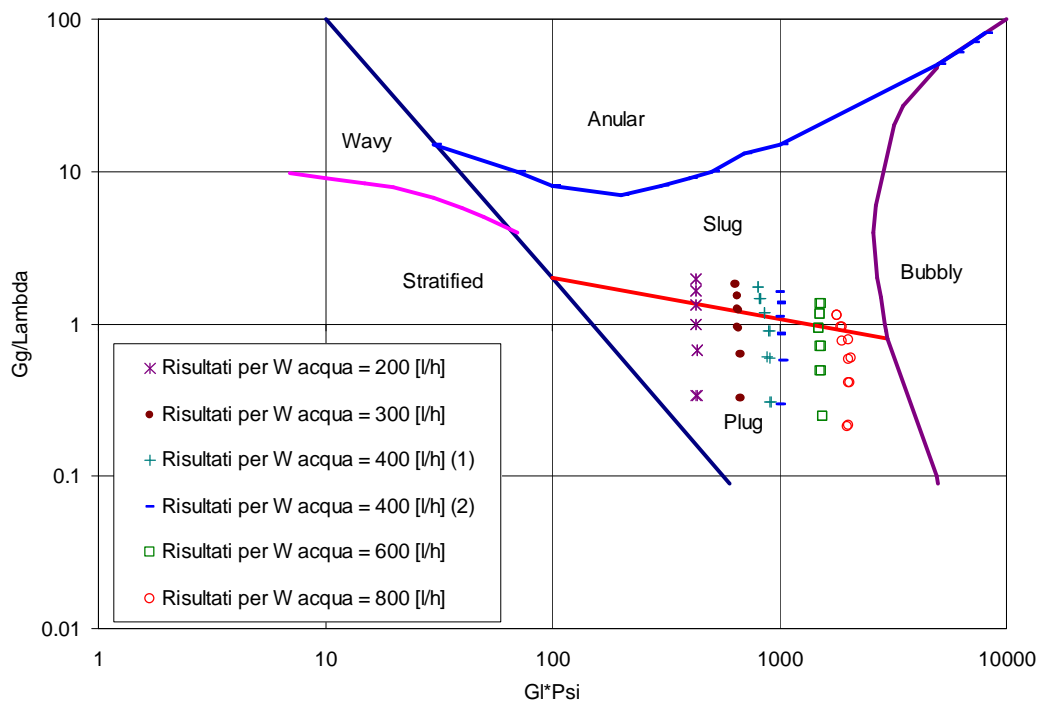


Figura 106: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per l'elica  $D = 1$  m. Circuito A.

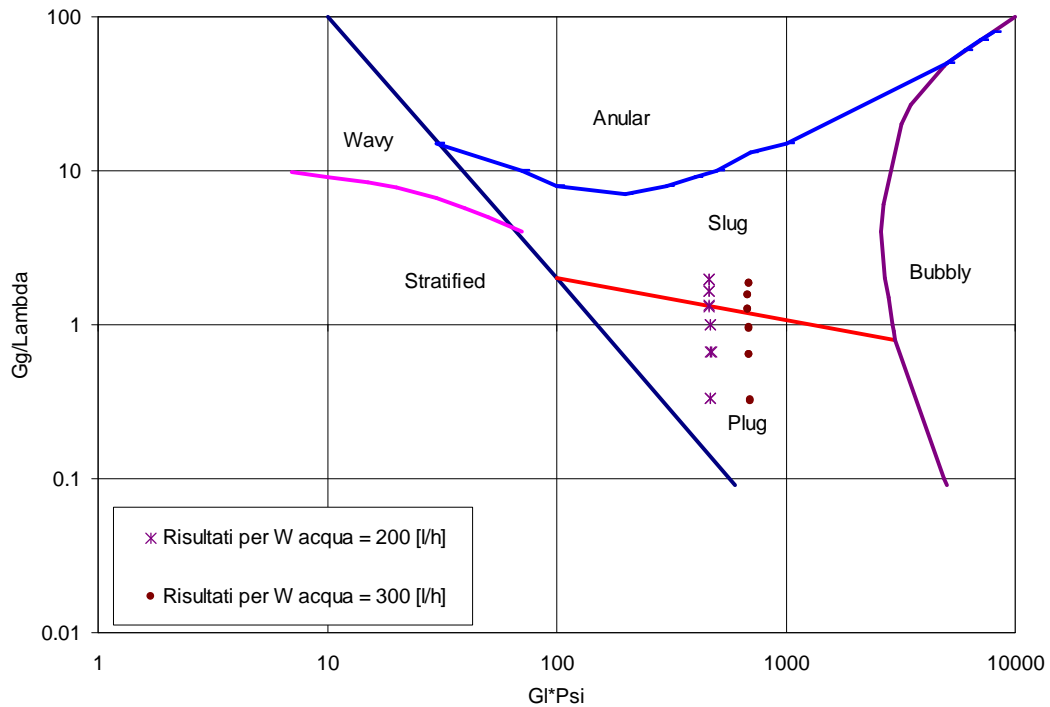


Figura 107: Mapa di Baker con inseriti i punti sperimentali per l'elica  $D = 1,39$  m. Circuito A.

- **Mapa di Hewitt - Roberts**

La seconda mappa presa in esame è la mappa di Hewitt - Roberts, valida per deflussi in tubi dritti verticali di diametro minore di 0,05 m e per miscele aria-acqua o olio-gas; essa ha come parametri caratteristici  $G_g^2/\rho_g$  e  $G_l^2/\rho_l$ , dove  $G$  è la portata areica.

I risultati sono diagrammati nelle figura successive; si può notare che secondo le previsioni di questa mappa per le tre sezioni di prova si avrebbe lo stesso genere di *flow pattern*, *slug*, per ogni miscela aria-acqua qui sperimentata.

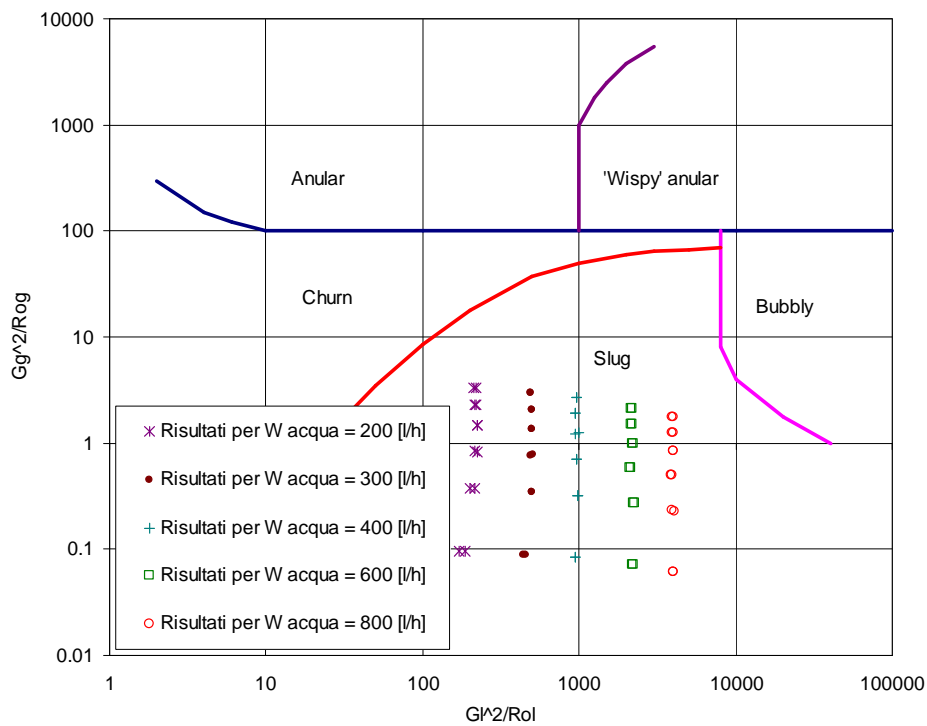


Figura 108: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per l'elica  $D = 0,64$  m. Circuito A.

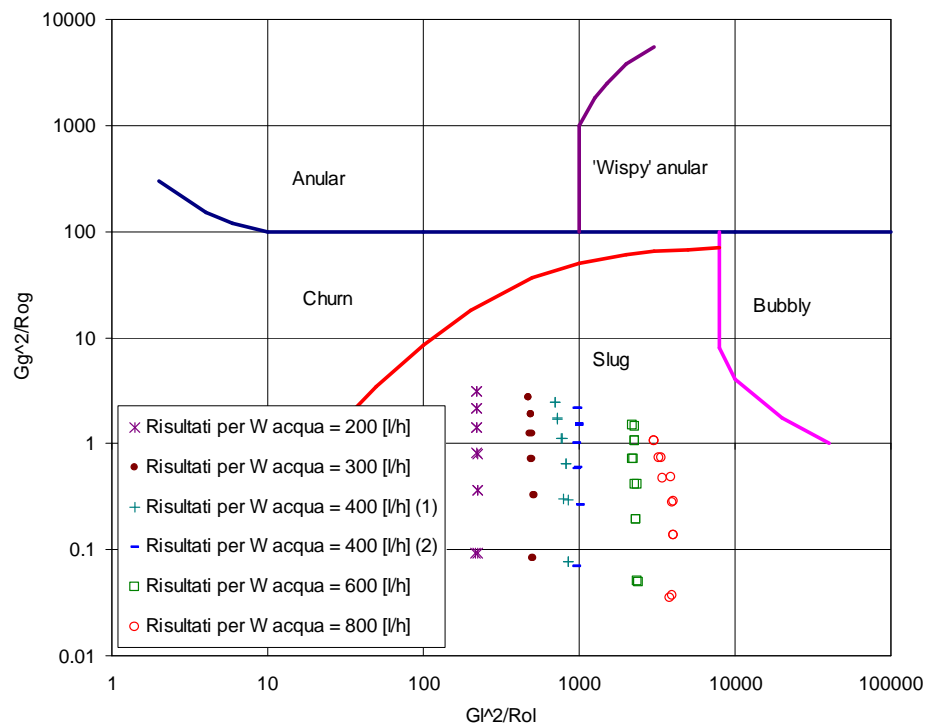


Figura 109: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per l'elica  $D = 1$  m. Circuito A.

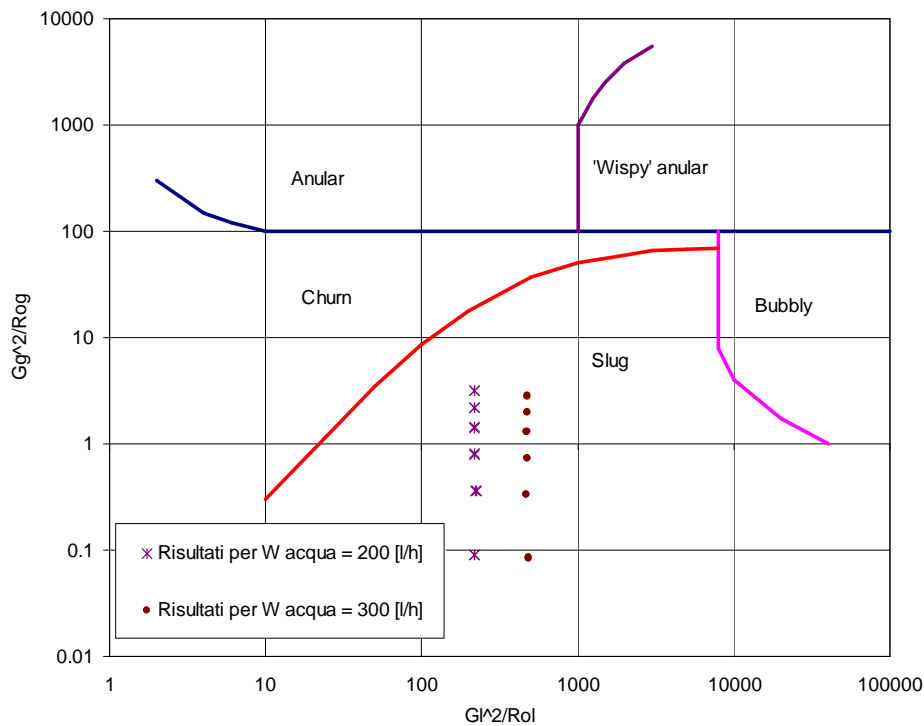


Figura 110: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per l'elica D = 1,39 m. Circuito A.

• **La mappa di Taitel - Dukler**

L'ultima mappa le cui previsioni sono state confrontate con le osservazioni sperimentali è la mappa di Taitel - Dukler, valida per deflussi in tubi dritti orizzontali; questa mappa è costituita da tre diagrammi complementari riportati in Figura 111.

I parametri caratteristici in questo caso sono:

$$\chi = \left[ \frac{\left( \frac{dp}{dz} \right)_l}{\left( \frac{dp}{dz} \right)_g} \right]^{0.5} \quad (\text{Parametro di Martinelli})$$

$$Fr = \frac{G_g}{[\rho_g \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot d \cdot g]^{0.5}} \quad (\text{Numero di Froude})$$

$$T = \left[ \frac{\left( \frac{dp}{dz} \right)_l}{g \cdot (\rho_l - \rho_g)} \right]^{0,5}$$

$$K = Fr \cdot \left[ \frac{G_l \cdot d}{\mu_l} \right]^{0,5}$$

Per il raffronto tra i dati sperimentali e le previsioni di questa mappa si sono utilizzate delle tabelle (Tabella 44, Tabella 45, Tabella 46 e Tabella 47) in cui si sono riportati anche i risultati ottenuti con le previsioni delle mappe precedentemente considerate.

Da questo confronto si evince come i risultati più attendibili siano dati dalle mappe per tubi orizzontali, come atteso vista la pendenza contenuta, ed in particolare le previsioni più verosimili risultano essere quelle della mappa di Taitel - Dukler.

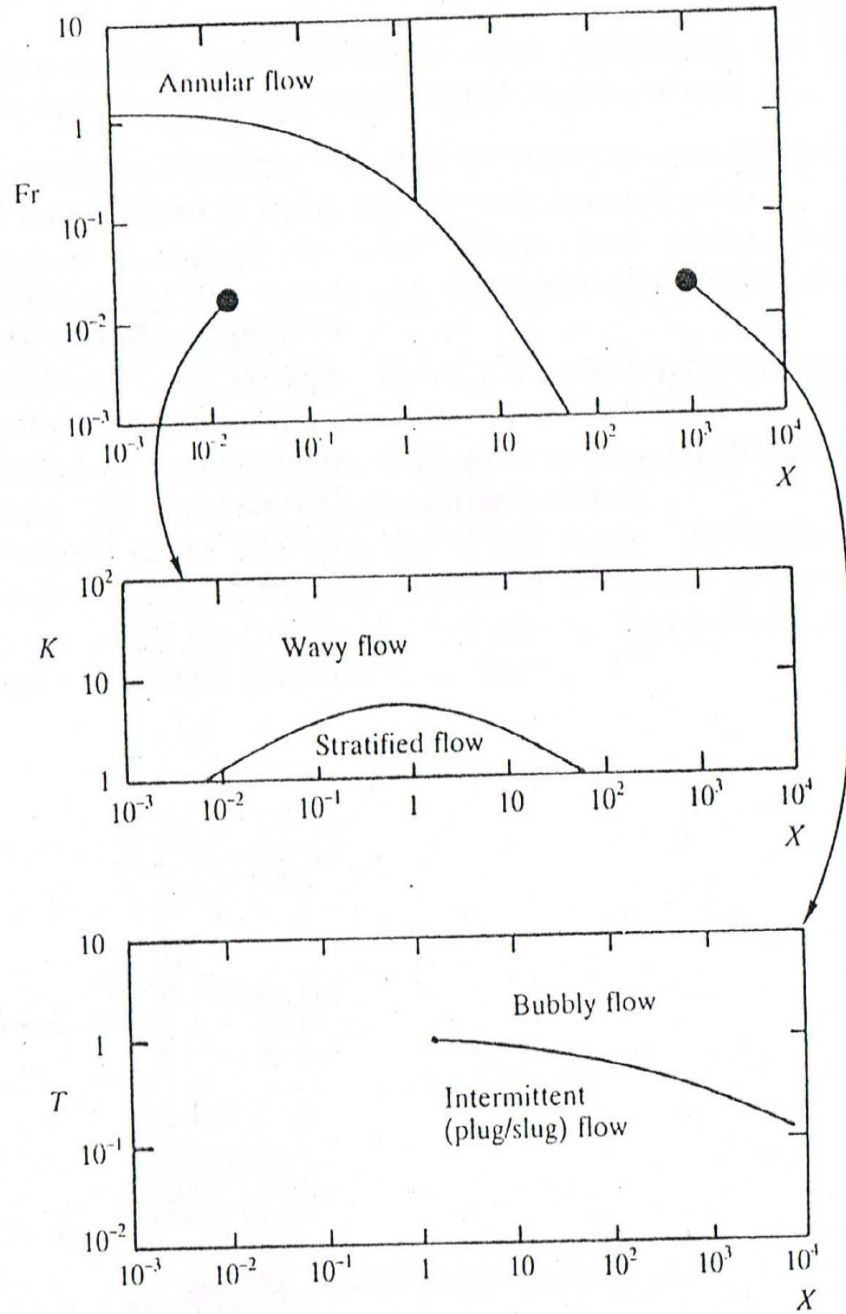


Figura 111: Mappa di Taitel-Dukler.



| Portata d'acqua [l/h] | Portata d'aria [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| 200                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,13                 | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,173                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,216                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,259                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
| 300                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,13                 | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,172                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,215                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,258                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
| 400                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble-Slug                |
|                       | 0,13                 | Slug                    | Plug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,172                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,214                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,258                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Plug                       |
| 600                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,129                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,172                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,215                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,258                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
| 800                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,130                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,173                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,216                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |

**Tabella 44: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali elica D = 0,64 m. Circuito A.**

| Portata d'acqua [l/h] | Portata d'aria [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| 200                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,085                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,128                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,170                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,212                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,255                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
| 300                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,085                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,128                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,170                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,212                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,255                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
| 400                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble-Slug                |
|                       | 0,128                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,171                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,213                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |

**Tabella 45: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali (W acqua < 400 l/h) elica D = 1m. Circuito A.**

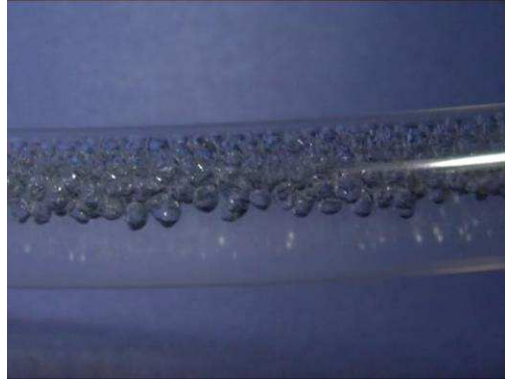
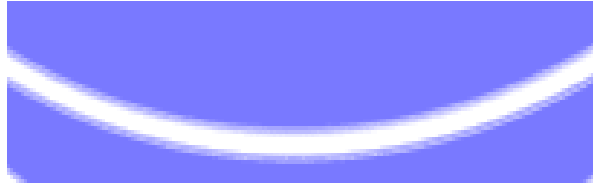
| Portata d'acqua [l/h] | Portata d'aria [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| 400                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,130                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,171                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,213                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,255                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Plug                       |
| 600                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,130                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,171                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,216                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,259                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
| 800                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,130                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,171                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |
|                       | 0,216                | Slug                    | Slug           | Bubble                | Bubble                     |

**Tabella 46: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali (W acqua > 400 l/h) elica D = 1 m Circuito A.**

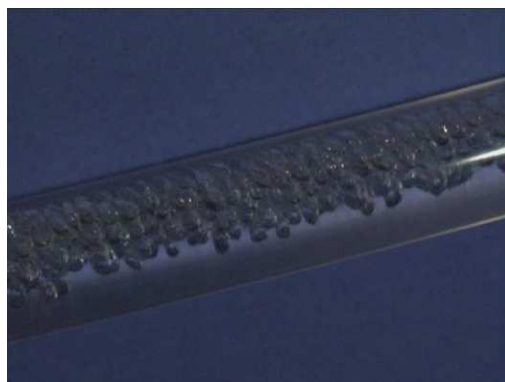
| Portata d'acqua [l/h] | Portata d'aria [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| 200                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,128                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug                       |
|                       | 0,171                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,214                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,256                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
| 300                   | 0,043                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,086                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,128                | Slug                    | Plug           | Bubble                | Slug                       |
|                       | 0,171                | Slug                    | Plug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |
|                       | 0,213                | Slug                    | Slug           | Slug_Plug             | Slug-Plug                  |

**Tabella 47: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali elica D = 1,39 m. Circuito A.**

Dalle osservazioni dei *flow pattern* si è verificato che la fase gassosa si posiziona verso l'alto ed internamente rispetto all'asse dei tubi ad elicoidali (Figura 112 e Figura 113); tale risultato è in accordo non solo con i risultati presenti in letteratura, ma anche con i valori di *slip ratio* ottenuti dai rilievi sperimentali valutati durante le prove, infatti il gas si colloca sul lato interno delle eliche a dimostrazione di una velocità del fluido inferiore.



**Figura 112: Portata d'acqua 800 l/h e portata d'aria 300 l/h vista verticale, (elica D = 1 m).  
Circuito A.**



**Figura 113: Portata d'acqua 800 l/h e portata d'aria 300 l/h vista laterale , (elica D = 1 m).  
Circuito A.**

Con le immagini riportate qui di seguito relative all'elica di diametro  $D = 1$  m, (Figura 114, Figura 115 e Figura 116), si vuole sottolineare come il *flow pattern* si sviluppi lungo il tubo elicoidale; tali immagini sono infatti relative a tre diverse altezze, crescenti, dello sviluppo verticale dell'elica. La portata d'acqua che si è presa in esame per illustrare il fenomeno è di 200 l/h e la portata d'aria è 50 l/h, quindi il *flow pattern* instaurato è di tipo a *slug*, come precedentemente verificato. Risulta evidente come lo *slug* aumenti la sua dimensione man mano che sale lungo l'asse dell'elica, a causa della progressiva unione di *slug* più piccoli.



**Figura 114:**  $W_{\text{acqua}} = 200$  l/h e  $W_{\text{aria}} = 50$  l/h  $\Delta z \sim 0,45$  m ; elica  $D = 1$  m. Circuito A.



**Figura 115:**  $W_{\text{acqua}} = 200$  l/h e  $W_{\text{aria}} = 50$  l/h  $\Delta z \sim 1,25$  m; elica  $D = 1$  m. Circuito A.



**Figura 116:**  $W_{\text{acqua}} = 200 \text{ l/h}$  e  $W_{\text{aria}} = 50 \text{ l/h}$   $\Delta z \sim 2 \text{ m}$  ; elica  $D = 1 \text{ m}$ . Circuito A.

In Appendice C, in Appendice D ed in Appendice E sono riportate, per le tre eliche, le immagini dei *flow patterns* ‘catturate’ con la telecamera ad alta definizione durante lo svolgimento delle prove.

## 7 Prove in deflusso bifase con circuito B.

In questo capitolo si analizzeranno i risultati ricavati dalle misurazioni sperimentali con miscela bifase, utilizzando il circuito con le sezioni di prova poste in configurazione di canali in parallelo (circuito B). Si esamineranno i risultati alla luce delle instabilità fluidodinamiche.

### 7.1 Procedura sperimentale prove in deflusso bifase. Circuito B.

La procedura sperimentale varia a seconda del tipo di prova effettuato. Lo scopo principale di questo circuito è mettere in luce le instabilità fluidodinamiche, per questo si è proceduto con due tipologie di prove sperimentali differenti:

**Prove tipo I:** due eliche con deflusso monofase e la terza in deflusso bifase,

**Prove tipo II:** tre eliche in deflusso bifase.

Per entrambe le tipologie di prova si è atteso un sufficiente intervallo di tempo, tale da permettere di ritenere il deflusso stazionario, e si è proceduto alla misura dei parametri d'interesse.

#### 7.1.1 Prove con singola sezione di prova in deflusso bifase (Prove I).

Nella prima campagna di prove si sono testate le portate d'acqua totali e di aria riportate nella matrice sperimentale in Tabella 48.

| Portate sperimentate    | Prove I                |
|-------------------------|------------------------|
| W acqua totale [g/s]    | 290 – 530 – 560 – 580  |
| W aria nell'elica [g/s] | 0 – 0,25 – 0,58 – 0,85 |

Tabella 48: Matrice sperimentale prove con deflusso bifase un'elica alla volta; Circuito B. Prove I.



Per semplicità si sono raggruppati i risultati sperimentali rispetto alle quattro portate d'acqua utilizzate:

- **W1** = 290 g/s;
- **W2** = 560 g/s;
- **W3** = 580 g/s;
- **W4** = 530 g/s.

Esse sono state ricavate come somma delle portate misurate nei rami di alimento delle tre eliche. Per ognuna di queste portate d'acqua e per ogni elica si sono testate tre portate d'aria (tre diversi deflussi bifase) e la condizione monofase.

Le prove con una sola elica con deflusso bifase (prove I) sono state realizzate fissando la portata d'acqua e variando la portata di aria in modo discreto tra 0 (prova monofase) ed una portata massima compatibile con il fondo scala degli strumenti utilizzati.

Per ogni serie di queste misure, si sono calcolate la media e la varianza delle differenze di pressione tra la prima presa e l'ultima, la portata totale di acqua dopo la pompa di alimento, le portate di acqua sui singoli rami di ingresso alle eliche e la portata d'aria.

Per il calcolo del grado di vuoto si è proceduto all'intercettazione rapida del deflusso, mediante le valvole a chiusura rapida, ed alla pesata dell'acqua intrappolata, come per le prove in deflusso bifase eseguite utilizzando il circuito A.

È stata utilizzata una centralina per la misura dei parametri ambientali (temperatura e pressione). La temperatura del fluido all'ingresso delle sezioni di prova è stata misurata con l'ausilio di una termocoppia.

### 7.1.2 Prove con tre sezione di prova in deflusso bifase (Prove II).

Nella seconda campagna di prove si sono considerati due casi distinti (caso 1 e caso 2) i cui parametri sono riportati nella matrice sperimentale in Tabella 49.

| Portate sperimentate   | Prova II caso 1        | Prova II caso 2   |
|------------------------|------------------------|-------------------|
| W acqua totale[g/s]    | 290 – 530 – 560 – 580  | 112 – 240         |
| W aria nell'elica[g/s] | 0 – 0,25 – 0,58 – 0,85 | 1,45 – 1,65 – 1,9 |

**Tabella 49: Matrice sperimentale prove con deflusso bifase per tutte le eliche; circuito B.**

I risultati sperimentali per le prove di tipo II si sono raggruppati, come per le prove di tipo I rispetto alle portate d'acqua utilizzate:

- **W1** = 290 g/s;
- **W2** = 560 g/s;
- **W3** = 580 g/s;
- **W4** = 530 g/s.
- **W5** = 112 g/s;
- **W6** = 240 g/s;

Anche in questo caso le portate totali sono state ricavate come somma delle portate misurate nei rami di alimento delle tre eliche.

Le prove con le tre eliche in deflusso bifase sono state realizzate fissando la portata d'acqua e variando la portata di aria in modo discreto tra 0 (prova monofase) ed una portata massima compatibile con il fondo scala degli strumenti utilizzati.

Per ogni serie di queste misure, si sono acquisiti come dati le differenze di pressione tra la prima presa e l'ultima, la portata totale di acqua dopo la pompa di alimento, le portate di acqua sui singoli rami di ingresso alle eliche e la portata d'aria. Per la misura dei parametri ambientali (temperatura e pressione) si è anche in questo caso utilizzata una centralina e la temperatura del fluido all'ingresso delle sezioni di prova è stata misurata con l'ausilio di una termocoppia.

## 7.2 Risultati sperimentali prove tipo I: prove con singola sezione di prova in deflusso bifase.

### 7.2.1 Portata nei rami in ingresso delle sezioni di prova. Circuito B prove I.

La portata totale di acqua si suddivide tra i tre rami in ingresso in funzione delle caratteristiche geometriche delle sezioni di prova, e le differenti cadute di pressione dovute a singolarità nelle tubazioni (quali gomiti, curve e saldature) e alla differente lunghezza dei rami in uscita dalle sezioni di prova.

Si riportano in questo paragrafo, dalla Figura 117 alla Figura 128, l'evoluzione delle portate nei rami in ingresso, per le quattro portate di acqua totali testate, a seconda della portata d'aria immessa nell'elica in deflusso bifase.

- **Portata W1**

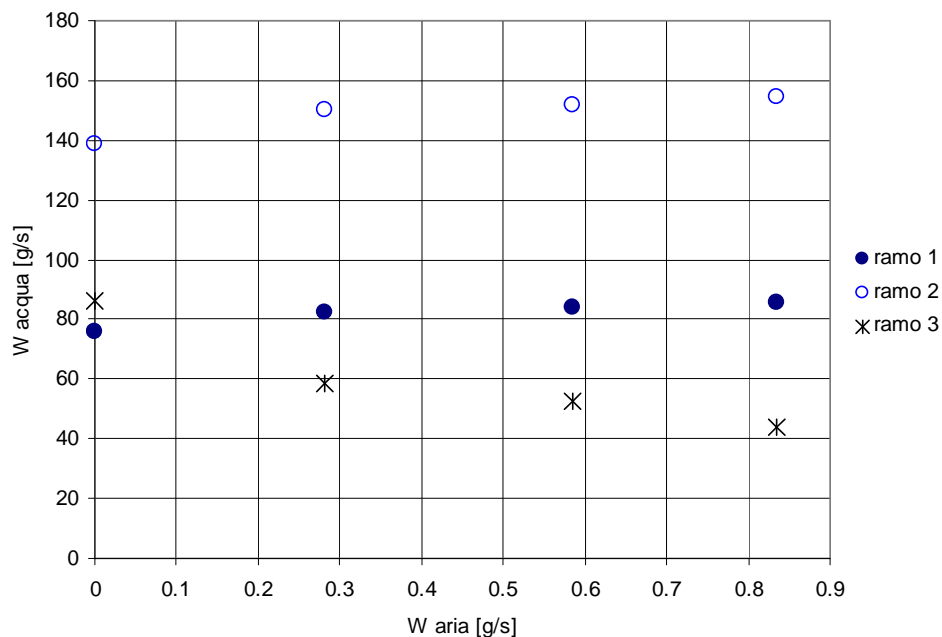
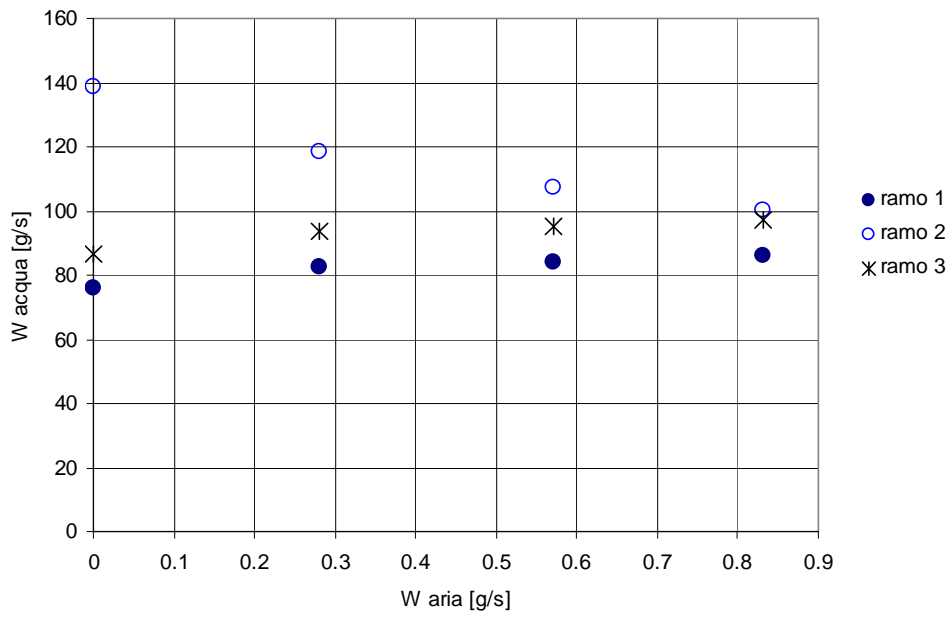
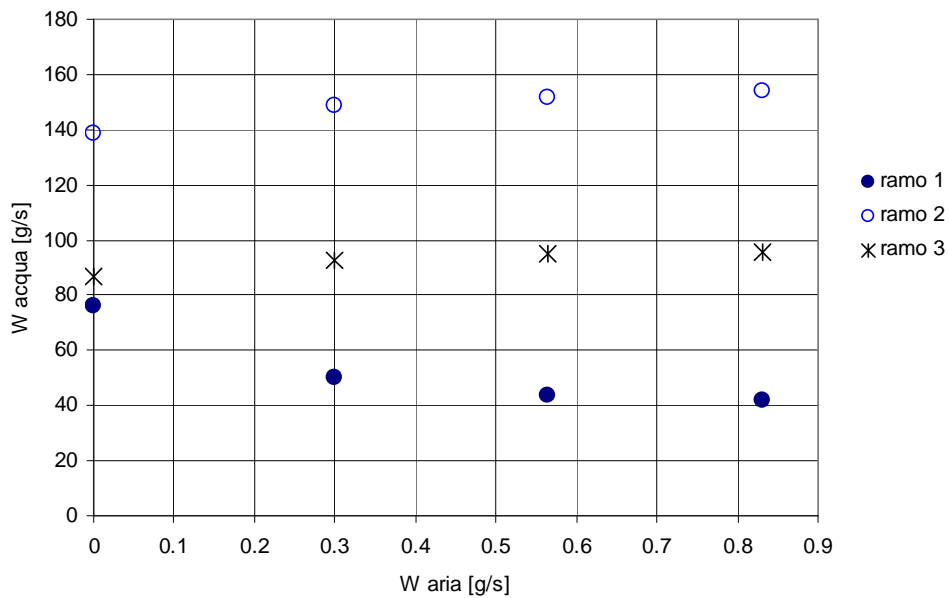


Figura 117: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 0,64$  m in deflusso bifase (ramo 3). Circuito B Prove I.

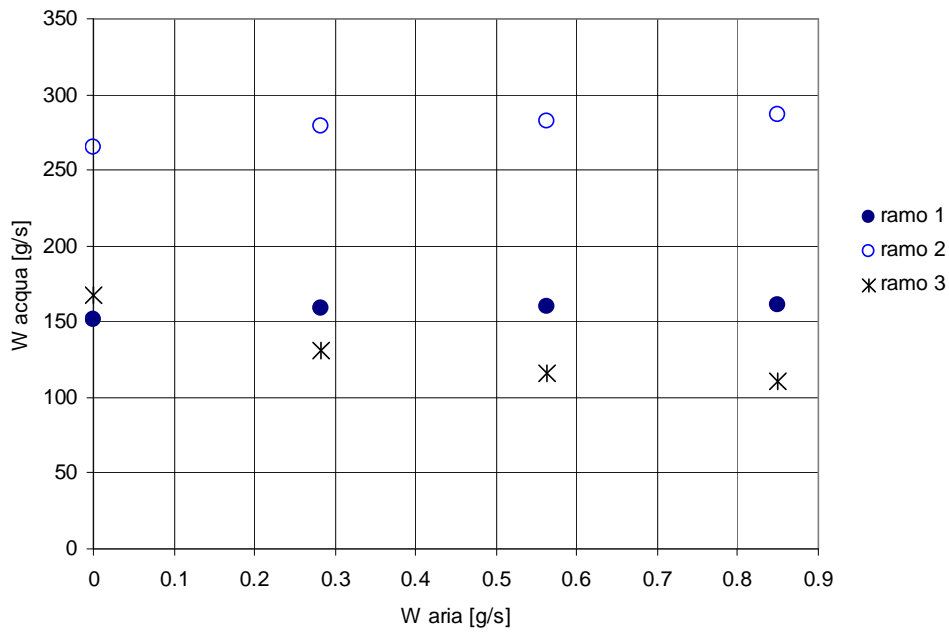


**Figura 118: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 1$  m in deflusso bifase (ramo 2). Circuito B Prove I.**

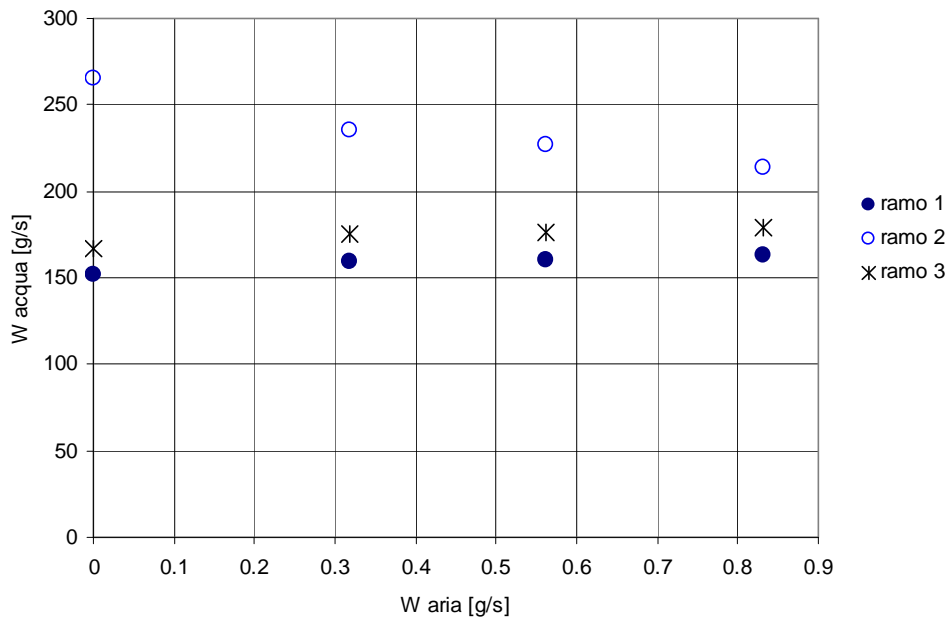


**Figura 119: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 1,39$  m in deflusso bifase (ramo 1). Circuito B Prove I.**

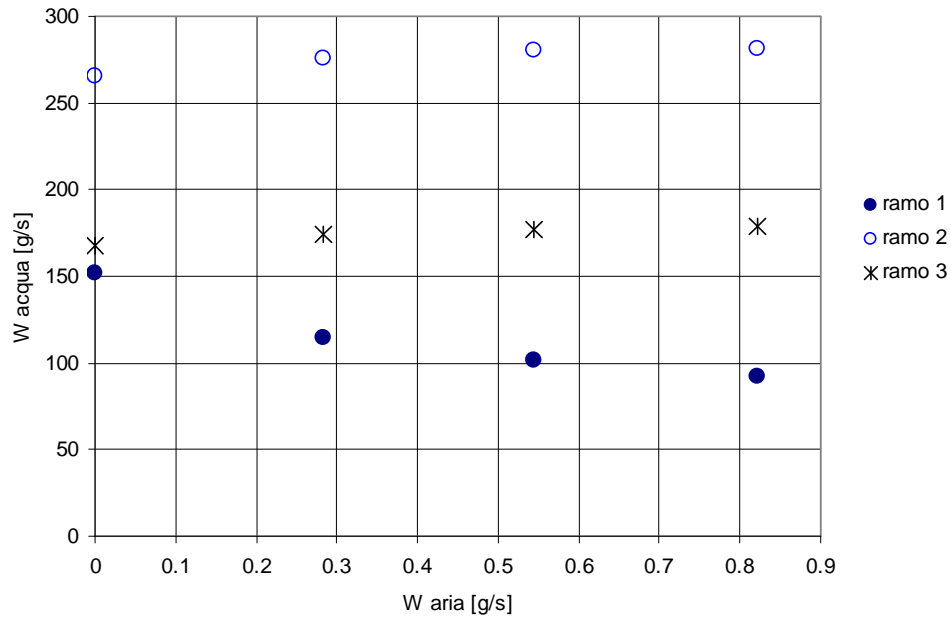
• **Portata W2**



**Figura 120: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 0,64$  m in deflusso bifase (ramo 3). Circuito B Prove I.**

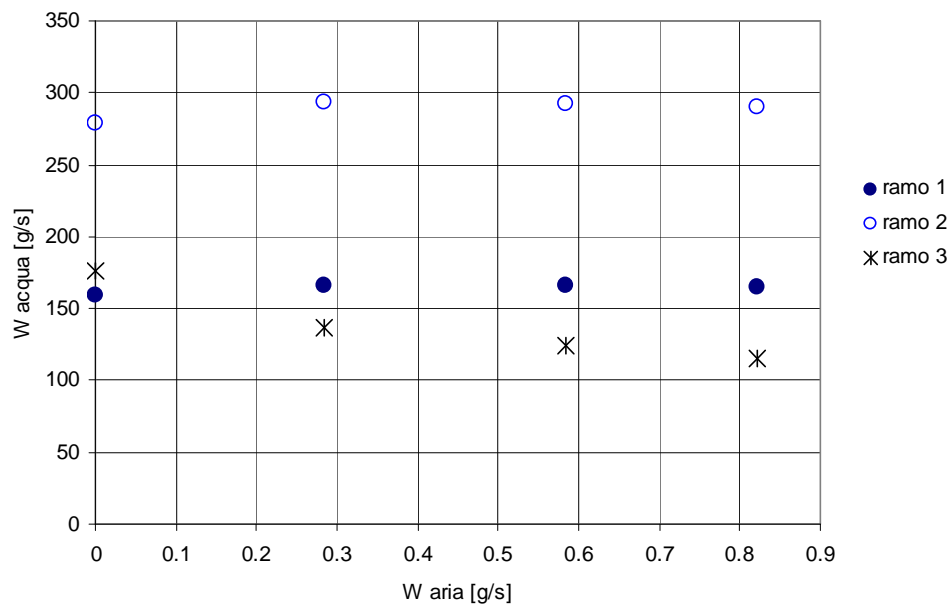


**Figura 121: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 1$  m in deflusso bifase (ramo 2). Circuito B Prove I.**



**Figura 122: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 1,39$  m in deflusso bifase (ramo 1). Circuito B Prove I.**

- **Portata W3**



**Figura 123: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 0,64$  m in deflusso bifase (ramo 3). Circuito B Prove I.**

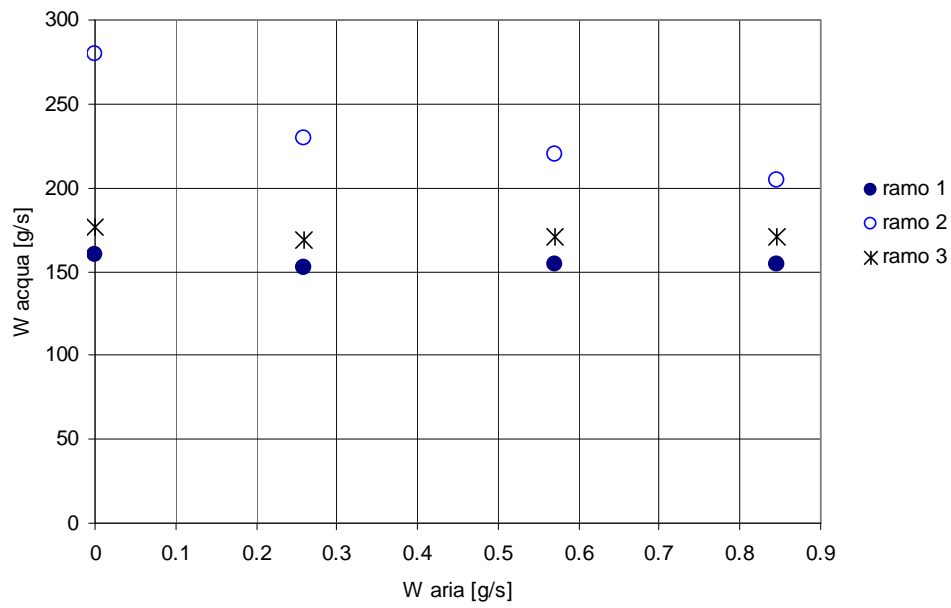


Figura 124: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 1$  m in deflusso bifase (ramo 2). Circuito B Prove I.

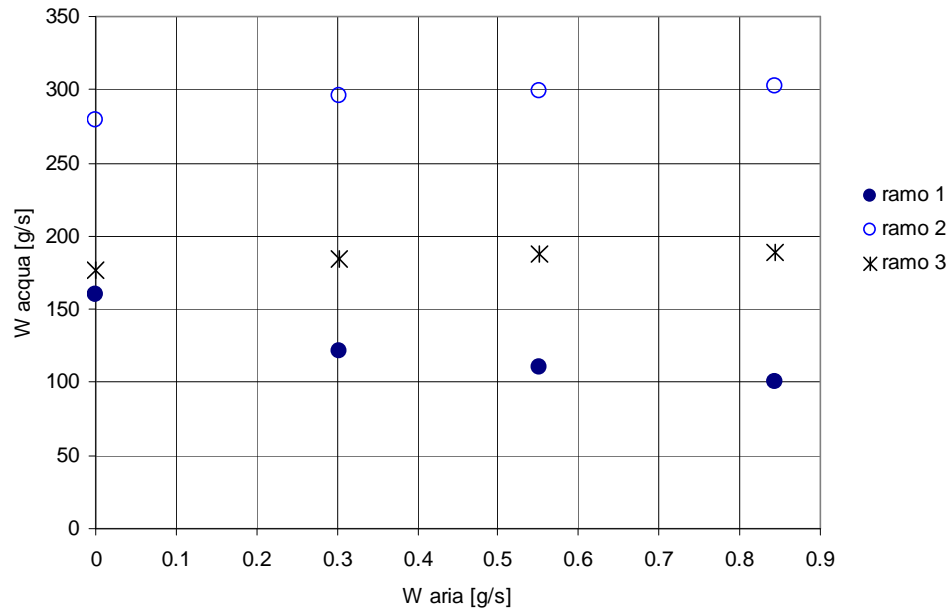
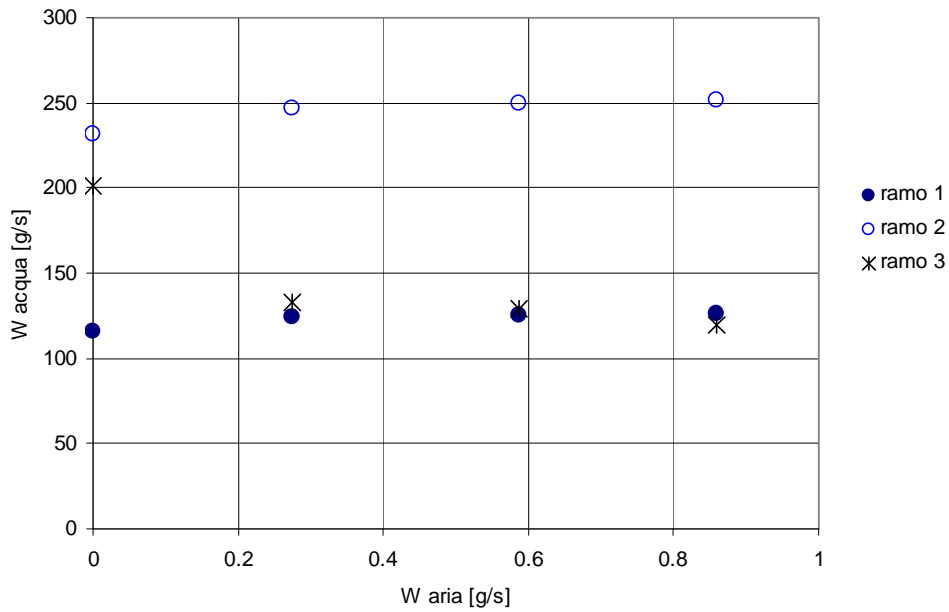
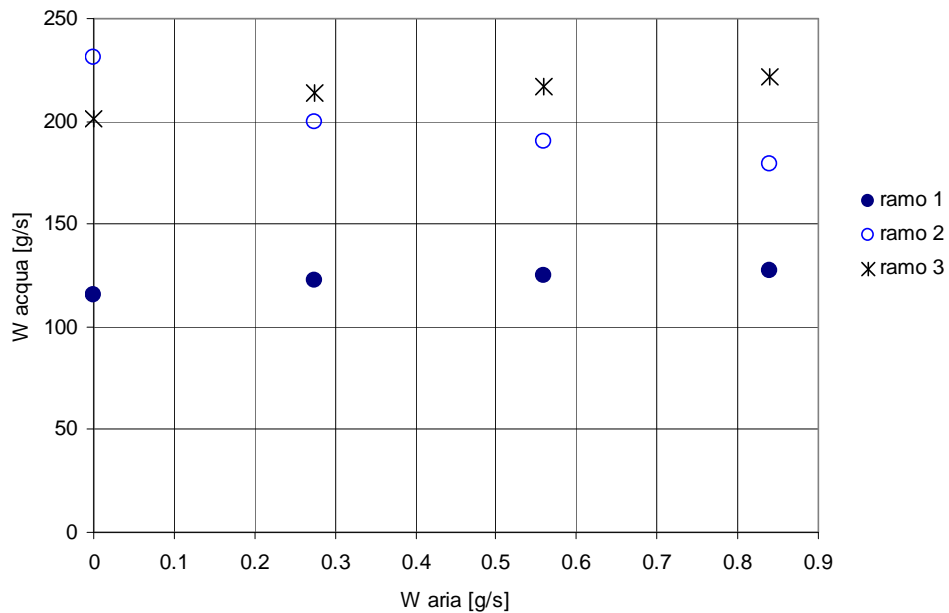


Figura 125: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 1,39$  m in deflusso bifase (ramo 1). Circuito B Prove I.

• **Portata W4**

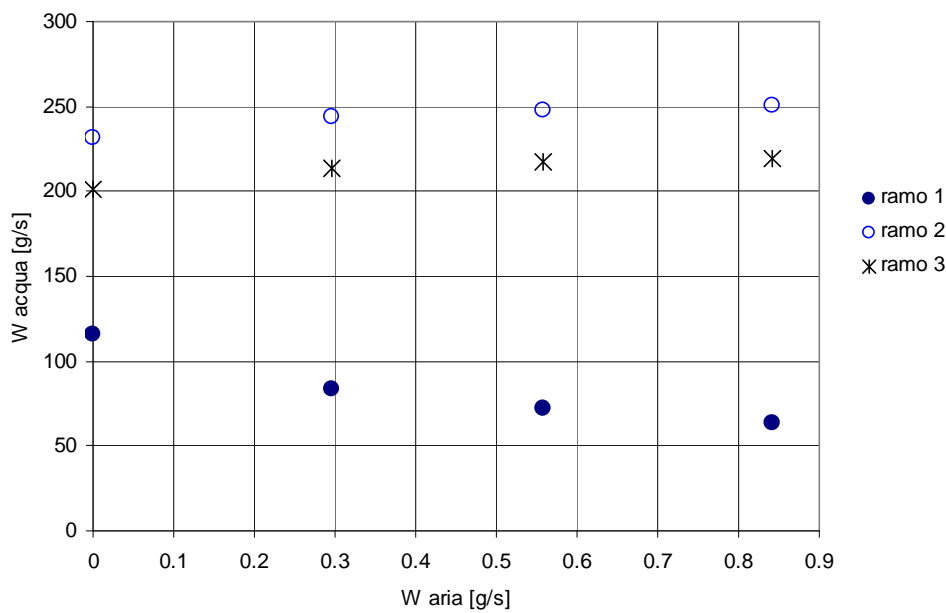


**Figura 126: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 0,64$  m in deflusso bifase (ramo 3). Circuito B Prove I.**



**Figura 127: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 1$  m in deflusso bifase (ramo 2). Circuito B Prove I.**





**Figura 128: Ripartizione delle portate nei rami con elica con  $D = 1,39$  m in deflusso bifase (ramo 1). Circuito B Prove I.**

Con questa analisi si è verificato che all'aumentare della portata d'aria nella sezione di prova con deflusso bifase la portata d'acqua nel rispettivo ramo di alimentazione decresce. La distribuzione della portata totale nei tre rami subisce quindi una notevole variazione nel corso delle prove. Si può osservare come la redistribuzione della portata d'acqua sui due rami di alimentazione delle sezioni di prova in regime monofase sia abbastanza uniforme per ogni condizione di prova.

Si è verificato che la regolazione della portata totale utilizzando il bypass, dopo la pompa di alimentazione, influisce significativamente nella redistribuzione delle portate sui rami. Con questa metodologia non si ha una portata d'acqua costante al collettore di alimentazione poiché una parte della portata d'acqua non defluisce più nelle sezioni di prova, ma viene espulsa tramite il bypass quando la portata si redistribuisce nei rami dopo aver variato la portata d'aria nell'elica in deflusso bifase. La differenza tra la portata totale iniziale (valutata con tutte e tre le sezioni di prova in regime monofase) e la portata totale dopo la redistribuzione delle portate varia tra 7 g/s e 85 g/s. Da Figura 129 a Figura 132 sono riportati gli andamenti delle portate totali in funzione delle portate d'aria iniettate nell'elica in deflusso bifase.

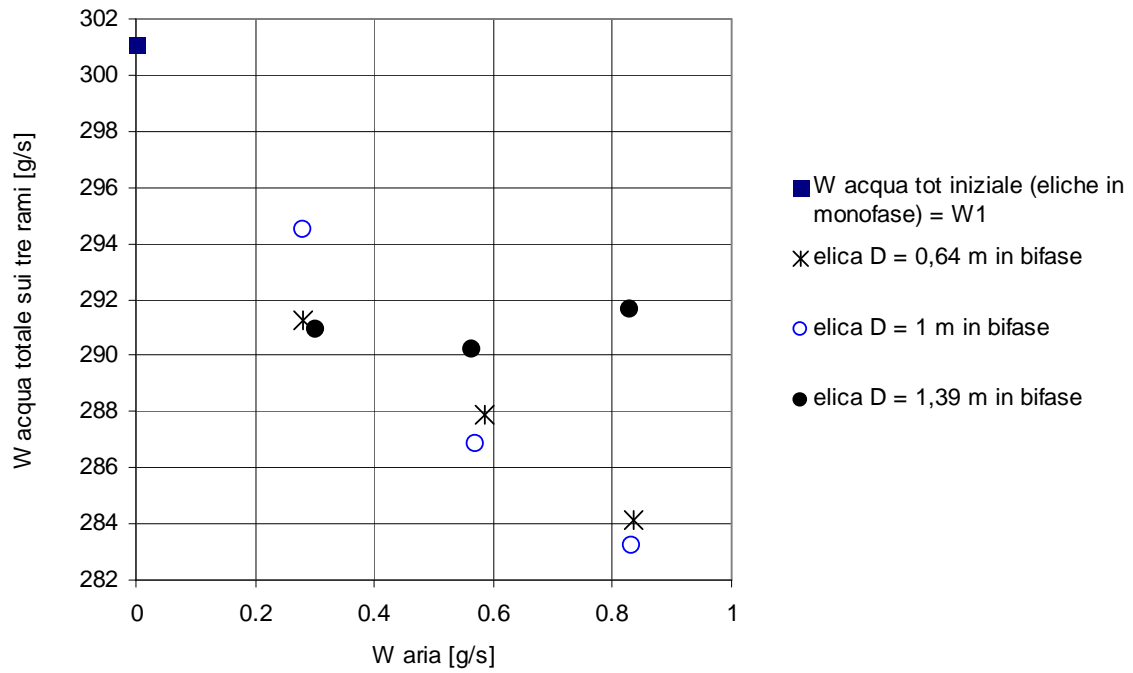


Figura 129: Andamento portata totale durante le prove con portata W1. Circuito B Prove I.

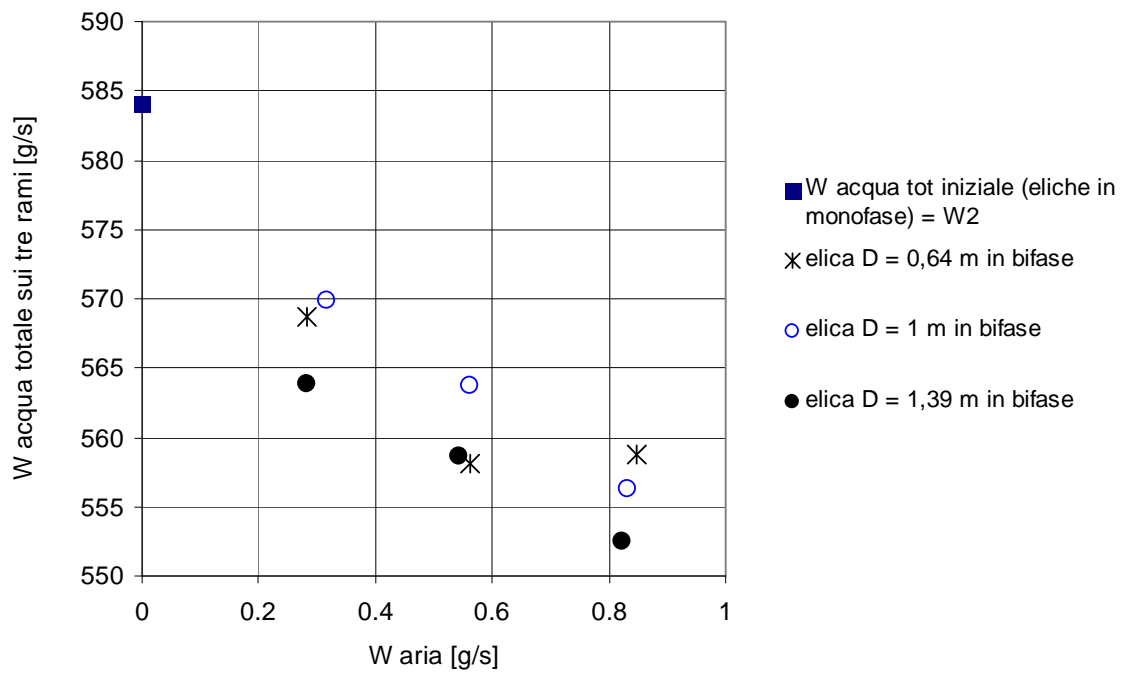


Figura 130: Andamento portata totale durante le prove con portata W2. Circuito B Prove I.

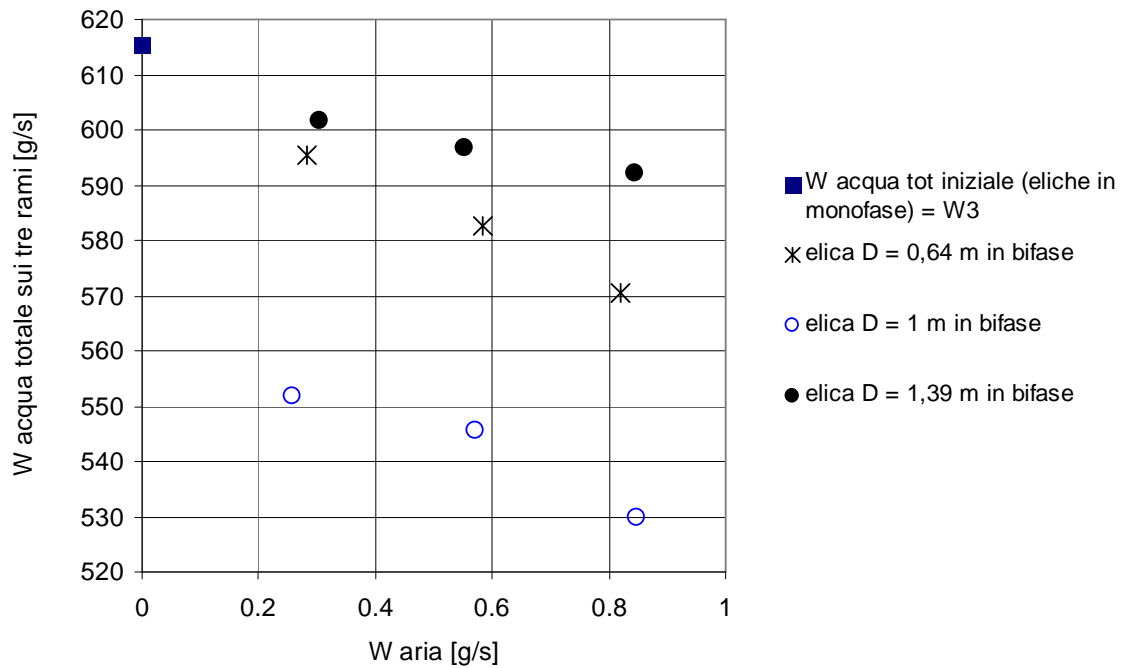


Figura 131: Andamento portata totale durante le prove con portata W3. Circuito B Prove I.

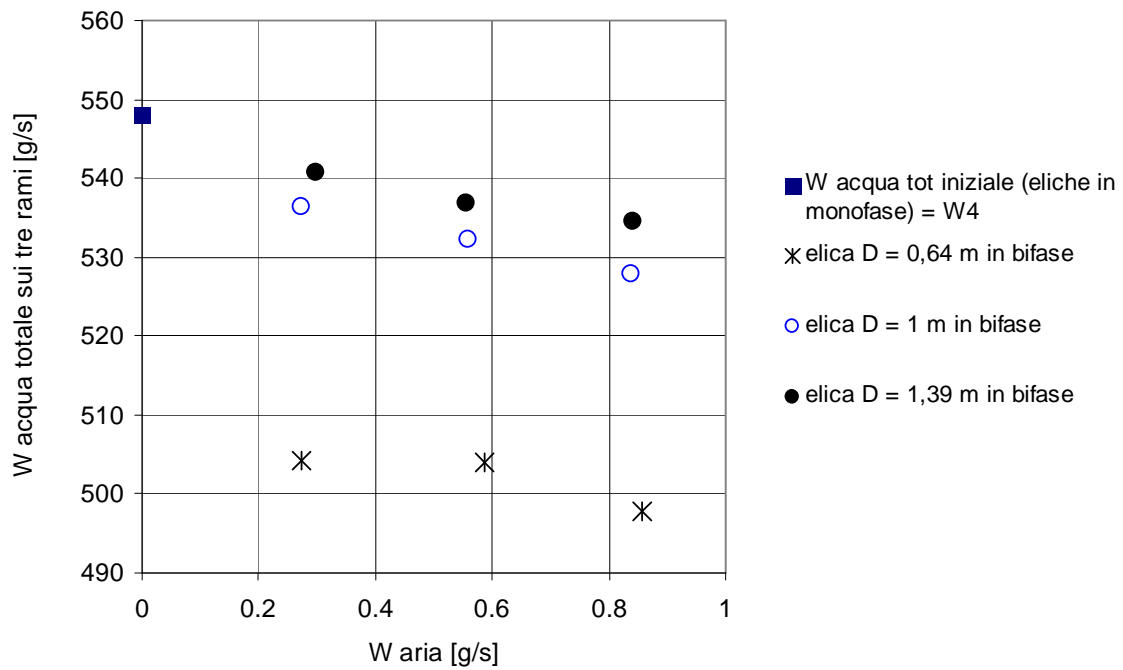


Figura 132: Andamento portata totale durante le prove con portata W4. Circuito B Prove I.

### 7.2.2 Differenze di pressione. Circuito B prove I.

Si riportano le cadute di pressione tra ingresso ed uscita delle sezioni di prova in regime monofase confrontandole con la curva ricavata con la sperimentazione in regime monofase con il circuito A (Figura 133, Figura 134 e Figura 135).

Da questo confronto si può vedere come i punti testati in questa campagna sperimentale si posizionino sulla curva ricavata precedentemente con piccoli scostamenti dovuti ad errori di misura.

Si sono valutate le cadute di pressione per attrito come per il circuito A; le cadute di pressione misurate e le relative cadute di pressione per attrito sono riportate in Appendice B.

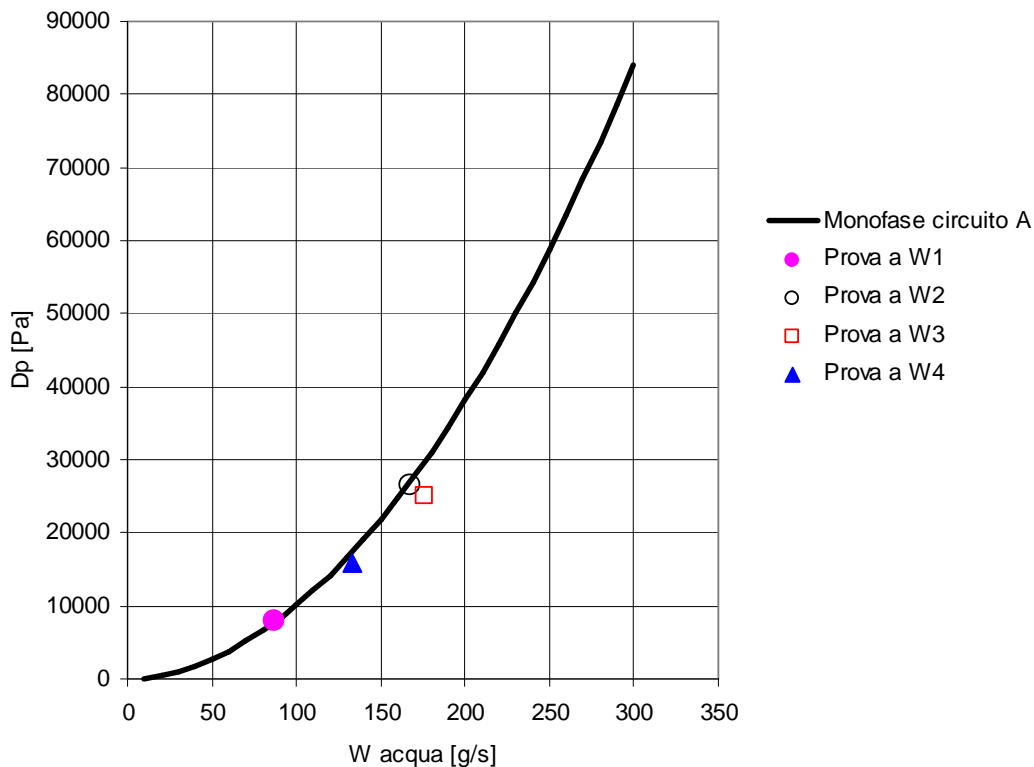


Figura 133: Confronto cadute di pressione in monofase nell' elica con  $D = 1,39$  m. Circuito B Prove I.

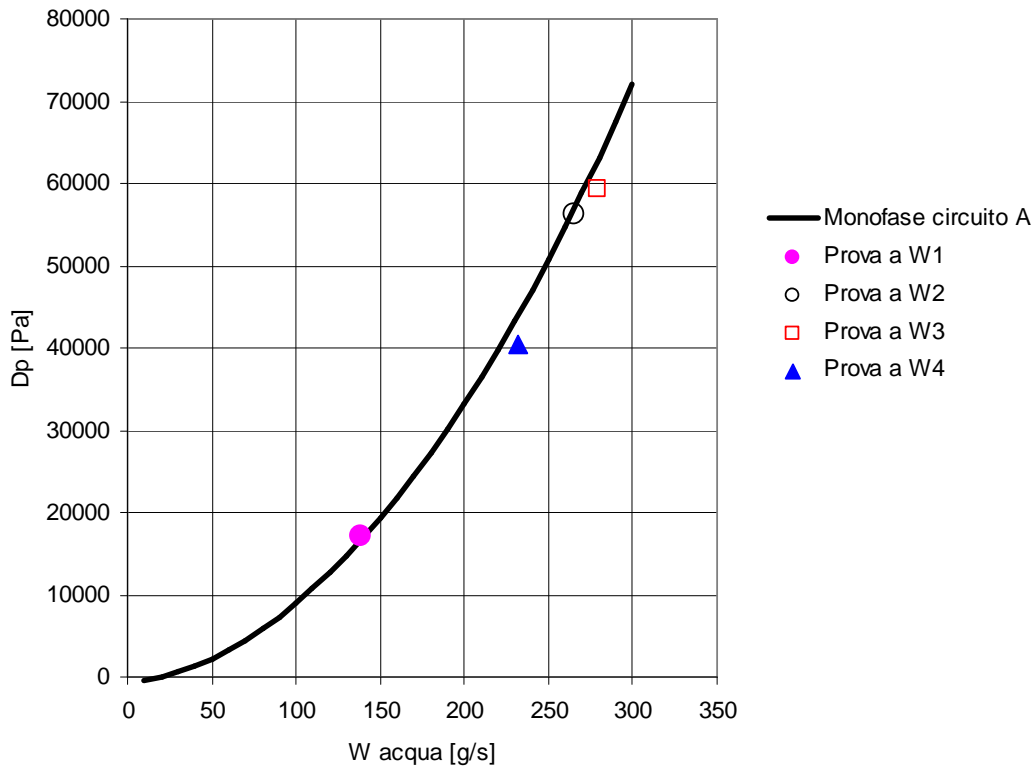


Figura 134: Confronto cadute di pressione in monofase nell' elica con  $D = 1$  m. Circuito B Prove I.

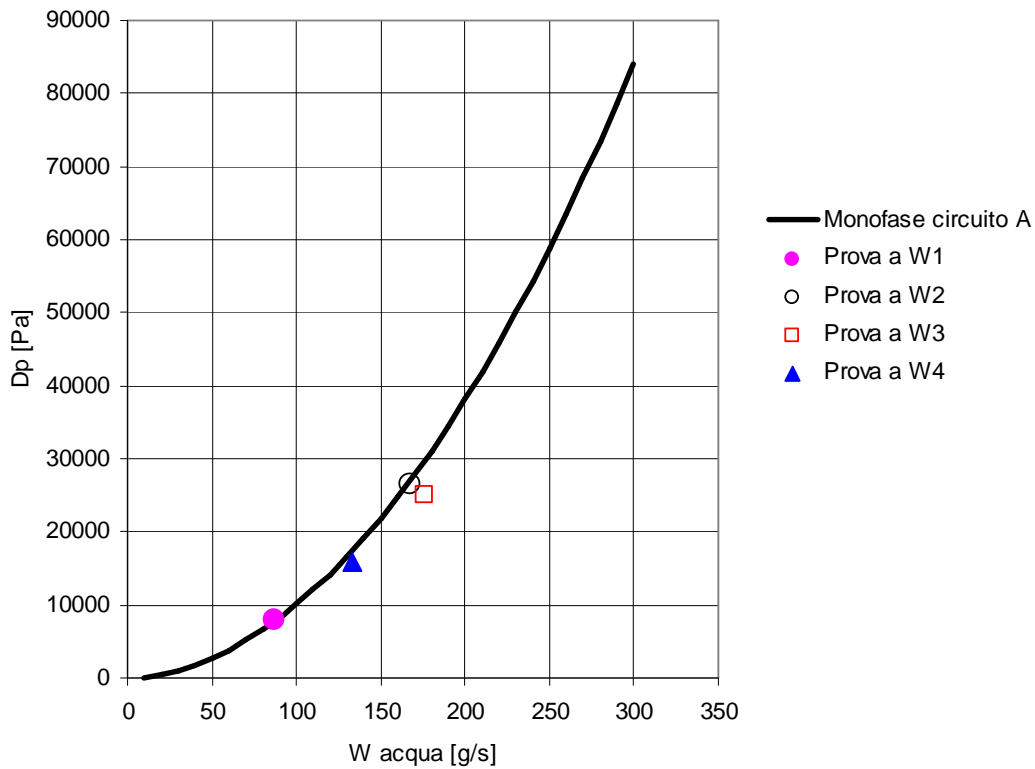


Figura 135: Confronto cadute di pressione in monofase nell' elica con  $D = 0,64$  m. Circuito B Prove I.

### 7.2.3 Calcolo della portata in massa di aria. Circuito B prove I.

Come per il circuito A la scala dei rotametri è riportata in condizioni nominali (temperatura pari a 20°C e pressione di 1,013 bar). La pressione di esercizio del rotametri, in questa tipologia di prove, è stata compresa tra 6,7 e 6,9 bar.

Per ottenere la portata d'aria si è utilizzata come nel caso del circuito A la formula:

$$W_{aria} (kg / s) = W_{aria} (l / h) \cdot \rho_{no\ min\ ale} \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{P_{assoluta\_aria} (bar)}{P_{no\ min\ ale} (bar)}} \cdot \sqrt{\frac{T_{no\ min\ ale} (K)}{T_{ambiente} (K)}} \cdot \frac{1}{3600}$$

in cui:

$$T_{nominale} = 20^{\circ}C$$

$$P_{nominale} = 1,013\ bar$$

$$\rho_{nominale} \text{ (densità dell'acqua a } 20^{\circ}C \text{ e } 1,013\ bar) = 1,205\ kg/m^3.$$

Le caratteristiche dell'asometro utilizzato per le prove di tipo I sono riportate in Tabella 50.

| Tipo       | Range portata<br>[nm <sup>3</sup> /h] | Temperatura valutazione<br>[°C] | Pressione valutazione<br>[mbar] | Densità valutazione<br>[kg/nm <sup>3</sup> ] |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| COF 002068 | 0,077 – 0,77                          | 20                              | 1031                            | 1,205  |

**Tabella 50: Caratteristiche asometro utilizzato nelle prove I. Circuito B.**

Le portate d'aria utilizzate in questa serie di misure sono 0 (monofase), 0,25 g/s, 0,58 g/s e 0,85 g/s.

Per ogni serie di prove al variare della portata d'acqua si è effettuata una prima acquisizione in deflusso monofase, per poter avere un controllo sistematico attraverso un confronto immediato dei risultati ottenuti con le prove in monofase effettuate sia con il circuito A che con il circuito B.

### 7.2.4 Grado di vuoto. Circuito B prove I.

Per calcolare il grado di vuoto si è valutata, come per le prove effettuate con il circuito A, la massa d'acqua presente nell'elica in condizioni di deflusso monofase e la massa d'acqua presente al momento della chiusura delle valvole di intercettazione nelle condizioni bifase.

Anche in questo caso si è valutato il grado di vuoto  $\alpha$  attraverso la formula:

$$\alpha = 1 - \frac{M_{bifase}}{M_{monofase}} = \frac{V_{gas}}{V_{monofase}}$$

in cui  $M$  è la massa in kg e  $V$  il volume in  $m^3$ .

Per il calcolo del titolo in massa  $x$  e del titolo volumetrico  $\beta$  si sono utilizzate le formule riportate nel capitolo precedente.

Nei diagrammi successivi (da Figura 136 a Figura 139) è riportato l'andamento del grado di vuoto nelle sezioni di prova in regime bifase in funzione della portata d'aria e della portata d'acqua.

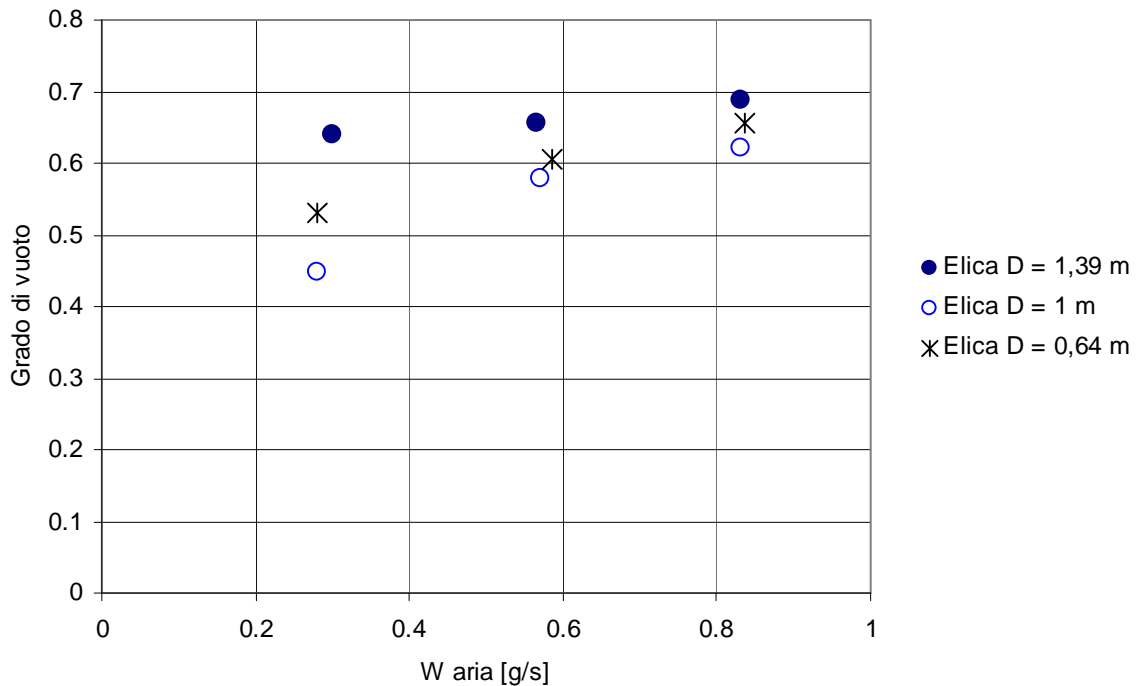


Figura 136: Grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria (Portata acqua  $W_1$ ). Circuito B Prove I.

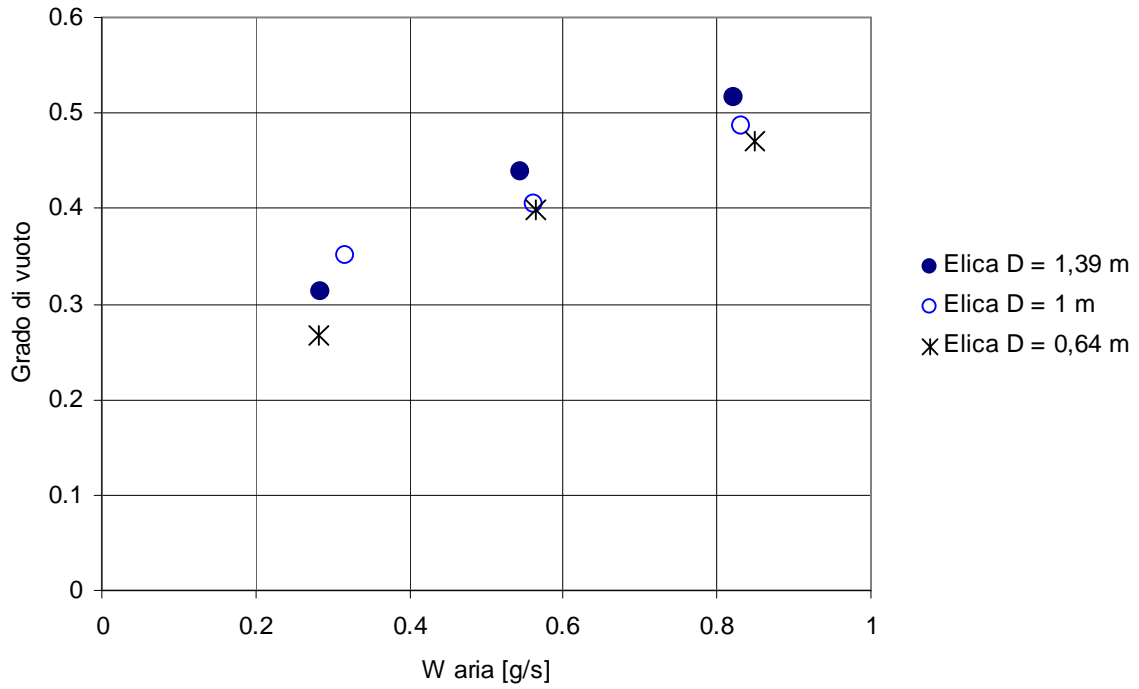


Figura 137: Grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria (Portata acqua W2). Circuito B Prove I.

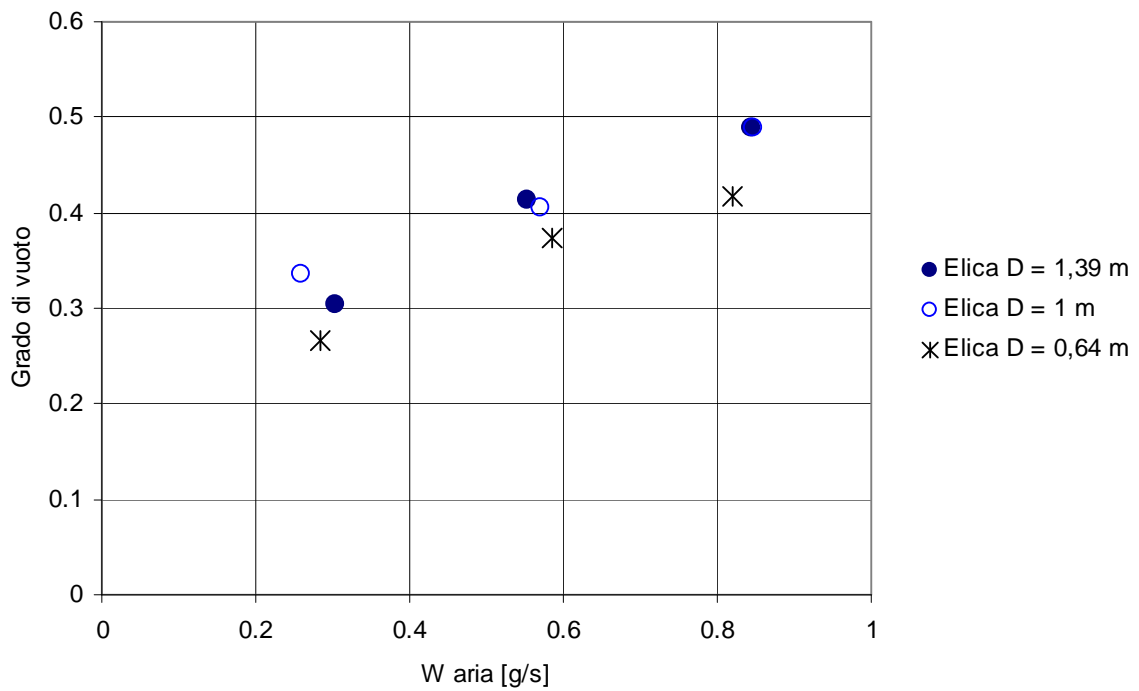


Figura 138: Grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria (Portata acqua W3). Circuito B Prove I.



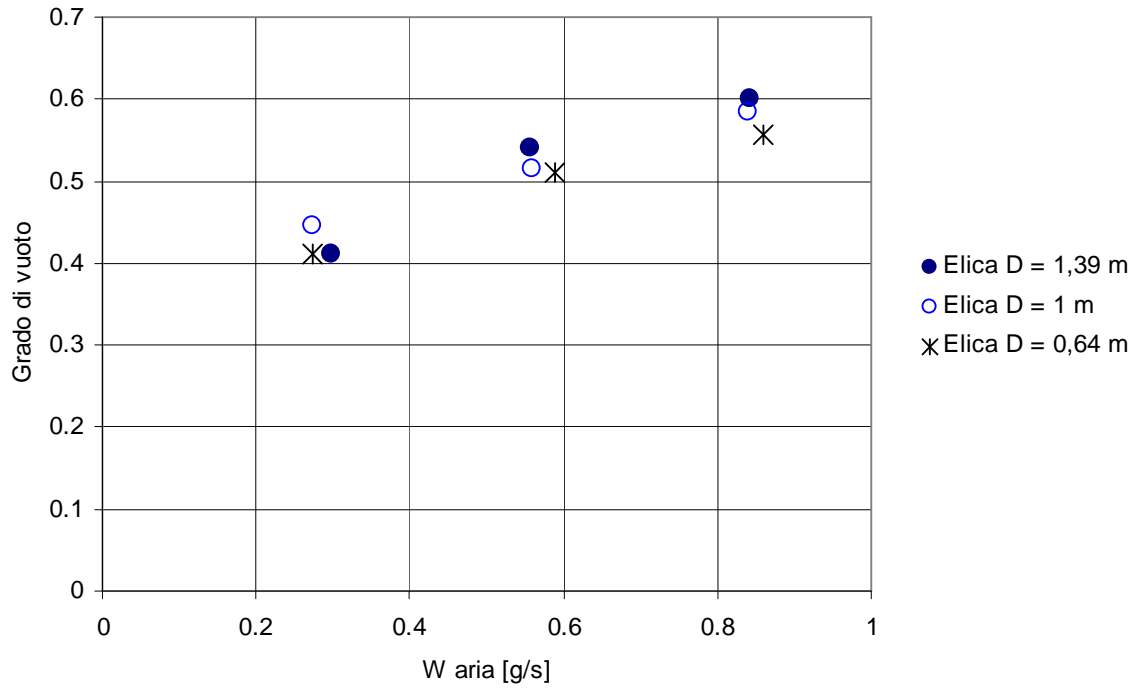


Figura 139: Grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria (Portata acqua W4). Circuito B Prove I.

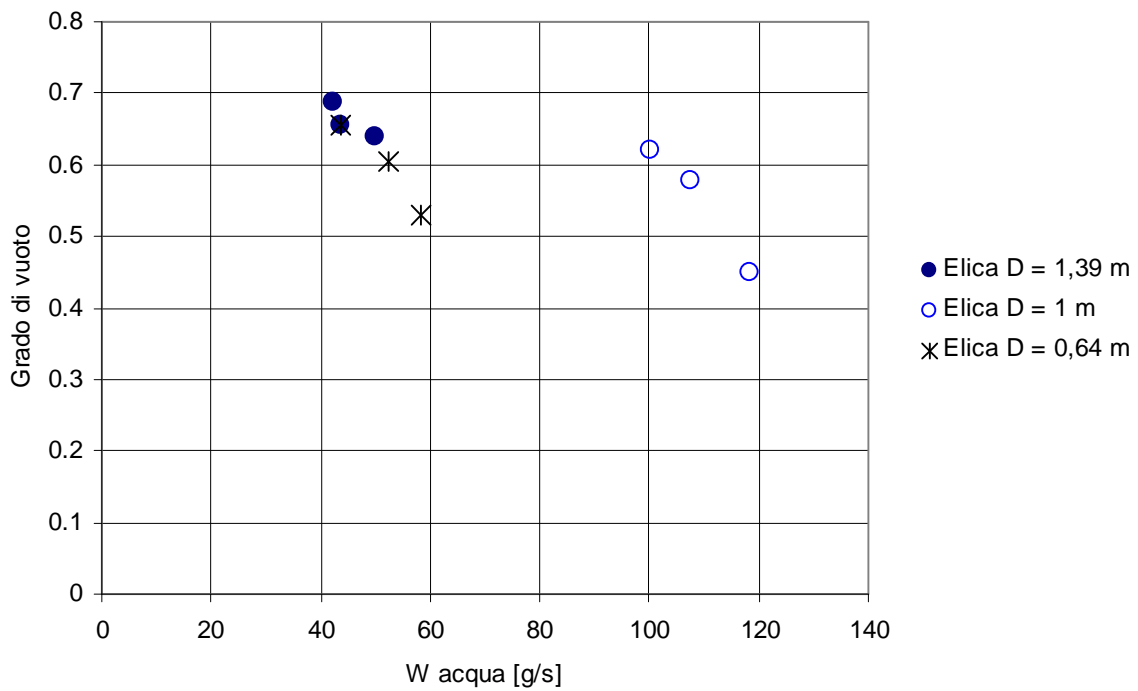


Figura 140: Grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di acqua (Portata acqua W1). Circuito B Prove I.

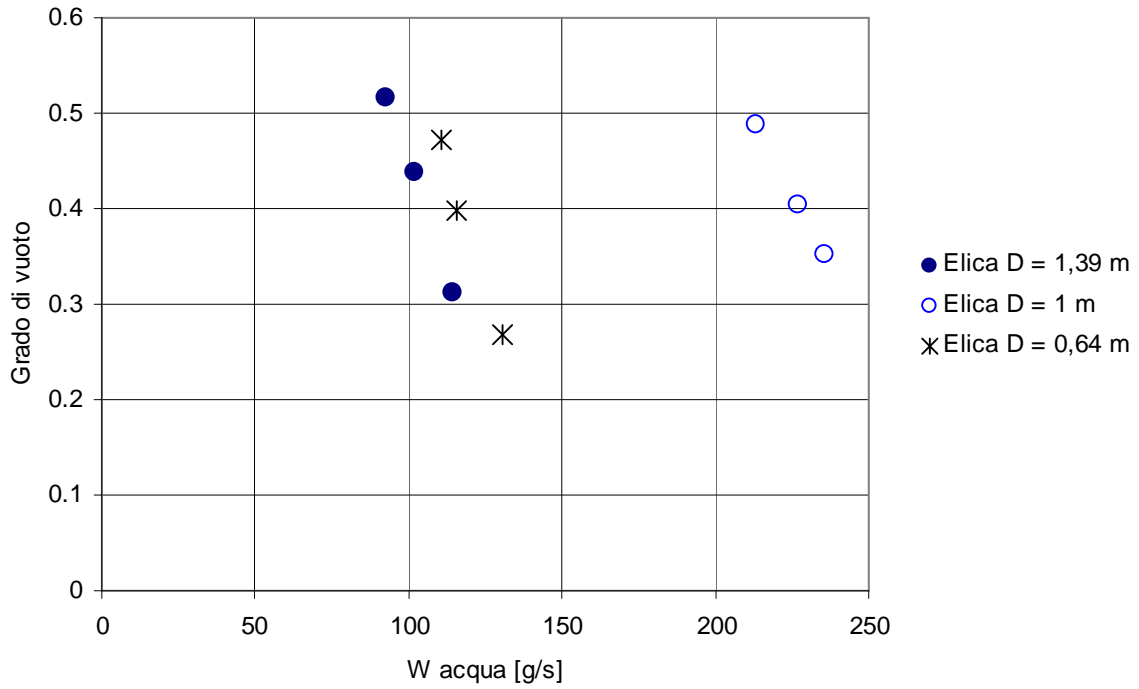


Figura 141: Grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di acqua (Portata acqua W2). Circuito B Prove I.

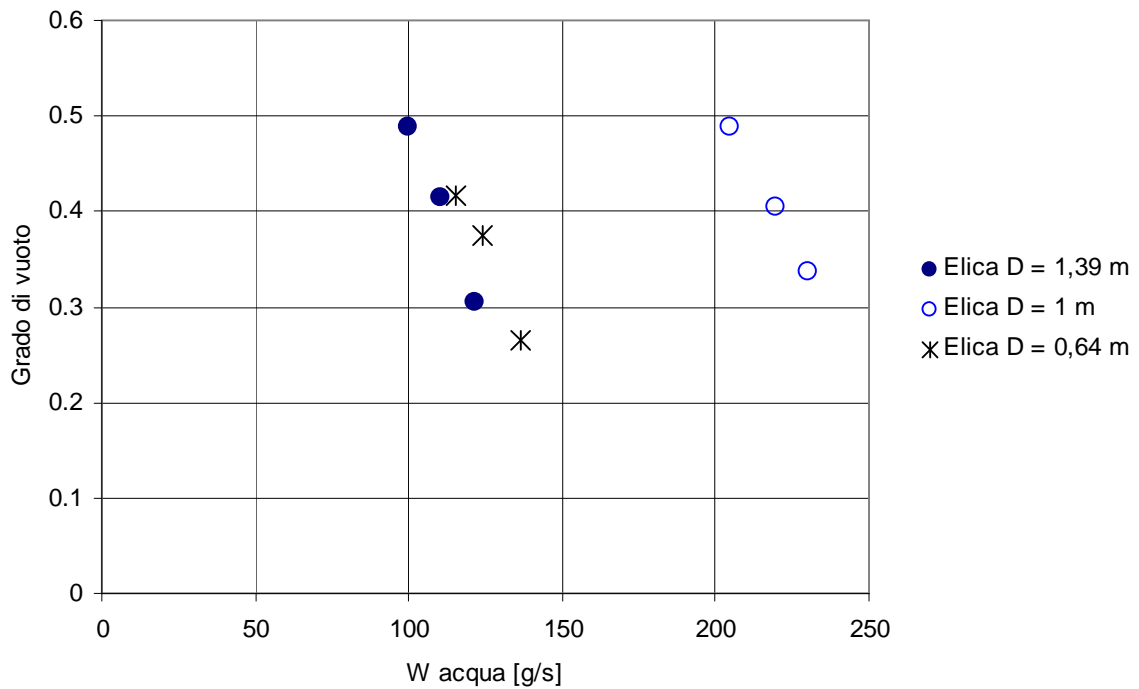
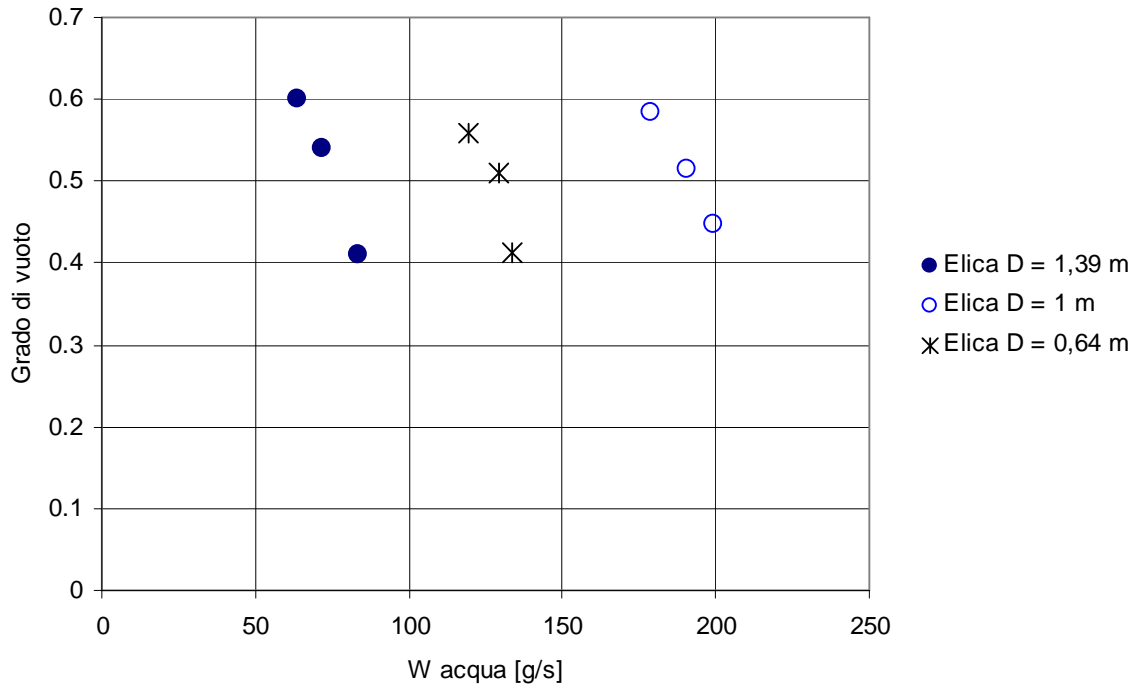


Figura 142: Grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di acqua (Portata acqua W3). Circuito B Prove I.



**Figura 143: Grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di acqua (Portata acqua W4). Circuito B Prove I.**

Il grado di vuoto in queste prove risulta compreso tra 0,26 e 0,69; questi valori sono confrontabili con quelli ottenuti con le prove effettuate con il circuito A.

A causa della redistribuzione della portata d'acqua nei rami al variare della portata d'aria nell'elica in condizioni bifase si ottengono differenti gradi di vuoto il cui andamento è riportato in Figura 140, Figura 141, Figura 142 e Figura 143.

Nei diagrammi successivi (da Figura 144 a Figura 153) è riportato l'andamento del grado di vuoto nelle sezioni di prova in regime bifase in funzione del titolo in massa  $x$  e del titolo volumetrico  $\beta$ .

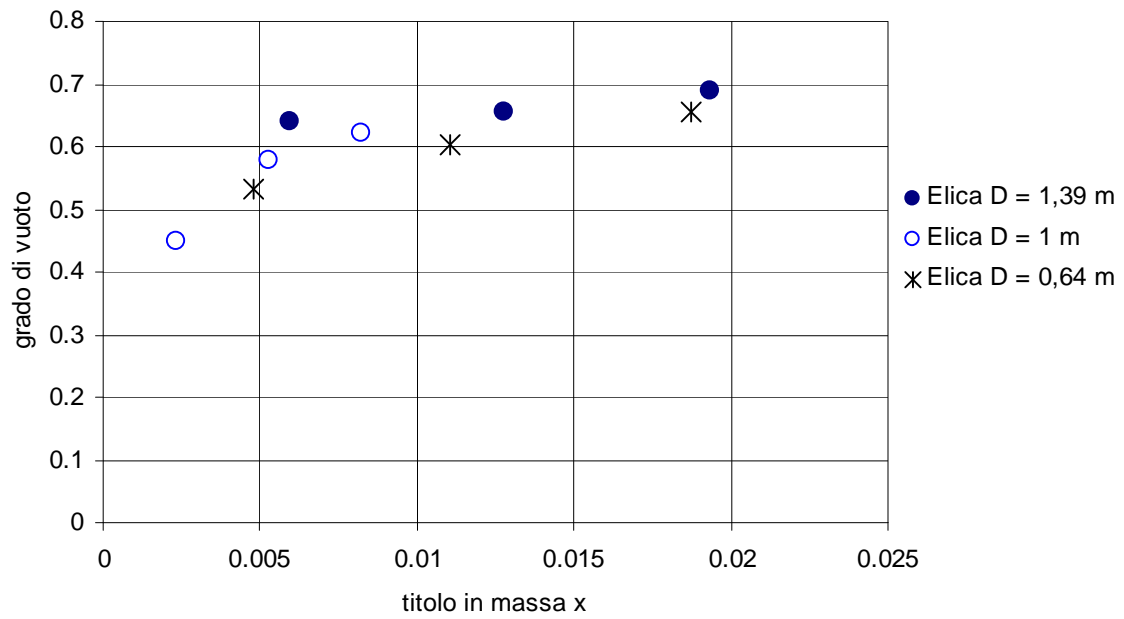


Figura 144: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione del titolo in massa  $x$ . (Portata W1) Circuito B Prove I.

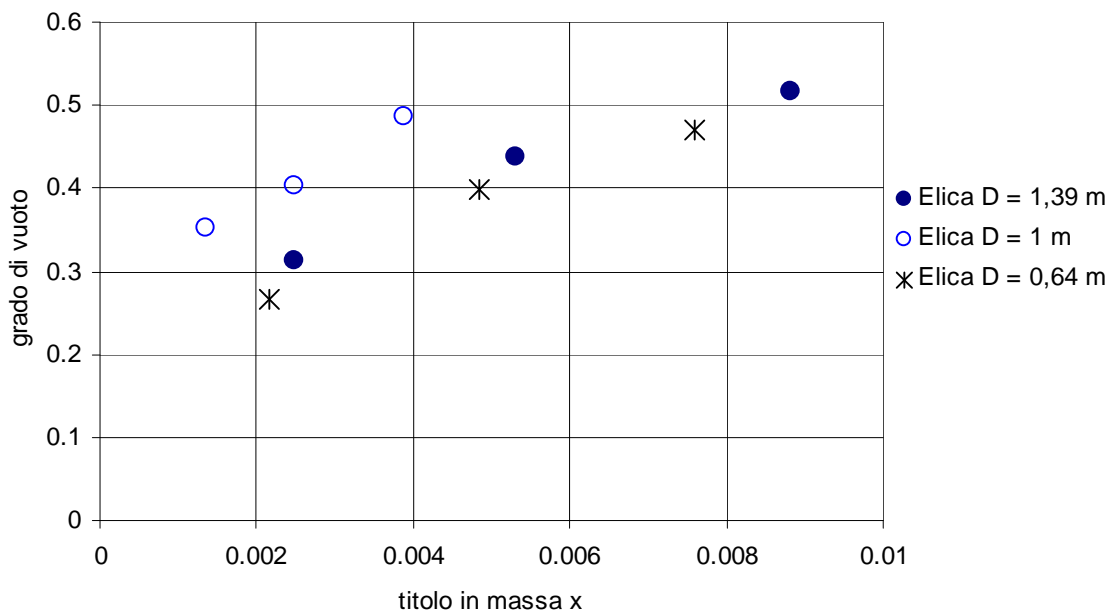


Figura 145: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione del titolo in massa  $x$ . (Portata W2) Circuito B Prove I.

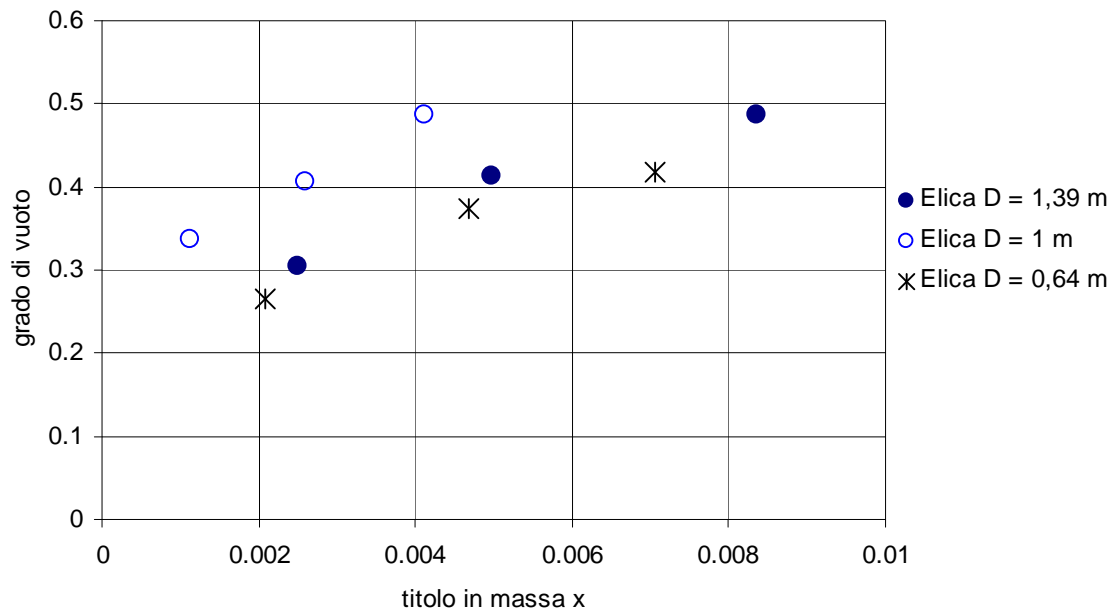


Figura 146: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione del titolo in massa  $x$ . (Portata W3) Circuito B Prove I.

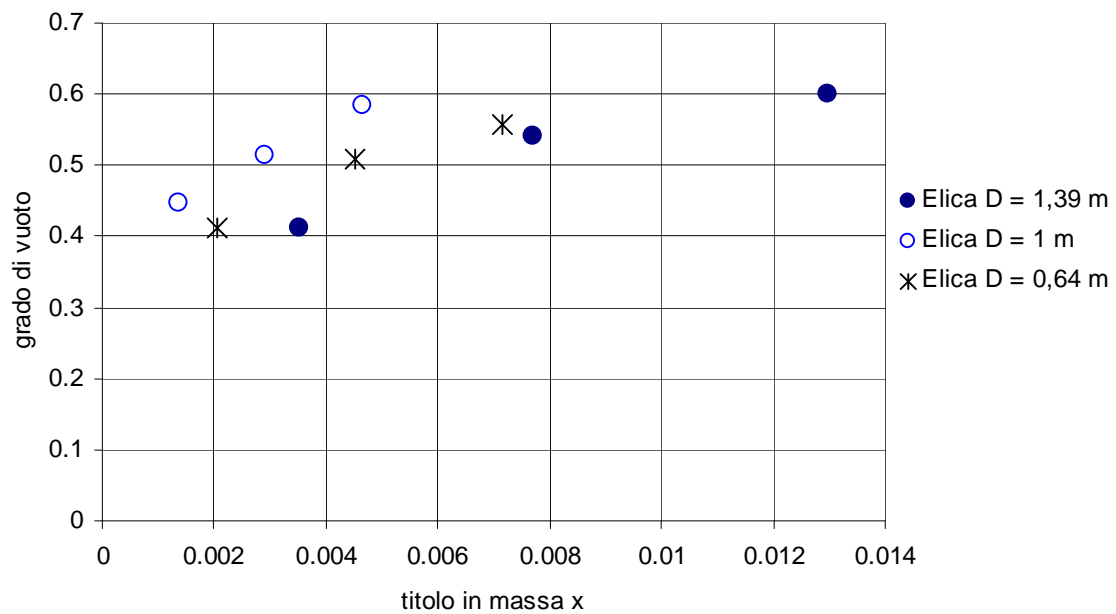


Figura 147: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione del titolo in massa  $x$ . (Portata W4) Circuito B Prove I.

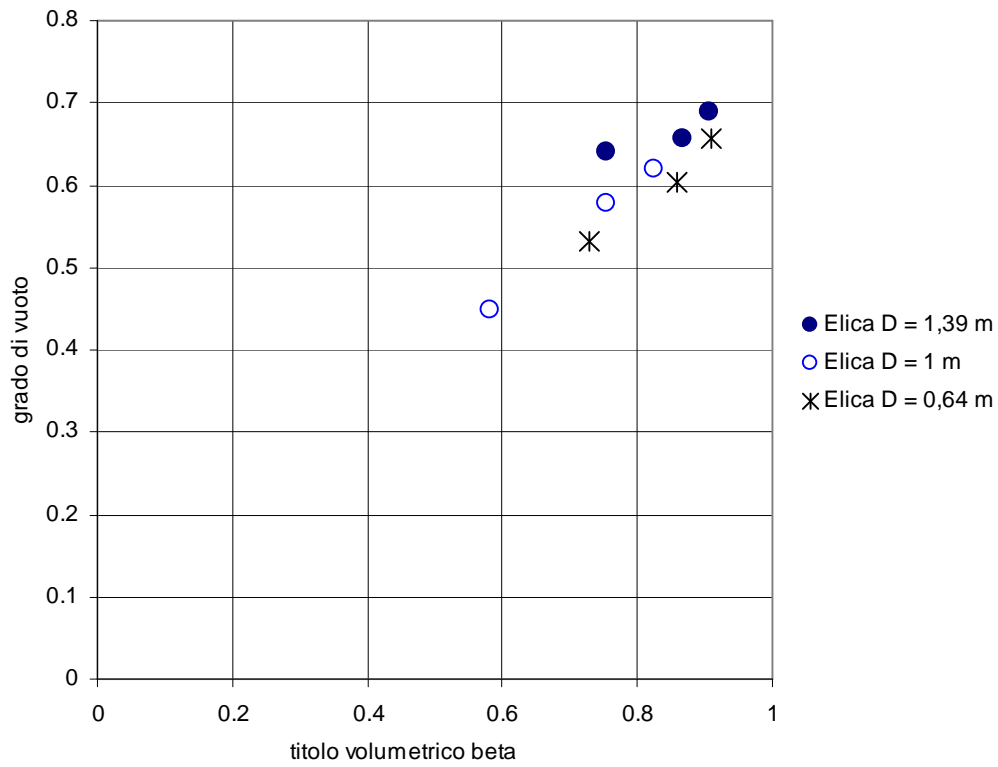


Figura 148: Grado di vuoto in funzione del titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata  $W1$ ) Circuito B Prove I.

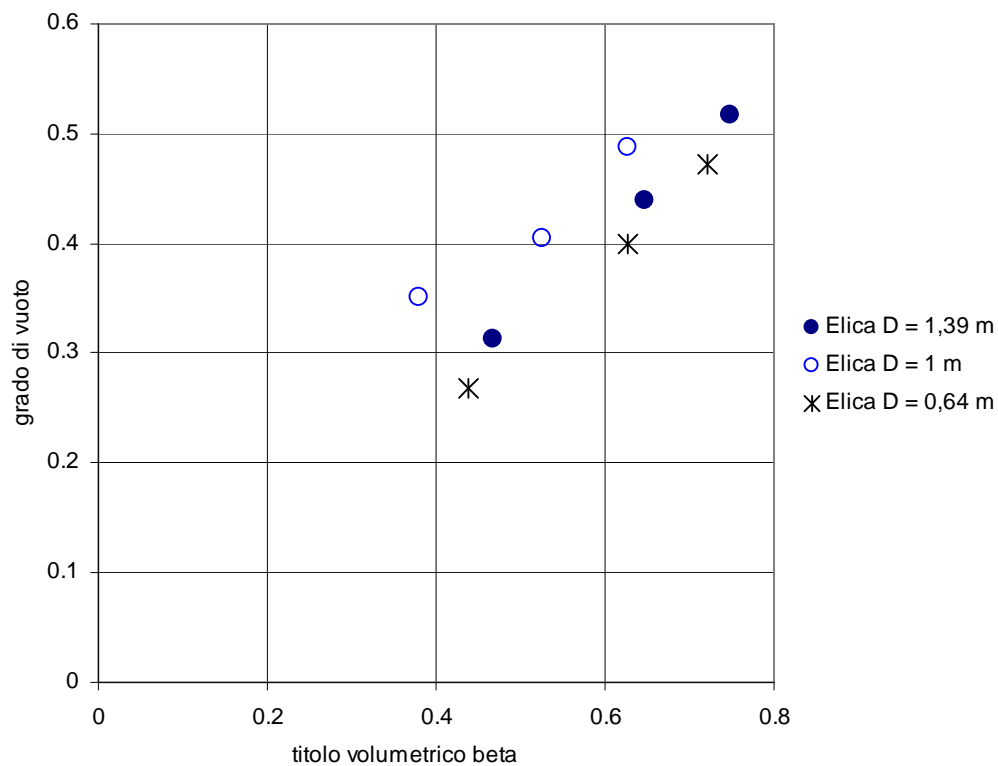


Figura 149: Grado di vuoto in funzione del titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata  $W2$ ) Circuito B Prove I.

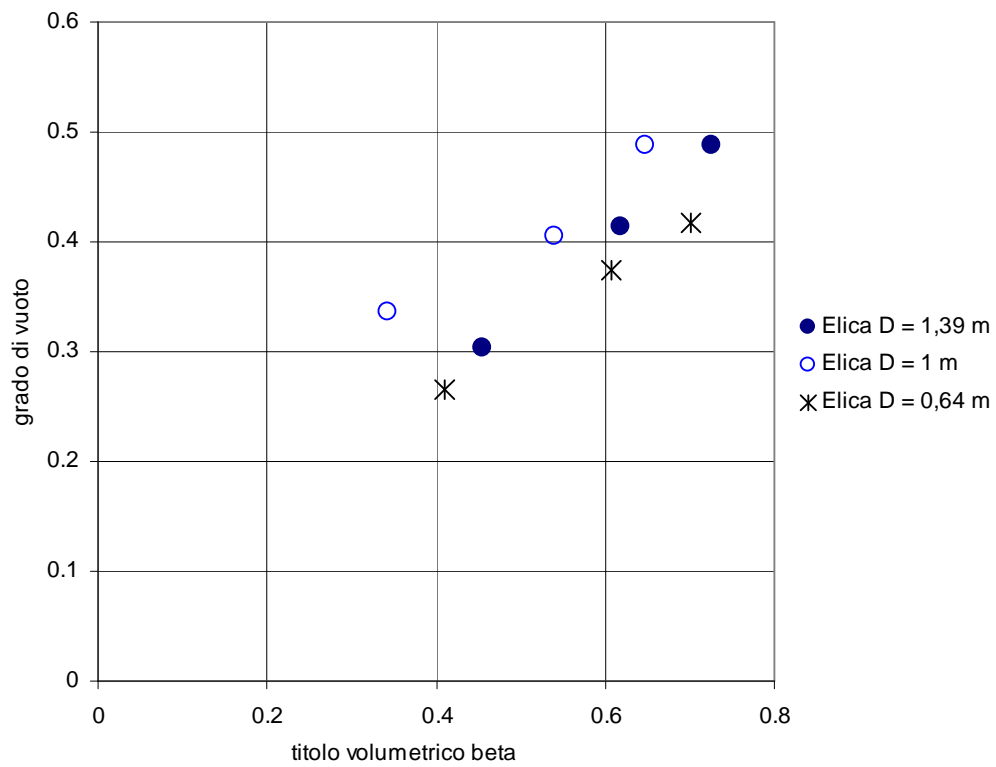


Figura 150: Grado di vuoto in funzione del titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W3) Circuito B Prove I.

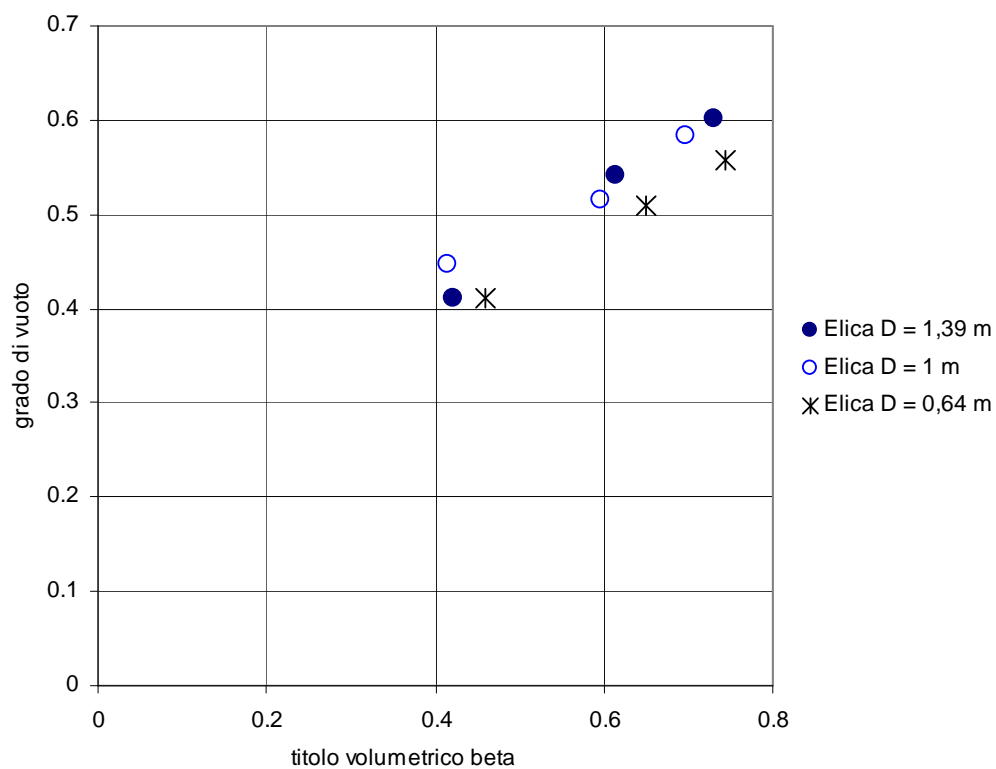


Figura 151: Grado di vuoto in funzione del titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W4) Circuito B Prove I.

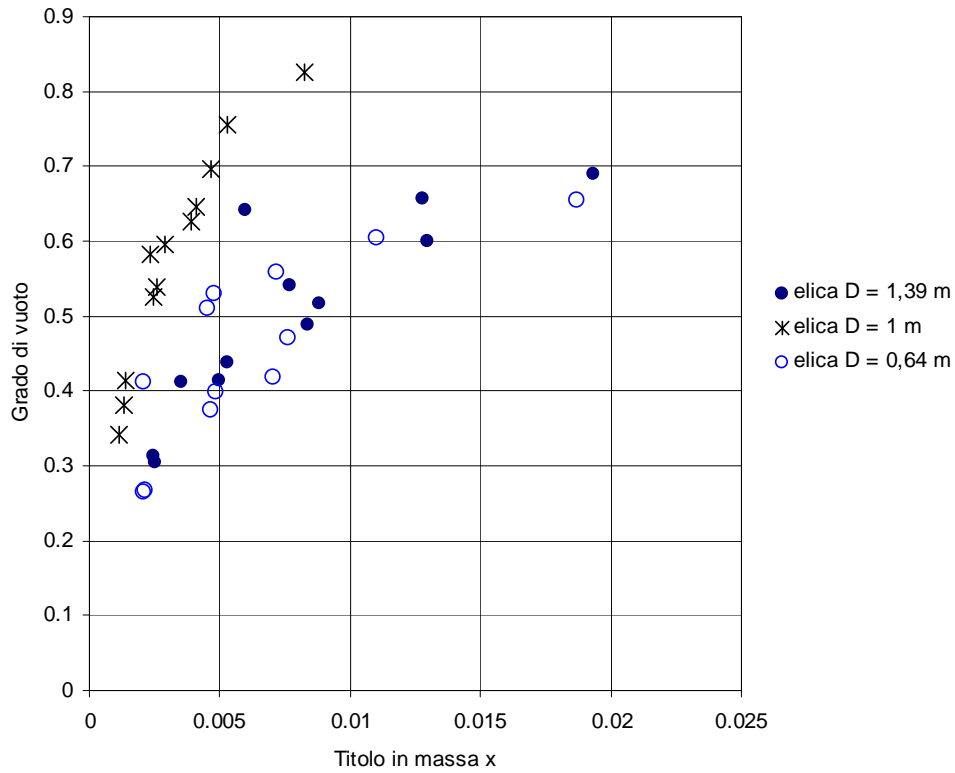


Figura 152: Grado di vuoto in funzione del titolo x medio tre eliche. Circuito B Prove I.

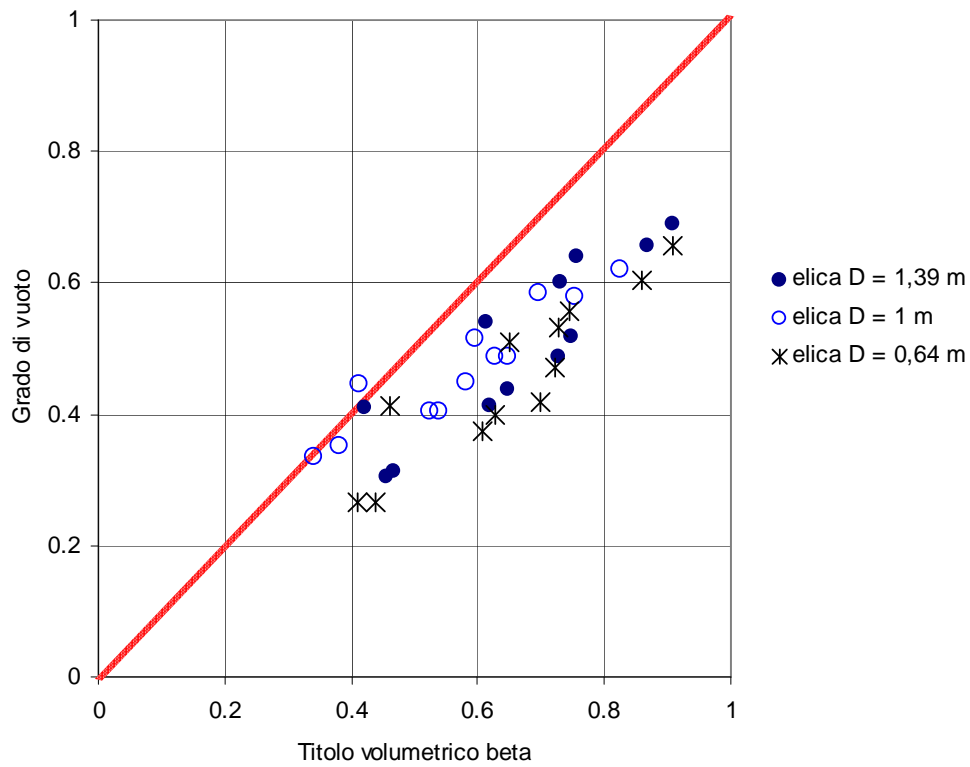


Figura 153: Grado di vuoto in funzione del titolo volumetrico per tre eliche. Circuito B Prove I.



Il titolo in massa  $x$  per questa serie di prove risulta compreso tra 0,001 e 0,019 e il titolo volumetrico  $\beta$  risulta compreso tra 0,34 e 0,9.

Nelle misure si evidenzia che il grado di vuoto risulta essere minore del titolo volumetrico, al contrario di quanto si è ottenuto con le prove effettuate con il circuito A; lo *slip ratio*  $S$  è quindi nettamente maggiore di uno per quasi tutti i punti testati, cioè la fase gassosa percorre l'elica a velocità più alta della fase liquida.

In Tabella 51 sono riportati i valori di *slip ratio* ricavati con questa tipologia di prove.

| Portate d'acqua<br>totali | Valori <i>slip ratio</i><br>Elica D = 0,64 m | Valori <i>slip ratio</i><br>Elica D = 1 m | Valori <i>slip ratio</i><br>Elica D = 1,39 m |
|---------------------------|--|---|--|
| W1 = 290 g/s              | 2,37 – 3,97 – 5,27                           | 1,70 – 2,24 – 2,90                        | 1,73 – 3,4 – 4,45                            |
| W2 = 560 g/s              | 2,13 – 2,54 – 2,89                           | 1,13 – 2,24 – 1,77                        | 1,94 – 2,34 – 2,78                           |
| W3 = 580 g/s              | 1,92 – 2,59 – 3,26                           | 1,02 – 1,71 – 1,92                        | 1,91 – 2,29 – 2,78                           |
| W4 = 530 g/s              | 1,21 – 1,78 – 2,3                            | 0,87 – 1,39 – 1,64                        | 1,04 – 1,35 – 1,8                            |

**Tabella 51: Valori dello *slip ratio*. Circuito B Prove I.**

### 7.2.5 Velocità media della miscela. Circuito B prove I.

Anche per questa campagna di prove si è calcolata la velocità media della miscela  $j$  con la formula:

$$j = \frac{Q_{totale}}{A}$$

in cui  $Q$  è la portata volumetrica in  $m^3/s$  ed  $A$  è l'area di passaggio della sezione dei tubi elicoidali ed è pari a circa  $113 \text{ mm}^2$ .

La velocità media della miscela cresce con continuità all'aumentare sia del titolo in massa  $x$  che del titolo volumetrico  $\beta$ , quindi all'aumentare della portata d'aria, ed all'aumentare della portata d'acqua.

Nelle condizioni di prova testate si sono calcolate velocità  $j$  elevate, i cui valori sono riportati in Tabella 52.

| Portate d'acqua<br>totali | Valori di $j$ [m/s]<br>Elica D = 0,64 m | Valori di $j$ [m/s]<br>Elica D = 1 m | Valori di $j$ [m/s]<br>Elica D = 1,39 m |
|---------------------------|---|--------------------------------------|---|
| W1 = 290 g/s              | 1,91 – 3,29 – 4,29                      | 2,52 – 3,89 – 5,10                   | 1,81 – 2,91 – 4,06                      |
| W2 = 560 g/s              | 2,06 – 2,76 – 3,53                      | 3,38 – 4,26 – 5,09                   | 1,90 – 2,57 – 3,27                      |
| W3 = 580 g/s              | 2,05 – 2,80 – 3,42                      | 3,10 – 4,24 – 5,14                   | 1,98 – 2,57 – 3,25                      |
| W4 = 530 g/s              | 2,20 – 3,28 – 4,13                      | 3,02 – 4,19 – 5,24                   | 1,28 – 1,66 – 2,12                      |

**Tabella 52: Valori della velocità media della miscela  $j$ . Circuito B Prove I.**

Si riportano da Figura 154 a Figura 161 gli andamenti della velocità media della miscela  $j$  in funzione del titolo in massa e del titolo volumetrico.

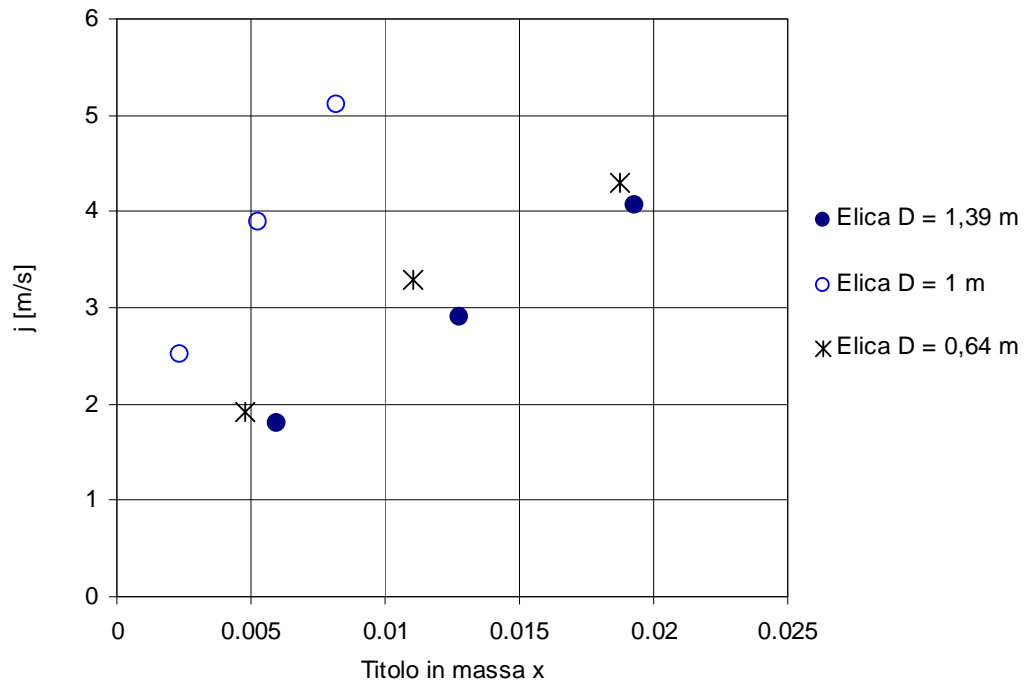


Figura 154: Velocità della miscela - titolo in massa x. (Portata W1). Circuito B Prove I.

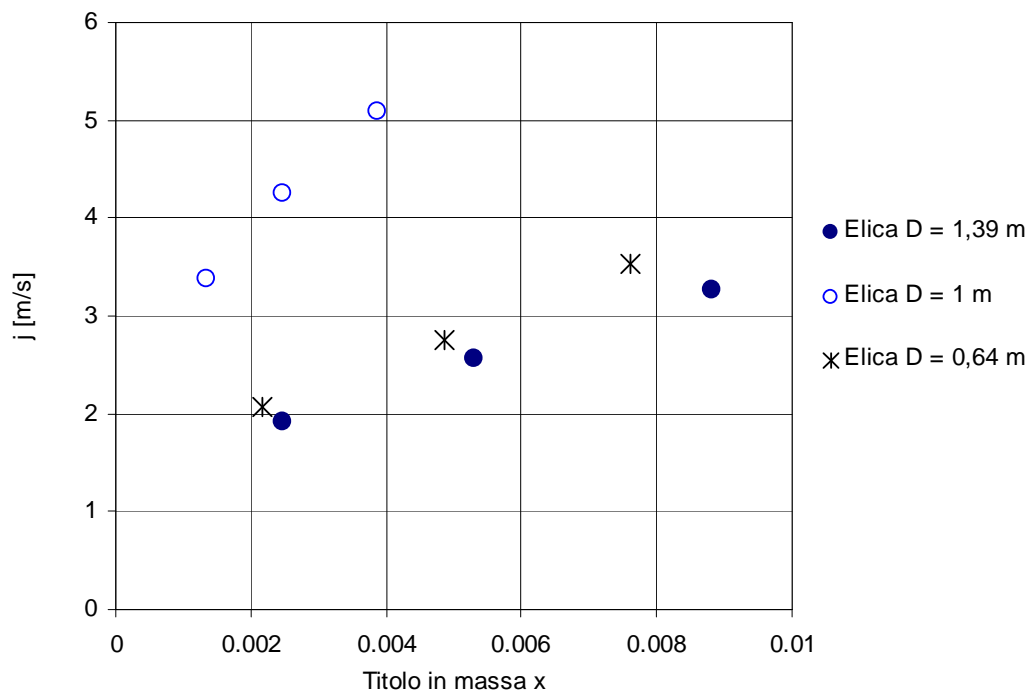


Figura 155: Velocità della miscela - titolo in massa x. (Portata W2). Circuito B Prove I.

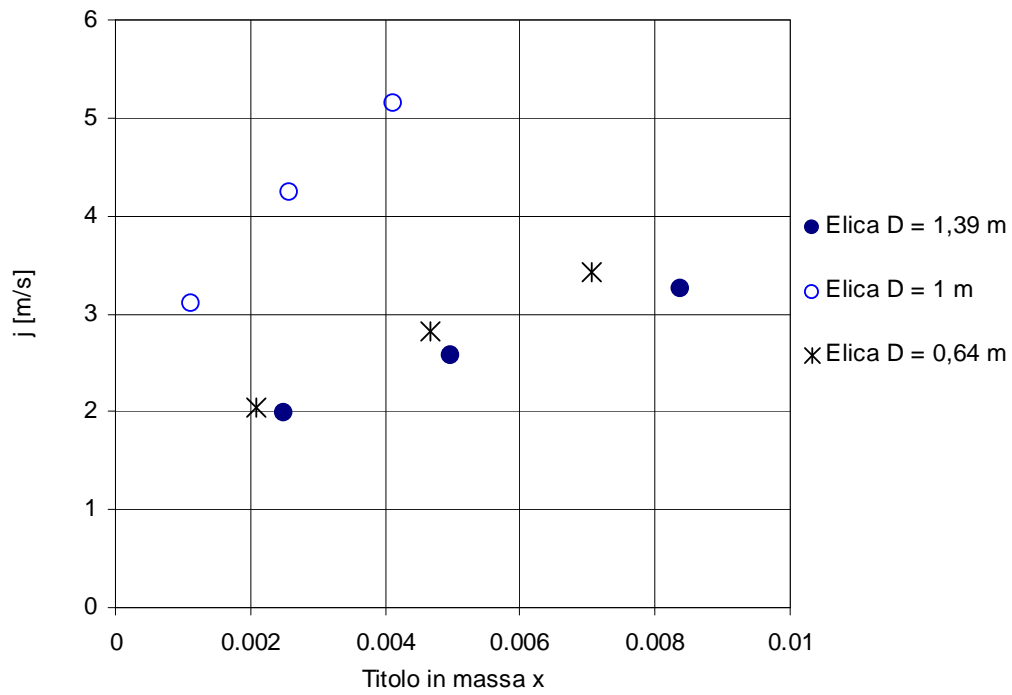


Figura 156: Velocità della miscela - titolo in massa x. (Portata W3). Circuito B Prove I.

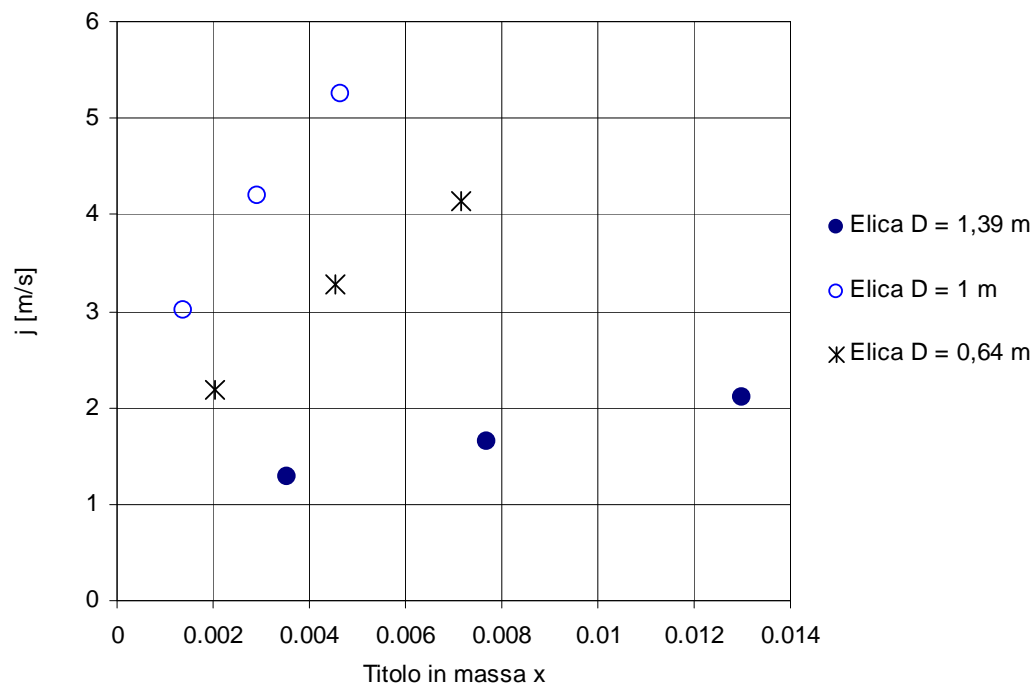


Figura 157: Velocità della miscela - titolo in massa x. (Portata W4). Circuito B Prove I.

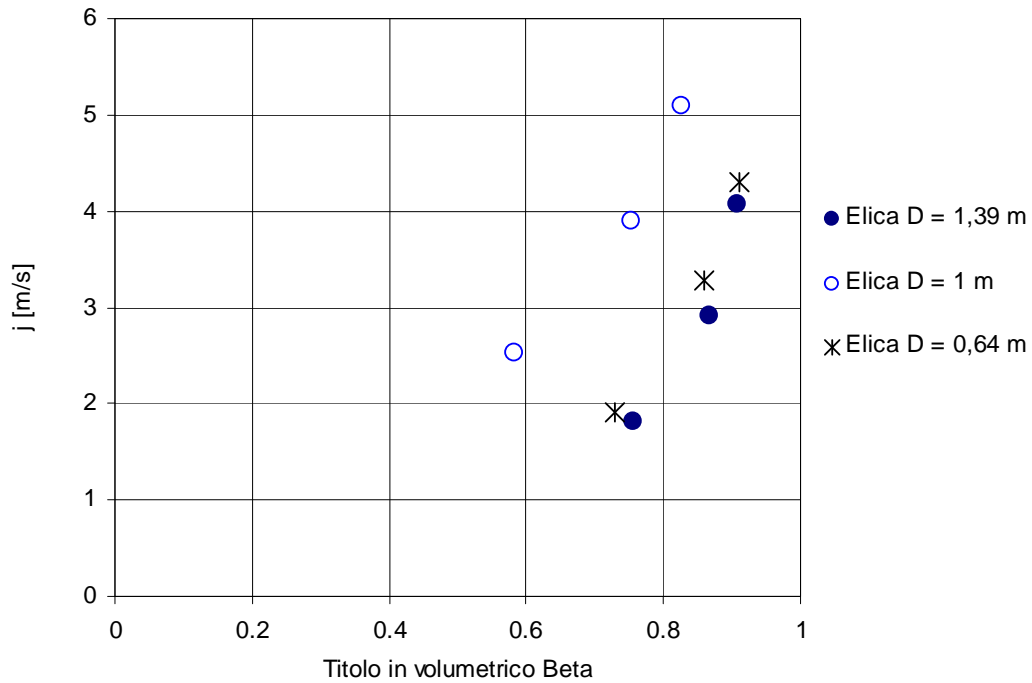


Figura 158: Velocità della miscela - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W1). Circuito B Prove I.

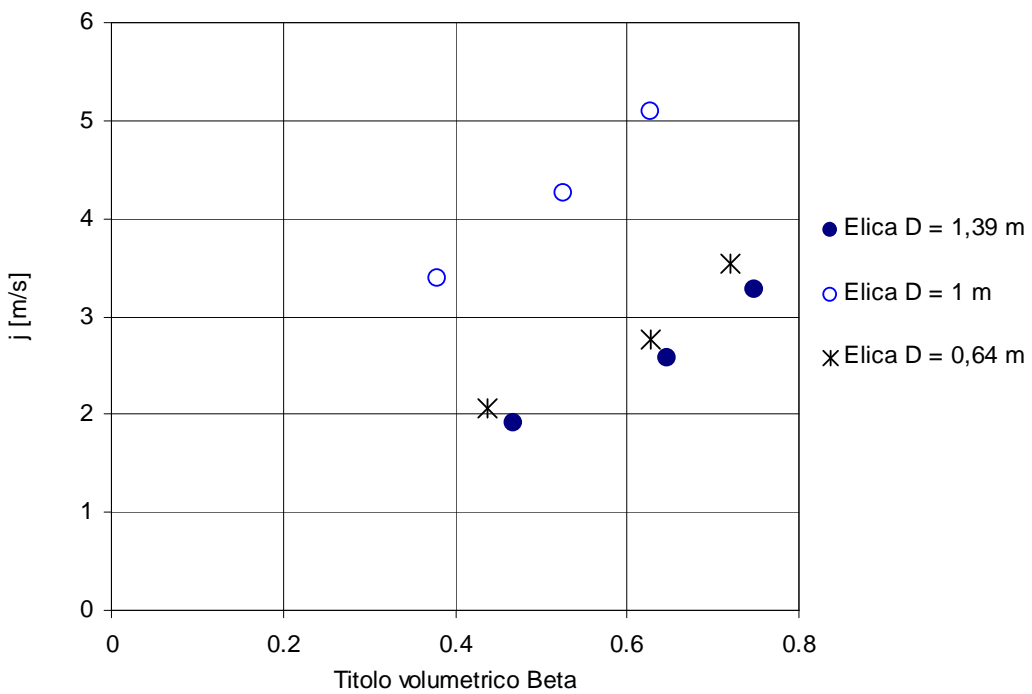


Figura 159: Velocità della miscela - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W2). Circuito B Prove I.

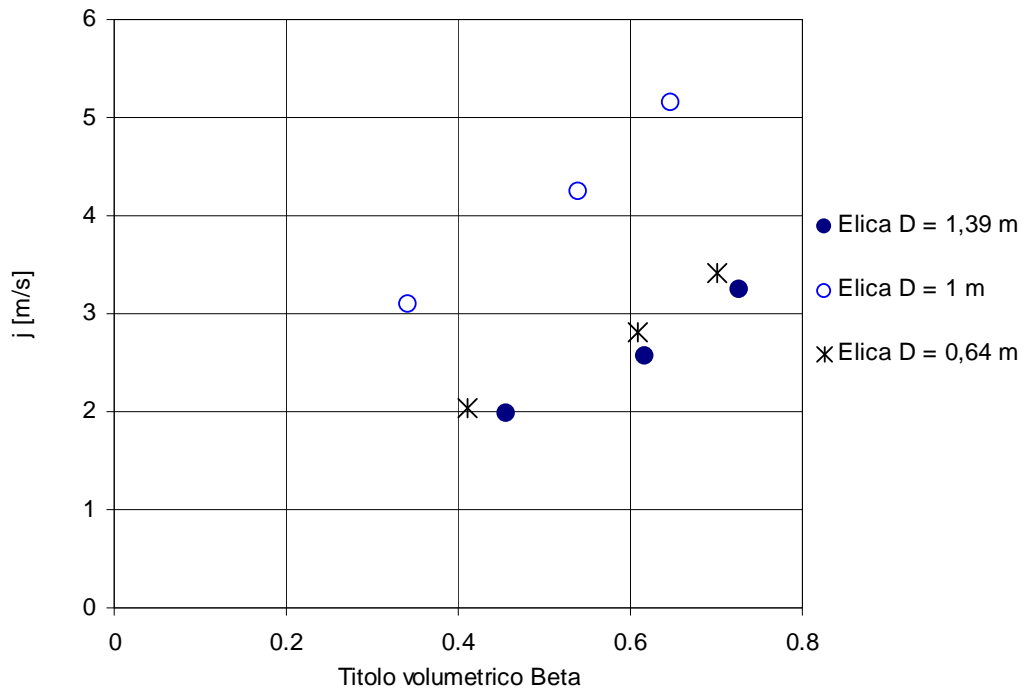


Figura 160: Velocità della miscela - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W3). Circuito B Prove I.

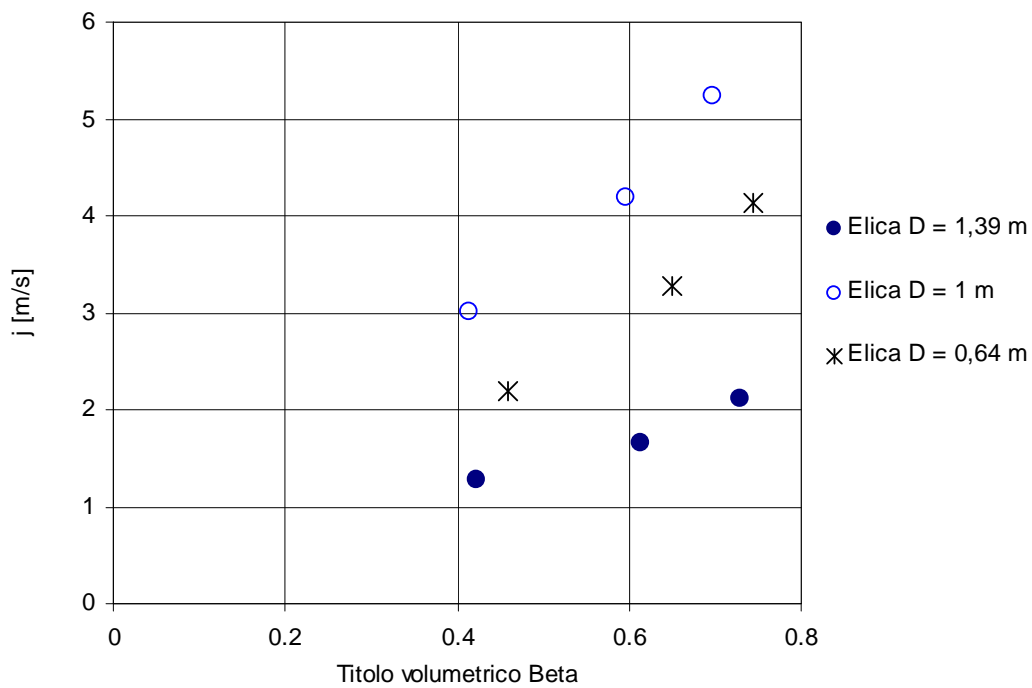


Figura 161: Velocità della miscela - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W4). Circuito B Prove I.

### 7.2.6 Parametro di Martinelli e moltiplicatori bifase per attrito. Circuito B. Prove I

Si è valutato il parametro di Martinelli nelle condizioni sperimentali e il moltiplicatore bifase per attrito con le formulazioni usate in precedenza (per il circuito A):

$$\chi^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{attrito, monofase-liquido}}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{attrito, monofase-gas}}}$$

$$\Phi_{lo}^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{bifase}}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{monofase-acqua}}}$$

$$\Phi_{go}^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{bifase}}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{monofase-gas}}}$$

dove:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{monofase-acqua/gas}} = 4 \cdot f_{\text{acqua/gas}} \cdot \frac{\rho_{\text{acqua/gas}} \cdot u_{\text{acqua/gas}}^2}{2} \cdot \frac{L}{d}$$

in cui fattore di attrito  $f$  è stato valutato mediante le correlazioni di Ito per deflusso laminare e per deflusso turbolento.

Si sono confrontate le formulazioni presenti in letteratura, per il calcolo del fattore di moltiplicazione bifase per tubi dritti, con i risultati ottenuti dall'analisi delle prove effettuate. Nelle figure successive (da Figura 162 a Figura 173) sono riportati gli andamenti del moltiplicatore bifase per attrito in funzione del parametro di Martinelli per le tre sezioni di prova al variare della portata d'acqua totale presa in esame; i punti sono in accordo con le previsioni delle correlazioni per moto turbolento.

• Portata W1

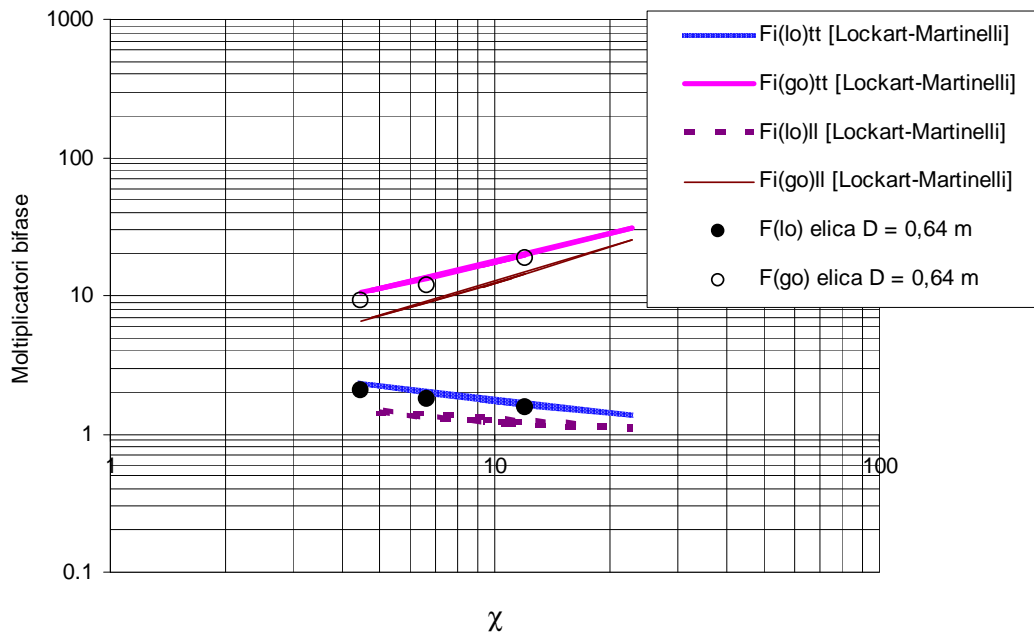


Figura 162: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 0,64$  m  
Circuito B Prove I.

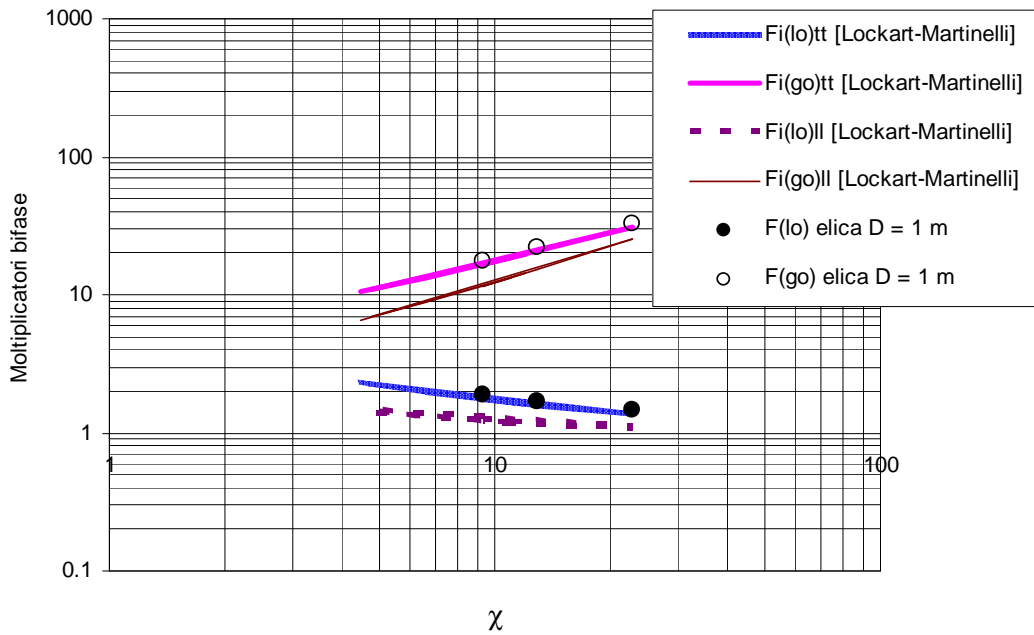


Figura 163: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1$  m  
Circuito B Prove I.



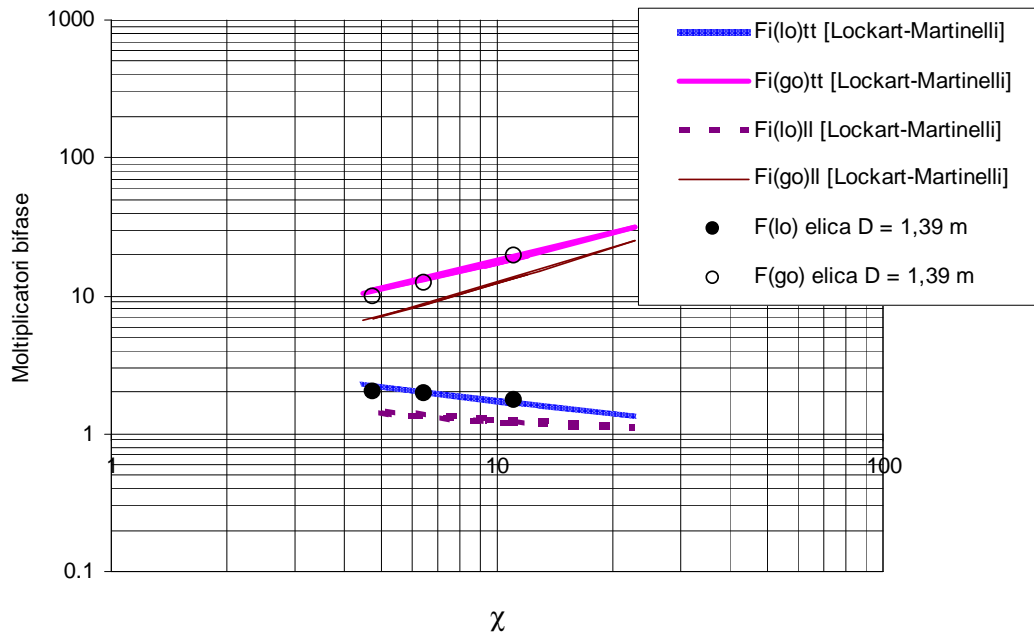


Figura 164: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1,39$  m  
Circuito B Prove I.

- Portata W2

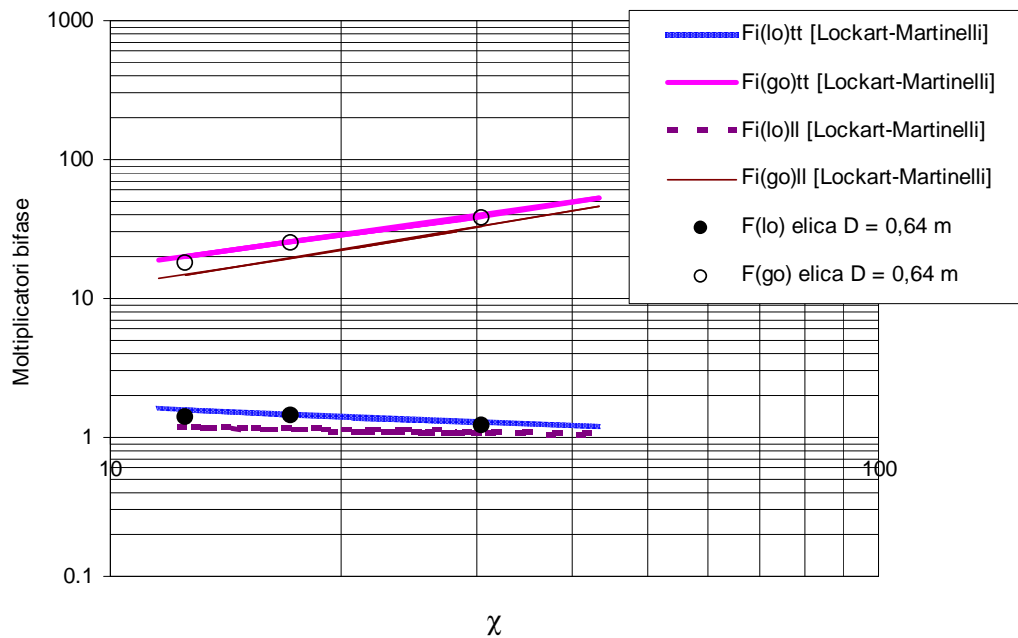
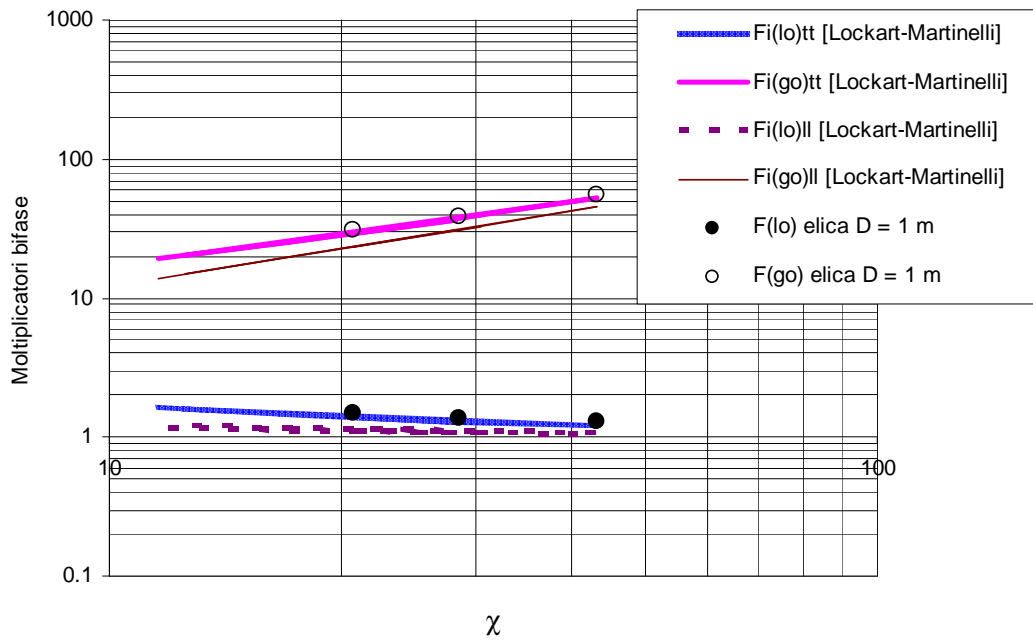
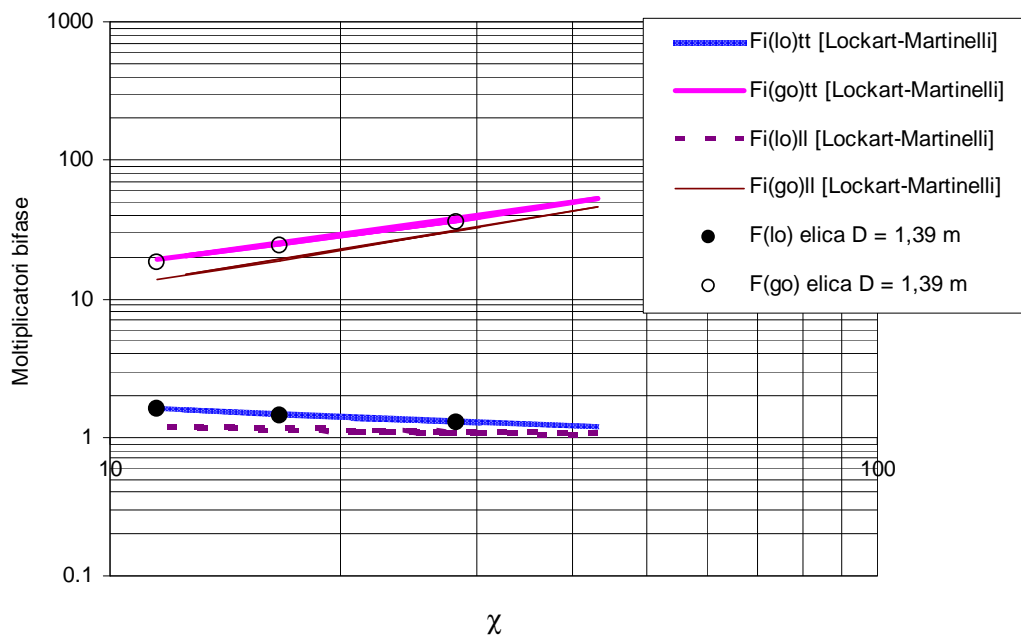


Figura 165: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 0,64$  m  
Circuito B Prove I.



**Figura 166: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica D = 1 m  
Circuito B Prove I.**



**Figura 167: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica D = 1,39 m  
Circuito B Prove I.**

• Portata W3

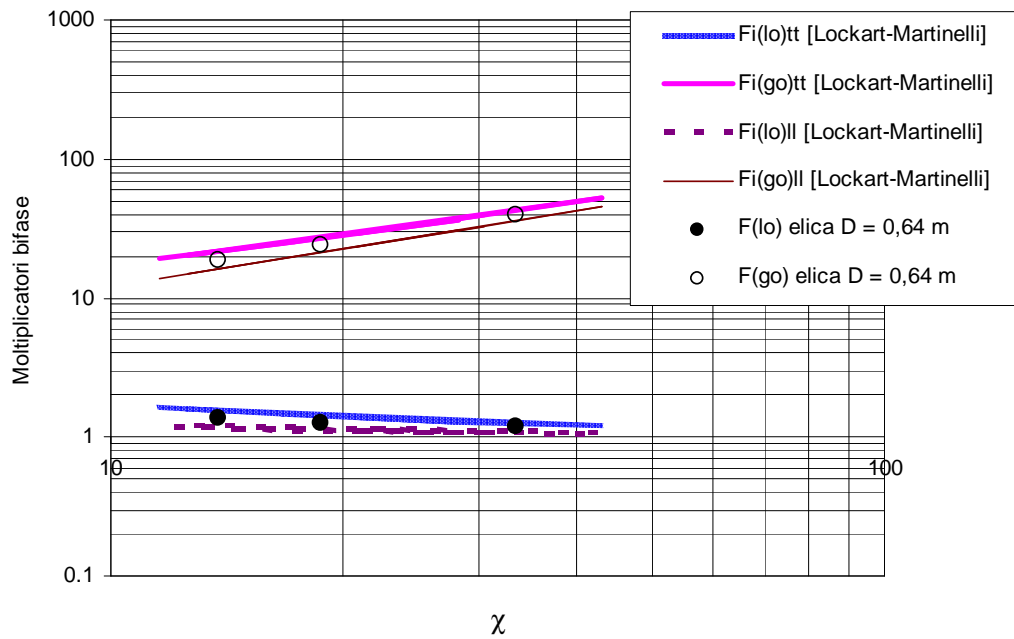


Figura 168: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 0,64$  m. Circuito B Prove I.

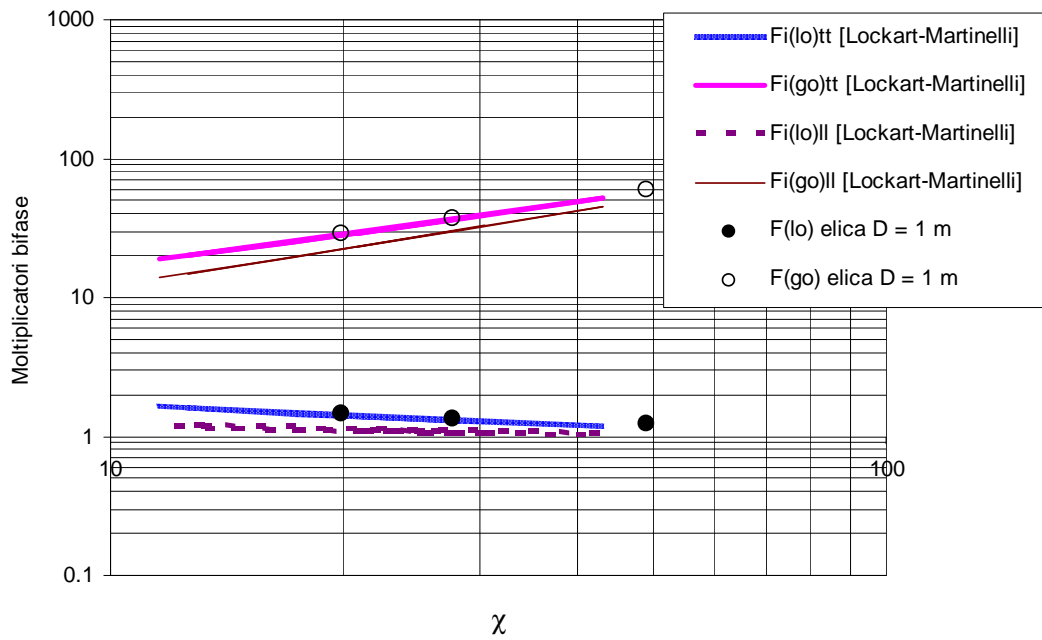


Figura 169: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1$  m. Circuito B Prove I.

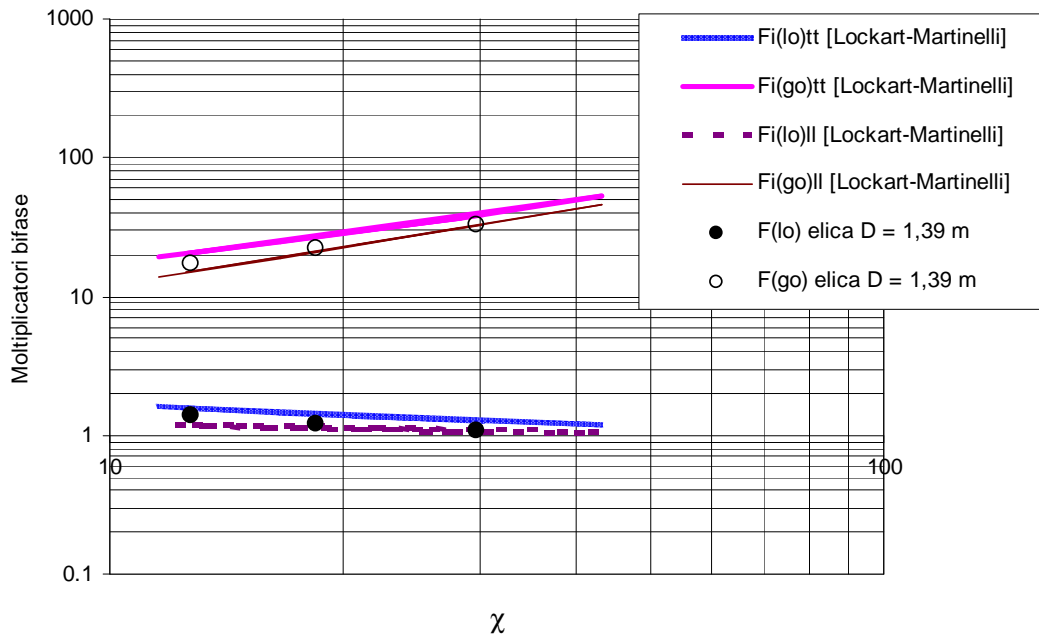


Figura 170: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1,39$  m  
Circuito B Prove I.

• Portata W4

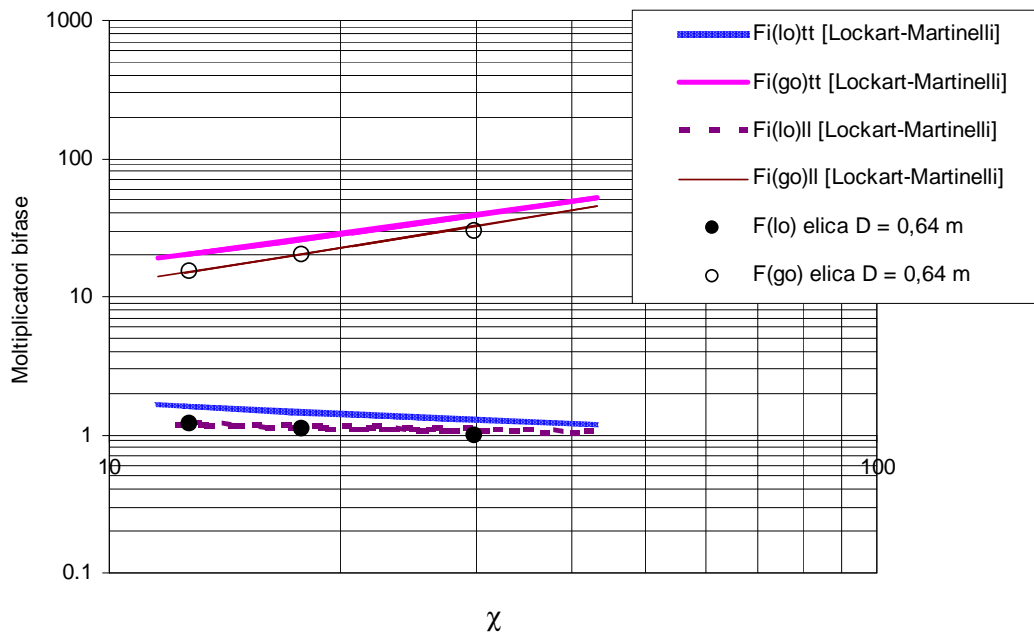
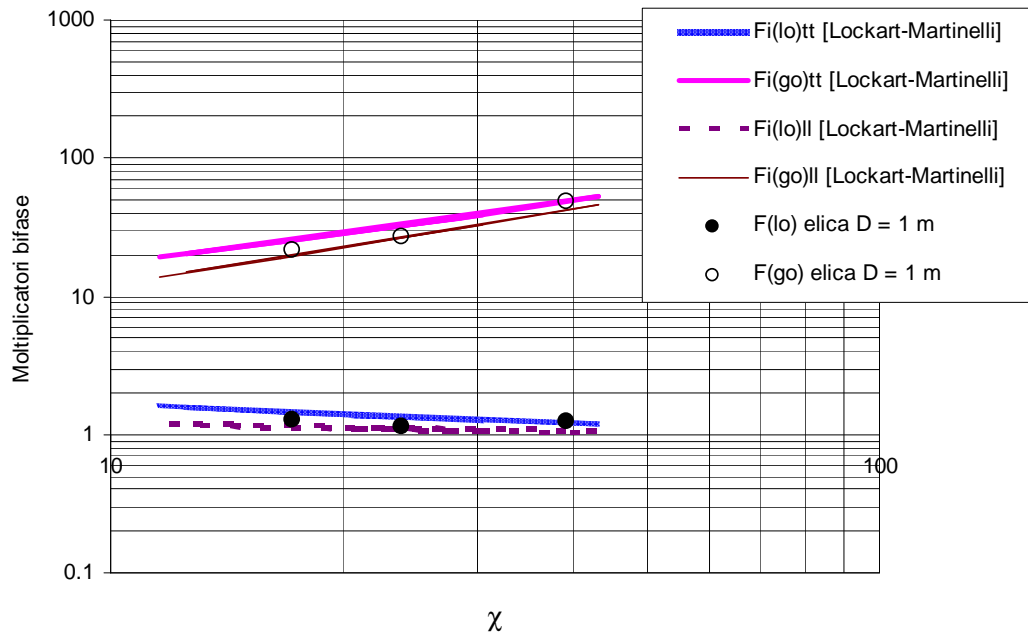
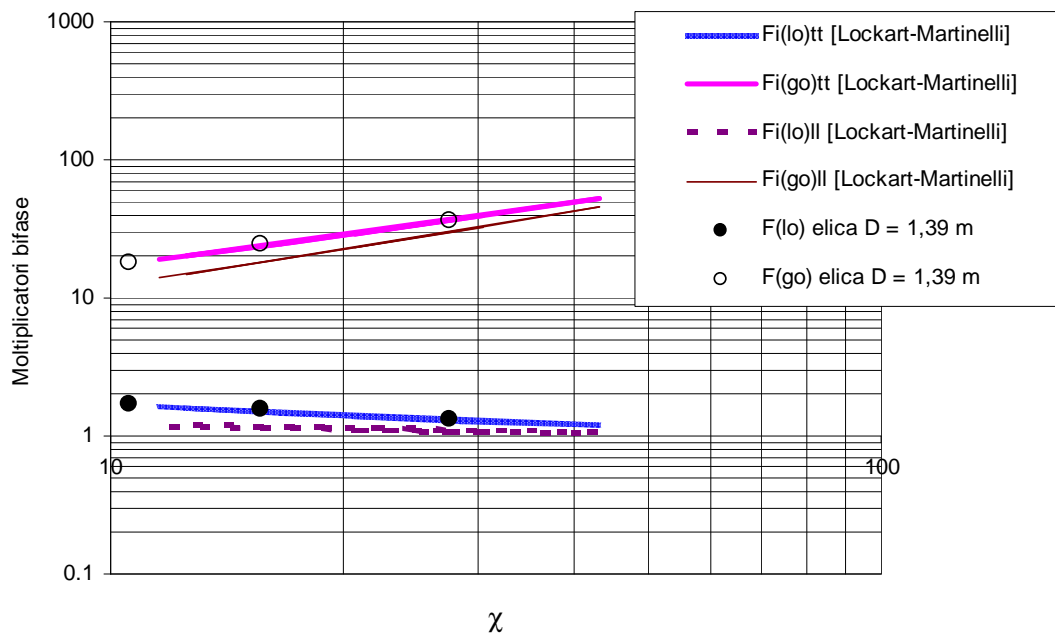


Figura 171: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 0,64$  m  
Circuito B Prove I.



**Figura 172: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1$  m  
Circuito B Prove I.**



**Figura 173: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1,39$  m  
Circuito B Prove I.**

Si sono confrontati e i moltiplicatori bifase per attrito utilizzando i dati sperimentali con le previsioni del modello di Lockhart - Martinelli le cui formule sono riportate qui di seguito:

$$\Phi_l^2 = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2}$$

$$\Phi_g^2 = 1 + C\chi + \chi^2$$

Il parametro  $C$  dipende dal tipo di deflusso, come già visto nel capitolo precedente esso è compreso per i tubi dritti tra 5 e 20. Anche in questo caso si sono tracciati i moltiplicatori ricavati per moto turbolento di entrambe le fasi ( $C = 20$ ) e per moto laminare di entrambe le fasi ( $C = 5$ ).

Si sono confrontati i risultati ottenuti utilizzando il modello di Lockhart - Martinelli con quattro differenti parametri  $C$  riportati in Tabella 53.

| Modello  | Coefficiente $C$ . |
|--|--------------------|
| Martinelli con le due fasi turbolente                | 20                 |
| Martinelli con le due fasi laminari                  | 5                  |
| Xin – Badian condotti elicoidali con sezione anulare | 10,64              |
| Formula sperimentale per prove con il circuito A     | 36,85              |

**Tabella 53: Modelli confrontati con risultati sperimentali con diversi coefficienti  $C$ .  
Circuito B Prove I.**

Confrontando i risultati del modello utilizzando i quattro parametri  $C$  in esame ed i risultati dell'analisi sperimentale (Figura 174 e Figura 175) si può verificare che i valori dei moltiplicatori bifase per attrito, sia per la fase gassosa che per la fase liquida, possono essere stimati utilizzando il modello di Lockhart - Martinelli con un coefficiente  $C$  che varia tra 5 e 35 a seconda della prova effettuata.

Per ogni portata totale d'acqua testata si riporta il confronto (da Figura 176 a Figura 183) tra i risultati dell'analisi sperimentale e il modello di Lockhart - Martinelli utilizzando i quattro valori del coefficiente  $C$  considerati.

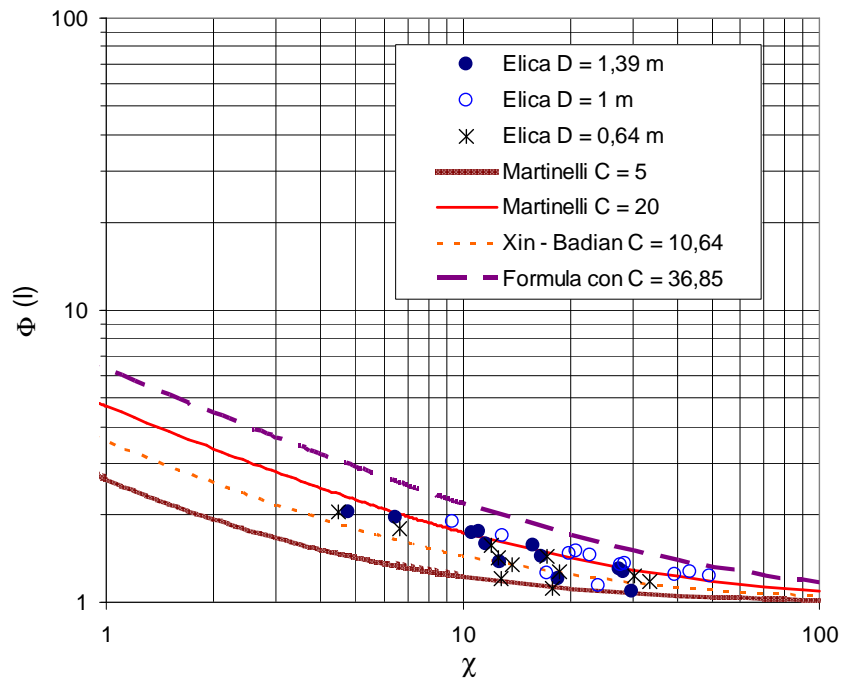


Figura 174: Confronto globale tra moltiplicatore bifase per attrito fase liquida sperimentale e modello di Lockhart-Martinelli con parametri  $C$  diversi. Circuito B Prove I.

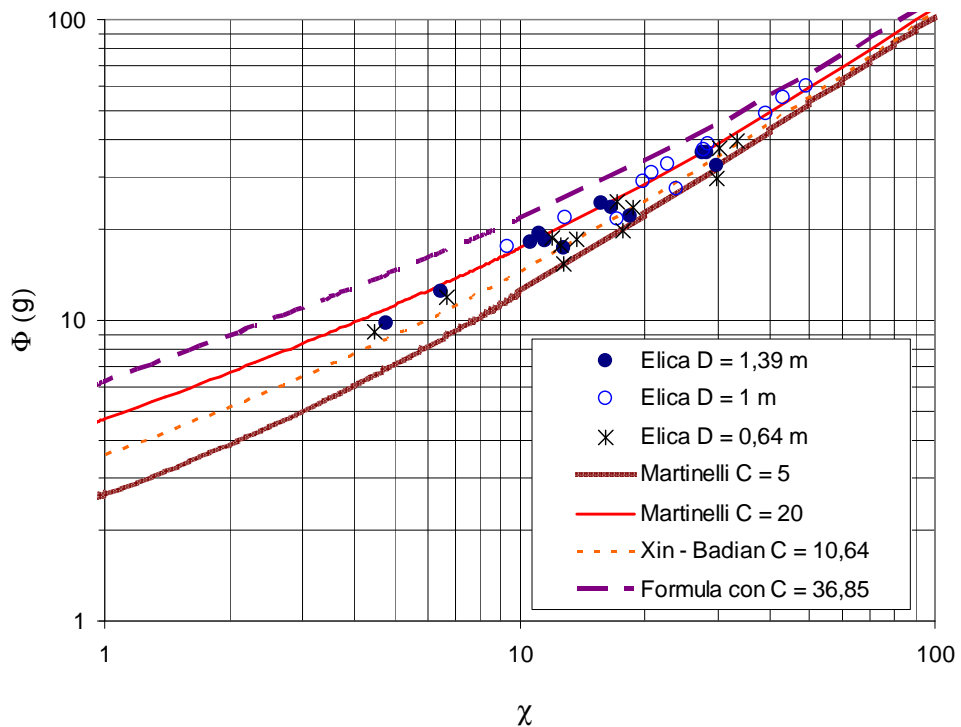


Figura 175: Confronto globale tra moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa sperimentale e modello di Lockhart-Martinelli con parametri  $C$  diversi. Circuito B Prove I.

• Portata W1

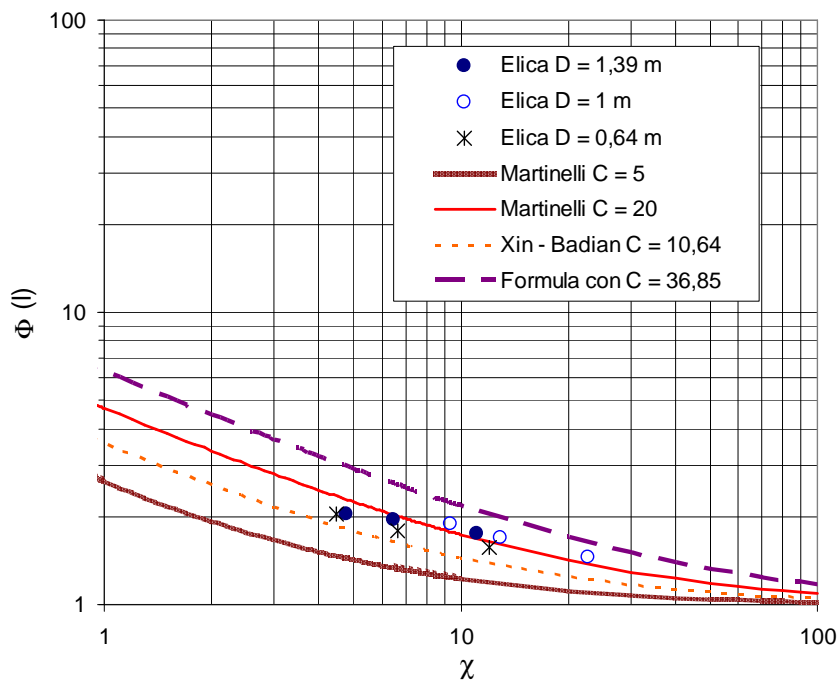


Figura 176: Moltiplicatore bifase per attrito fase liquida e curve con parametro  $C$  diversi. Circuito B Prove I.

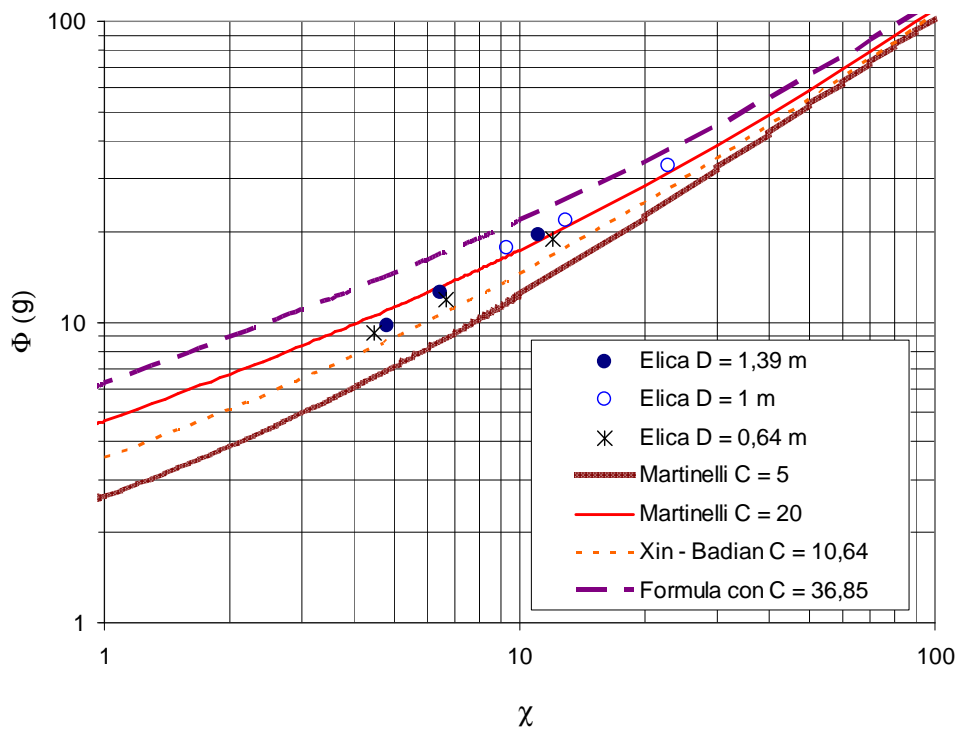


Figura 177: Moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa e curve con parametro  $C$  diversi. Circuito B Prove I.



• Portata W2

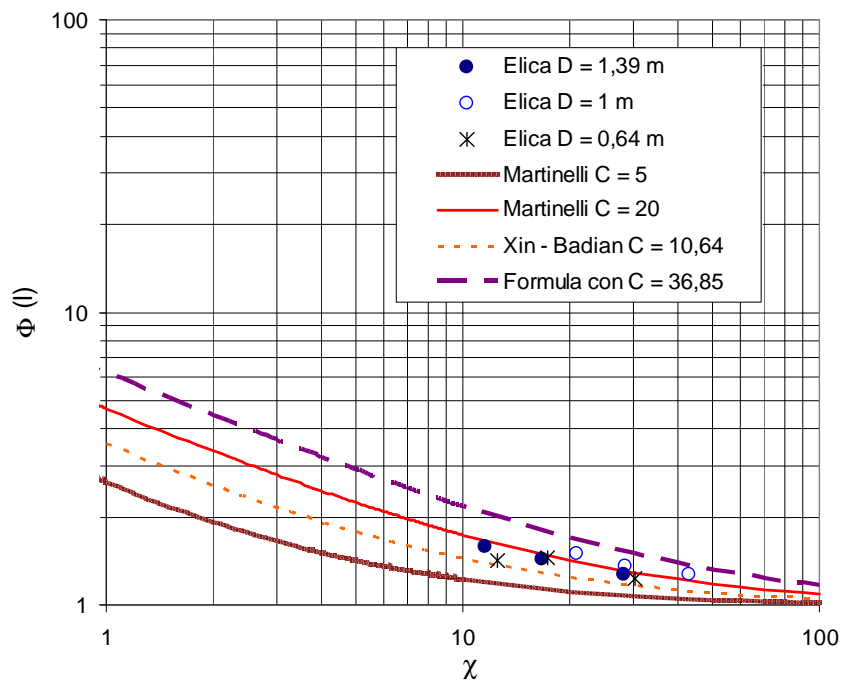


Figura 178: Moltiplicatore bifase per attrito fase liquida e curve con parametro  $C$  diversi. Circuito B Prove I.

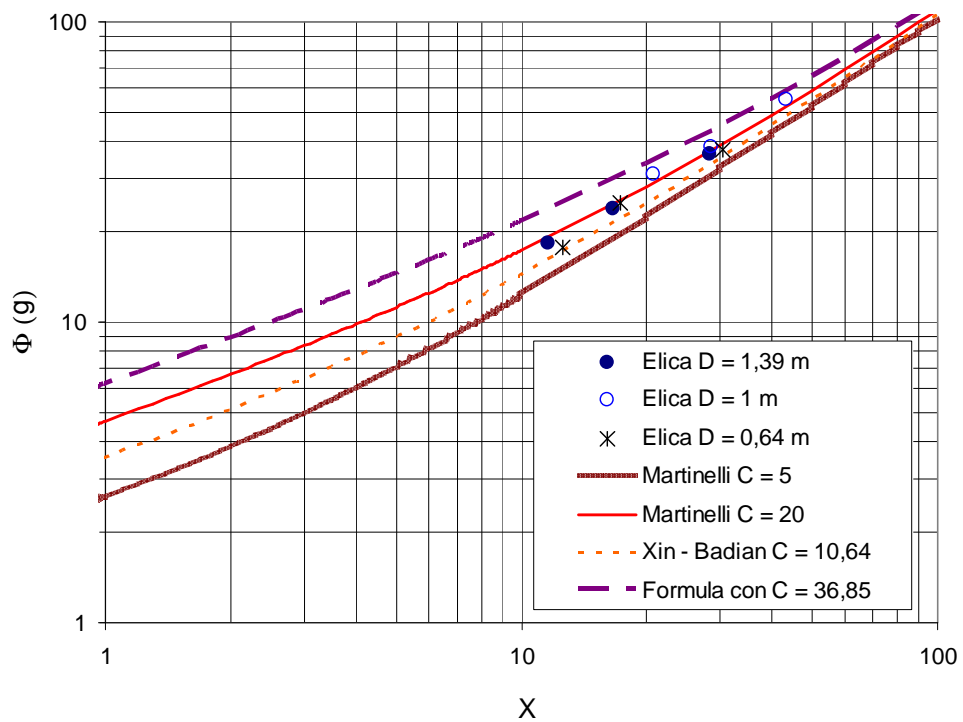


Figura 179: Moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa e curve con parametro  $C$  diversi. Circuito B Prove I.

• Portata W3

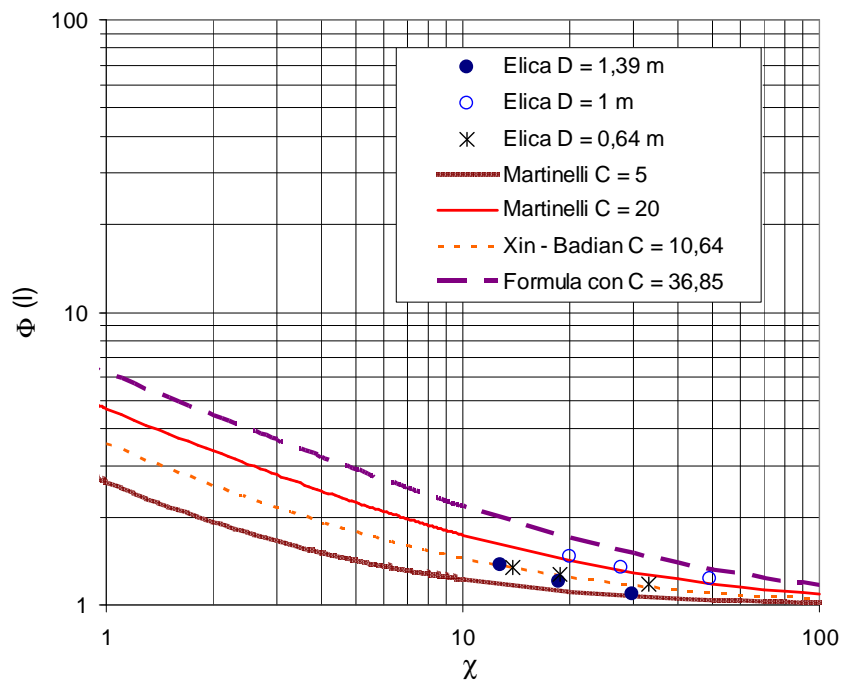


Figura 180: Moltiplicatore bifase per attrito fase liquida e curve con parametro C diversi. Circuito B Prove I.

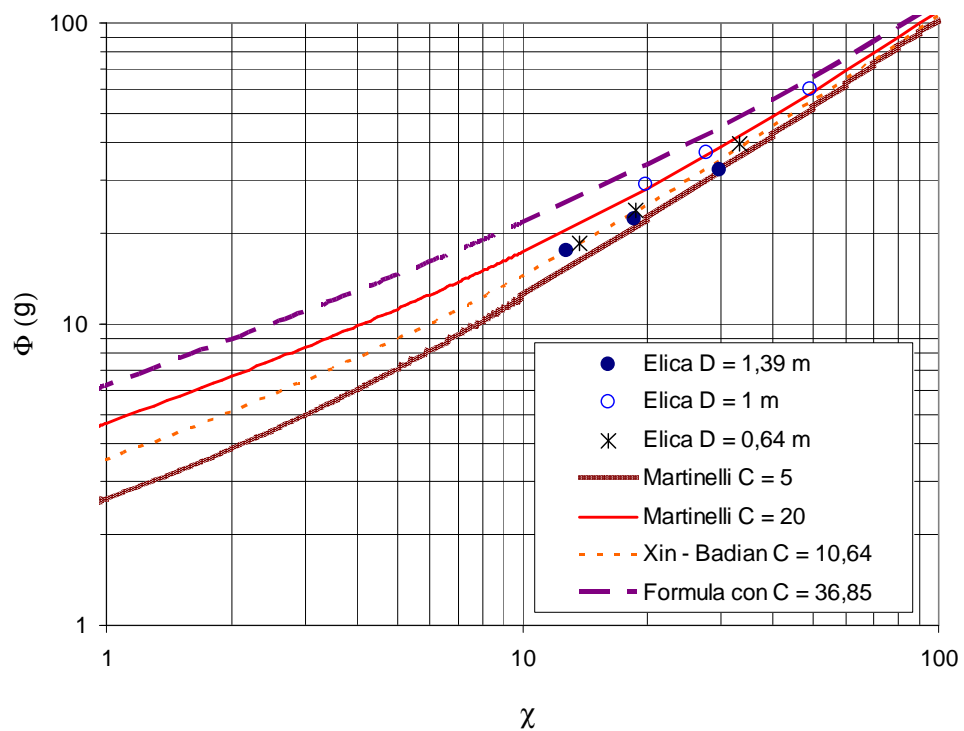


Figura 181: Moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa e curve con parametro C diversi. Circuito B Prove I.

• Portata W4

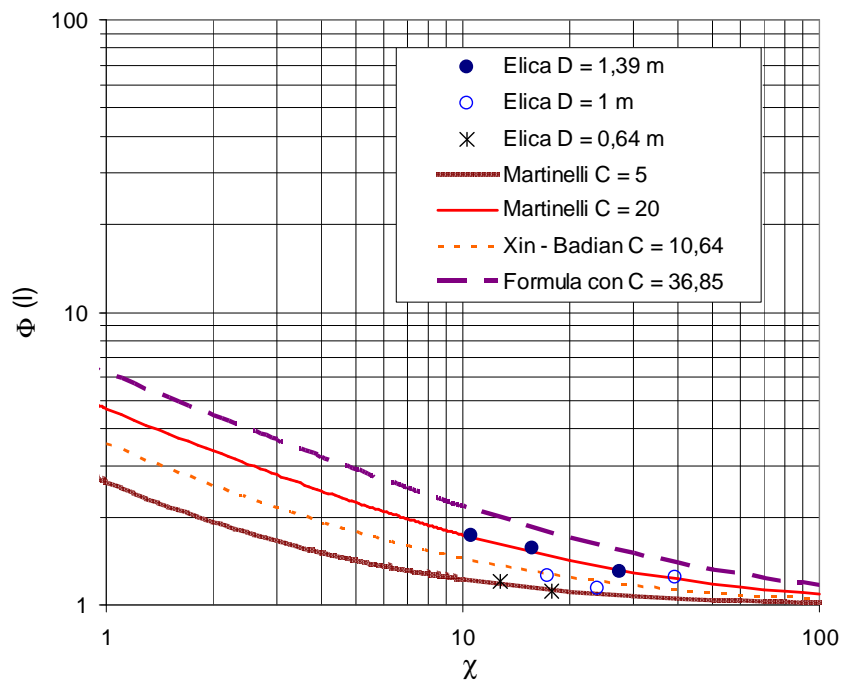


Figura 182: Moltiplicatore bifase per attrito fase liquida e curve con parametro C diversi. Circuito B Prove I.

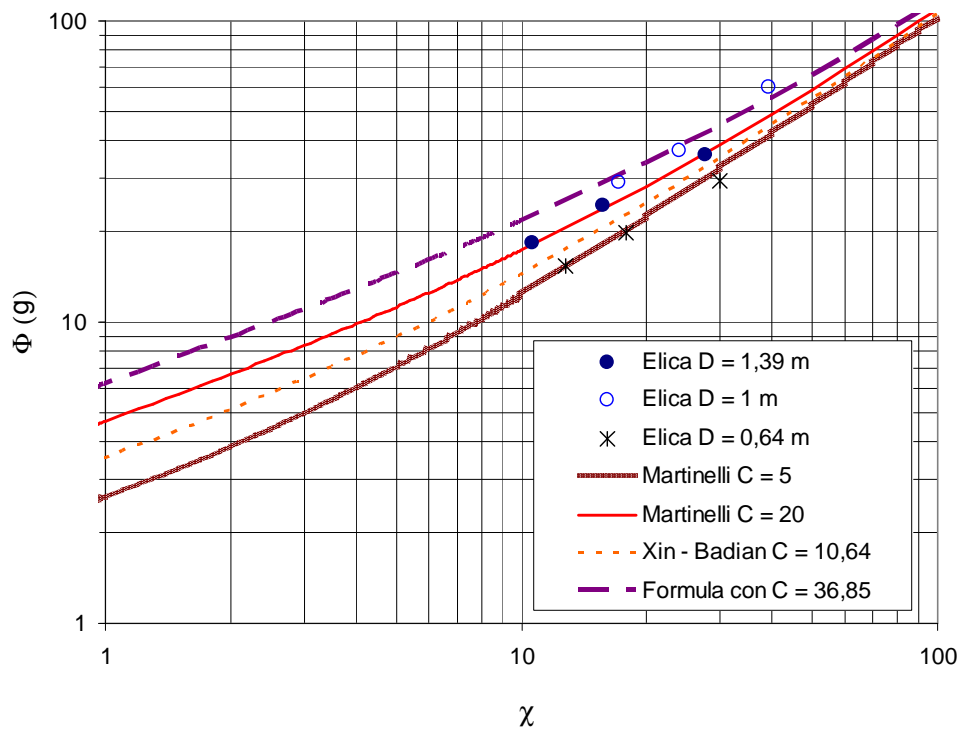


Figura 183: Moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa e curve con parametro C diversi. Circuito B Prove I.

Si riporta una tabella riassuntiva dei coefficienti  $C$  per i quali il modello di Lockhart - Martinelli meglio approssima i moltiplicatori bifase per attrito sperimentali per ogni condizione testata.

| Portate d'acqua<br>totali | Elica D = 1,39 m |                | Elica D = 1m   |                   | Elica D = 0,64 m |                |
|---------------------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|
|                           | $\Phi_l$         | $\Phi_g$       | $\Phi_l$       | $\Phi_g$          | $\Phi_l$         | $\Phi_g$       |
| W1 = 290 g/s              | $C \approx 20$   | $C \approx 20$ | $C > 20$       | $C > 20$          | $10 < C < 20$    | $10 < C < 20$  |
| W2 = 560 g/s              | $C = 20$         | $C = 20$       | $C > 20$       | $C > 20$          | $10 < C < 20$    | $10 < C < 20$  |
| W3 = 580 g/s              | $5 < C < 10$     | $5 < C < 10$   | $C \approx 20$ | $C \approx 20$    | $C \approx 10$   | $C \approx 10$ |
| W4 = 530 g/s              | $C = 20$         | $C = 20$       | $5 < C < 20$   | $C \approx 36,85$ | $C = 5$          | $C = 5$        |

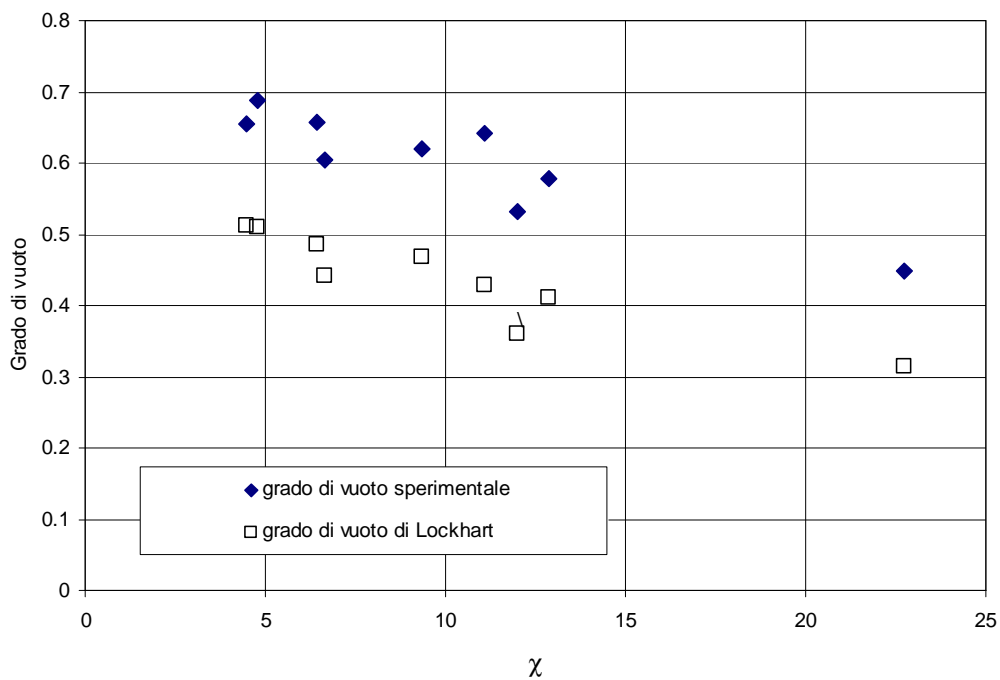
**Tabella 54: Coefficienti  $C$  modello Lockhart-Martinelli per approssimare i risultati sperimentali. Circuito B Prove I.**

**7.2.7 Grado di vuoto sperimentale e correlazioni teoriche. Circuito B prove I**

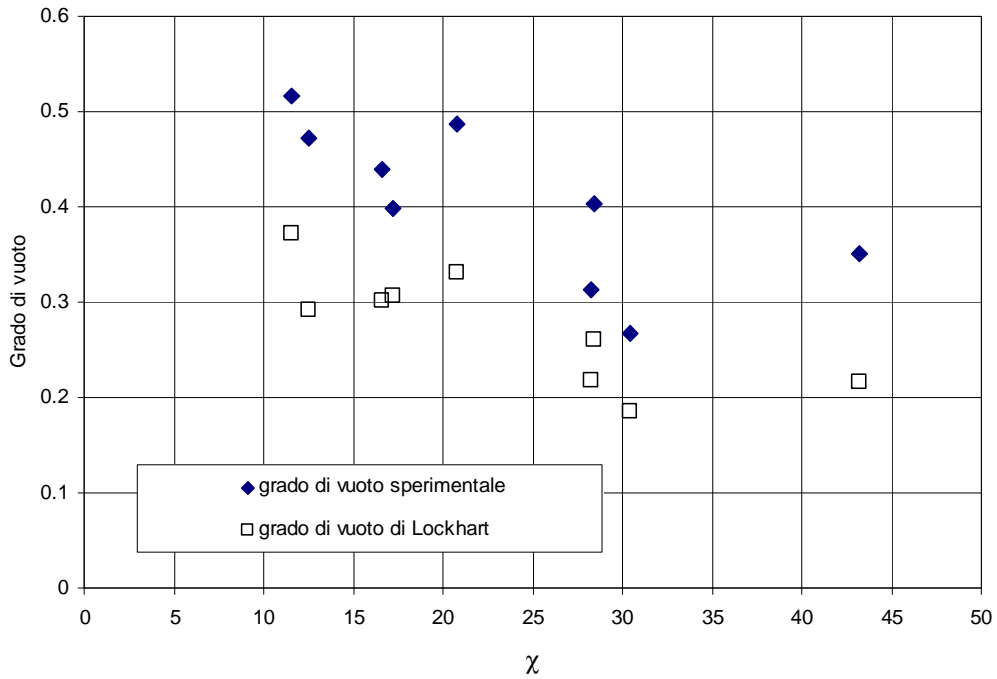
Si è confrontato il grado di vuoto sperimentale con il grado di vuoto teorico, calcolato con la formulazione di Lockhart:

$$\alpha_{Lockhart} = 1 - \frac{1}{\Phi_{lo}}$$

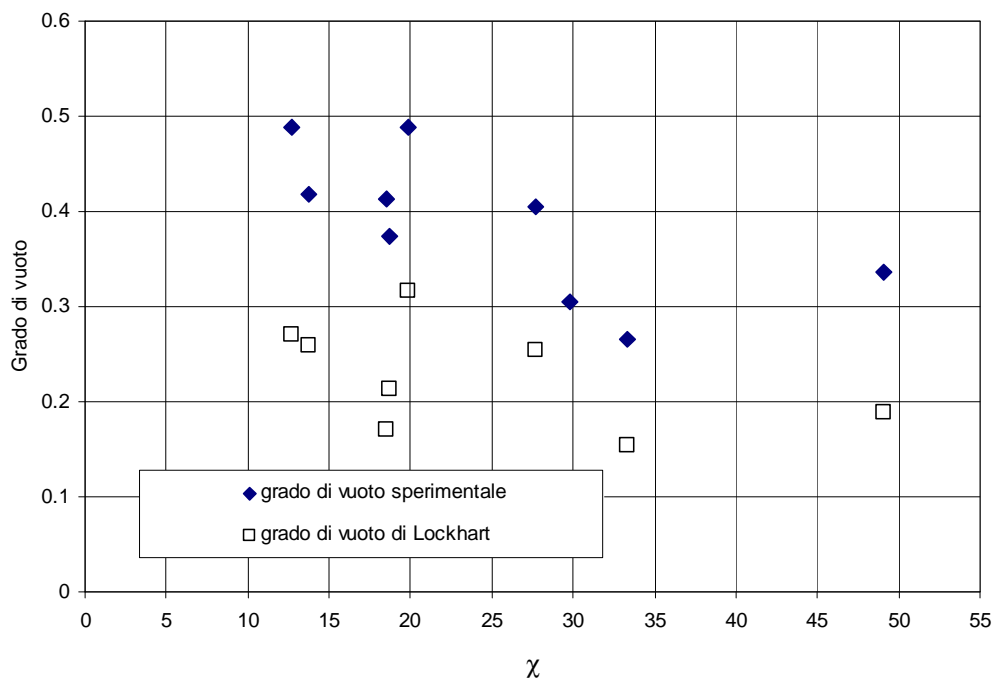
Per ogni portata d'acqua totale testata l'alfa sperimentale risulta essere maggiore dell'alfa previsto dal modello come si evince dai diagrammi (da Figura 184 a Figura 188) qui riportati.



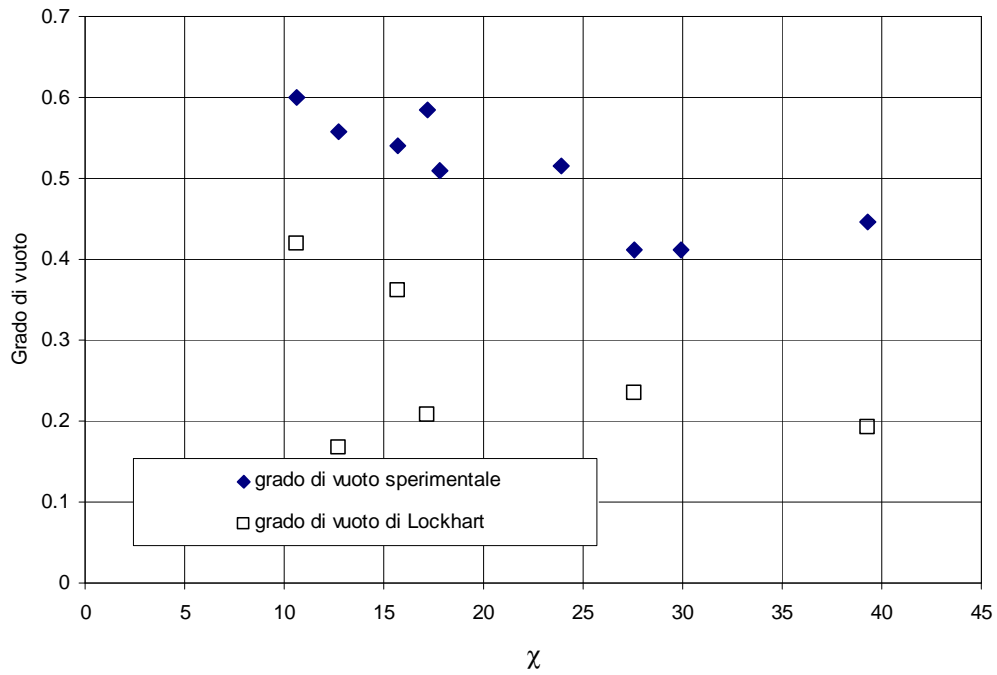
**Figura 184: Confronto grado di vuoto sperimentale – grado di vuoto calcolato [Portata W1] Circuito B Prove I.**



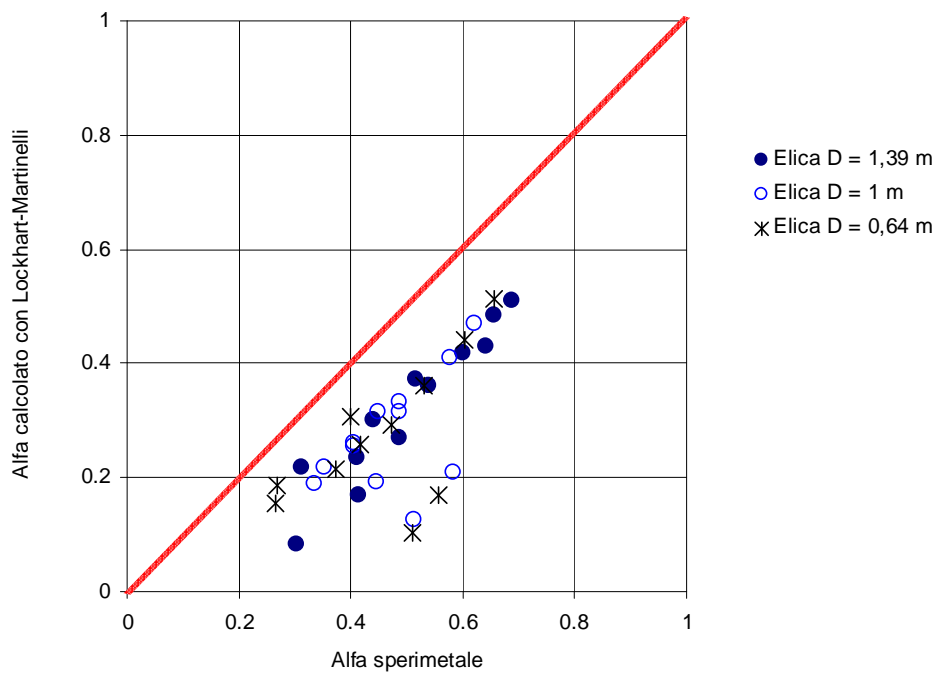
**Figura 185: Confronto grado di vuoto sperimentale – grado di vuoto calcolato [Portata W2]  
Circuito B Prove I.**



**Figura 186: Confronto grado di vuoto sperimentale – grado di vuoto calcolato [Portata W3]  
Circuito B Prove I.**



**Figura 187: Confronto grado di vuoto sperimentale – grado di vuoto calcolato [Portata W4] Circuito B Prove I.**



**Figura 188: Confronto globale grado di vuoto sperimentale e grado di vuoto calcolato con modello Lockhart – Martinelli. Circuito B Prove I.**

### 7.2.8 Flow pattern. Circuito B prove I.

Durante lo svolgimento delle prove di tipo I si è osservati i *flow pattern* instauratisi anche con l'ausilio di una videocamera ad alta definizione Panasonic AG-DVC30.

Come per il circuito A si sono confrontate le osservazioni sperimentali con le previsioni dei *flow pattern* ricavate attraverso l'utilizzo della mappa di Baker, della mappa di Hewitt - Roberts e della mappa di Taitel - Dukler.

Anche in questo caso, a causa dell'inclinazione rispetto all'orizzontale dei tubi elicoidali, il deflusso risulta essere meglio approssimato ad un moto orizzontale, quindi le mappe per deflussi in condotti orizzontali danno previsioni più attendibili.

- **Mappa di Baker**

La mappa di Baker ha, come già visto nel capitolo precedente, come parametri caratteristici  $Gg/\lambda$  e  $Gl\psi$  ed è valida per deflussi in tubi dritti orizzontali.

Si riportano da Figura 189 a Figura 192 i risultati ottenuti con la mappa di Baker per le portate d'acqua testate.

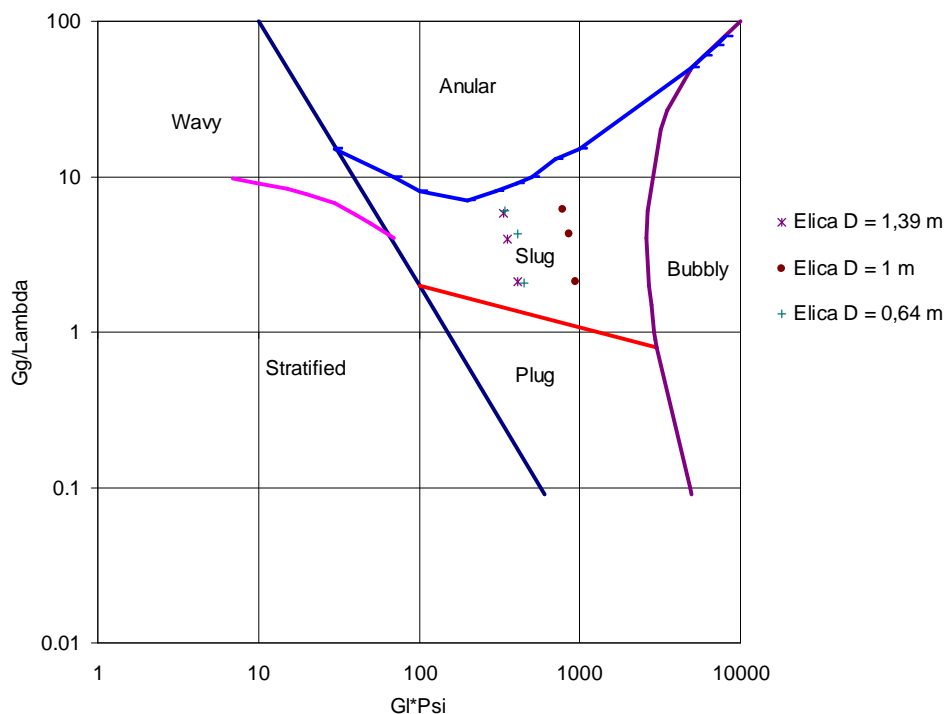


Figura 189: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per portata W1. Circuito B Prove I.



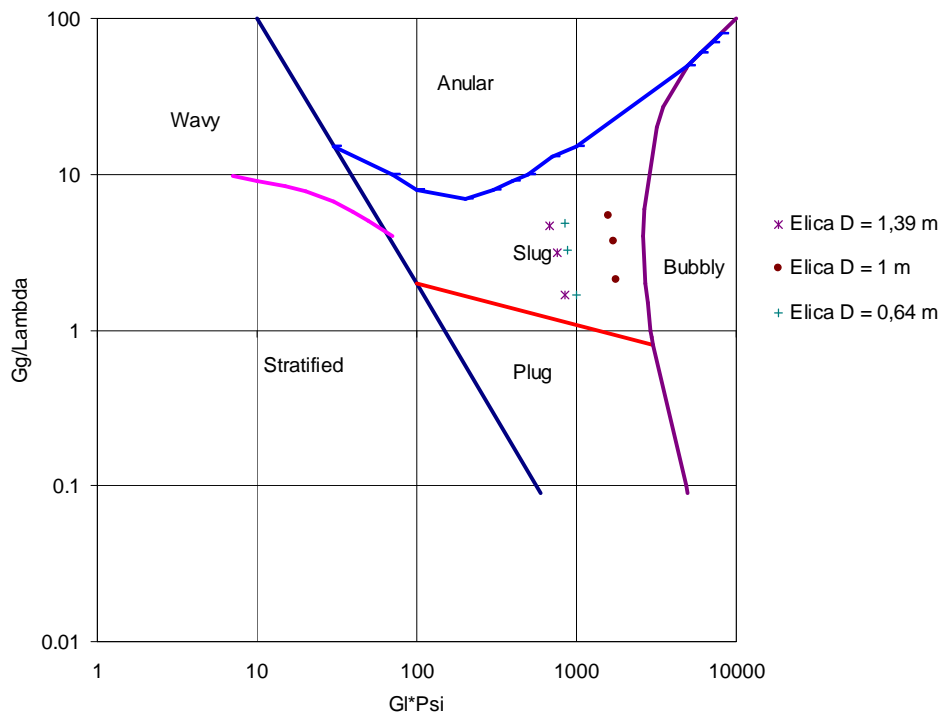


Figura 190: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per portata W2. Circuito B Prove I.

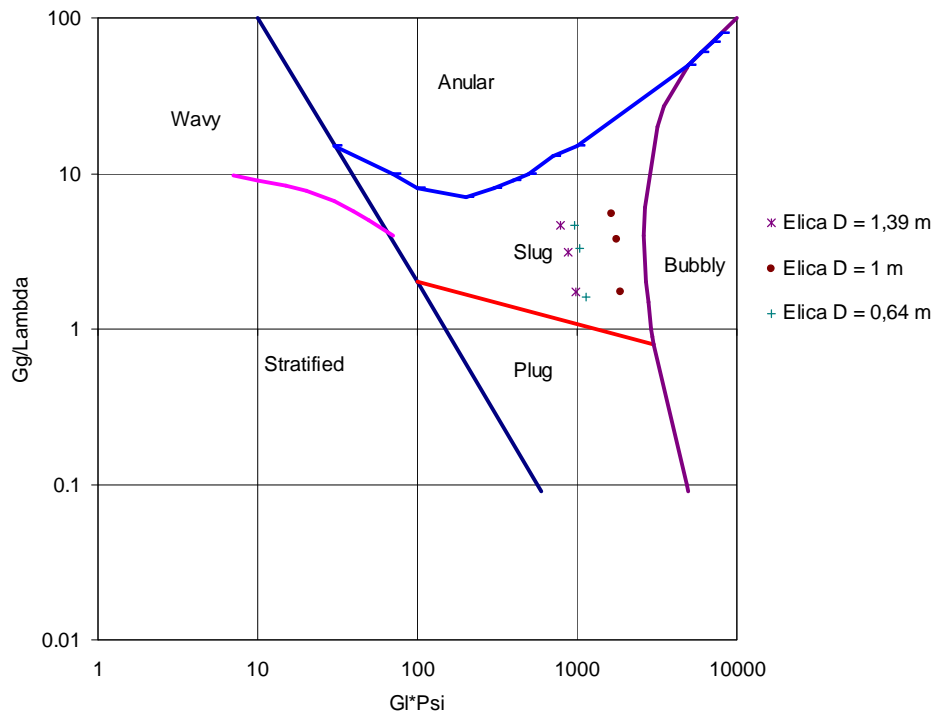


Figura 191: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per portata W3. Circuito B Prove I.

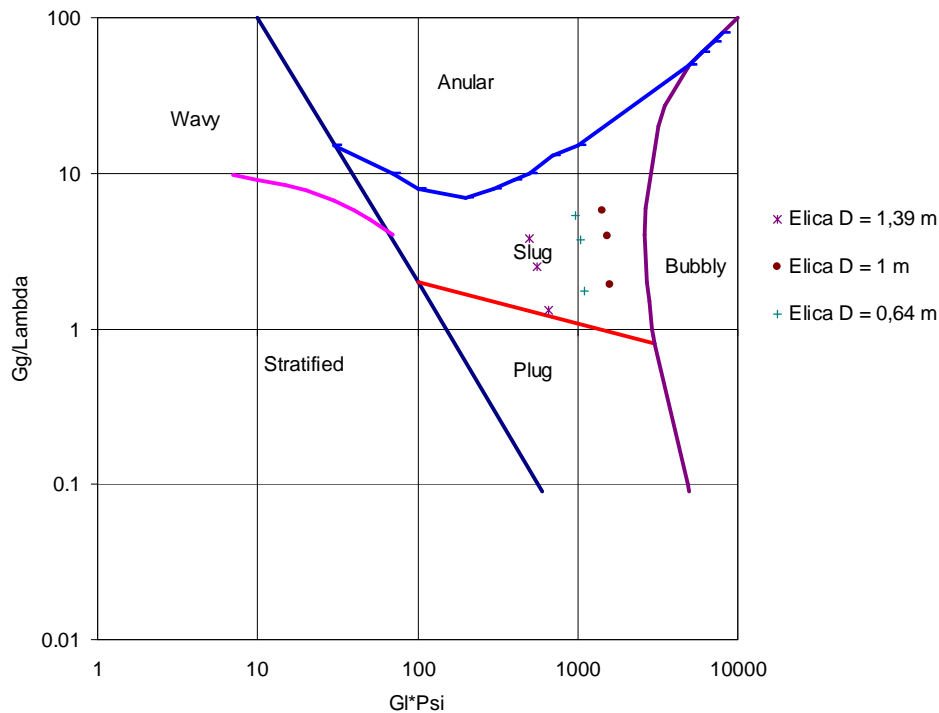


Figura 192: Mapa di Baker con inseriti i punti sperimentali per portata W4. Circuito B Prove I.

Secondo le previsioni della mappa di Baker si può instaurare solo un tipo di *flow pattern* corrispondente a *slug*.

- **Mapa di Hewitt - Roberts**

La mappa di Hewitt - Roberts è valida per deflussi in tubi diritti verticali di diametro minore di 0,05 m e per miscele aria-acqua o olio-gas.

Come già visto in precedenza i parametri caratteristici sono  $G_g^2/\rho_g$  e  $G_l^2/\rho_l$ .

Da Figura 193 a Figura 196 sono riportati i risultati sulla mappa. Secondo le previsioni per le portate prese in esame si avrebbe come tipo di *flow pattern* per quasi tutte le prove *slug*, solo in due casi (sezioni di prova  $D = 0,64$  m e  $D = 1,39$  m, portata totale W1, portata d'aria nell'elica bifase di circa 0,83 g/s) si prevede un *flow pattern* di tipo *churn*.

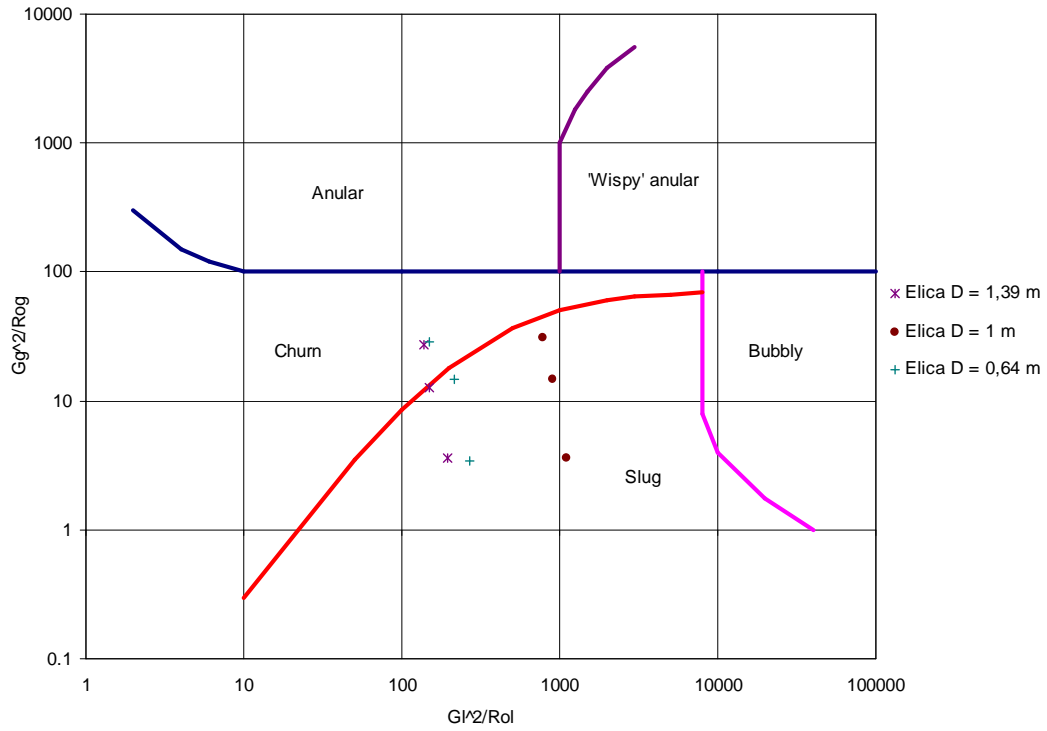


Figura 193: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per portata W1. Circuito B Prove I.

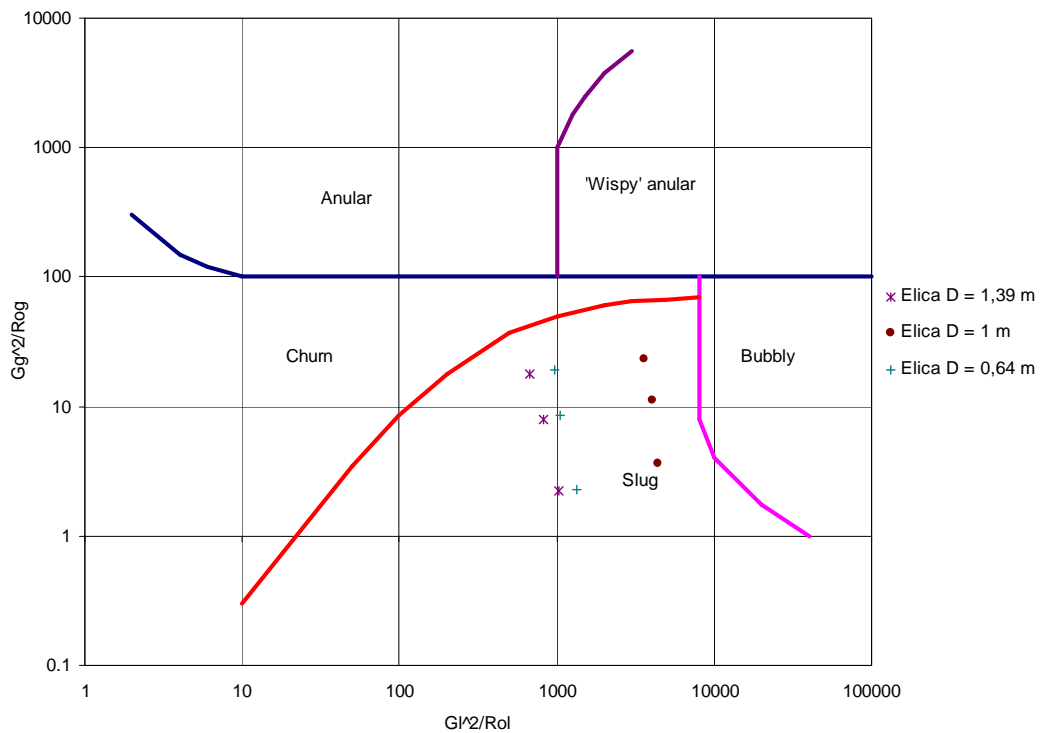
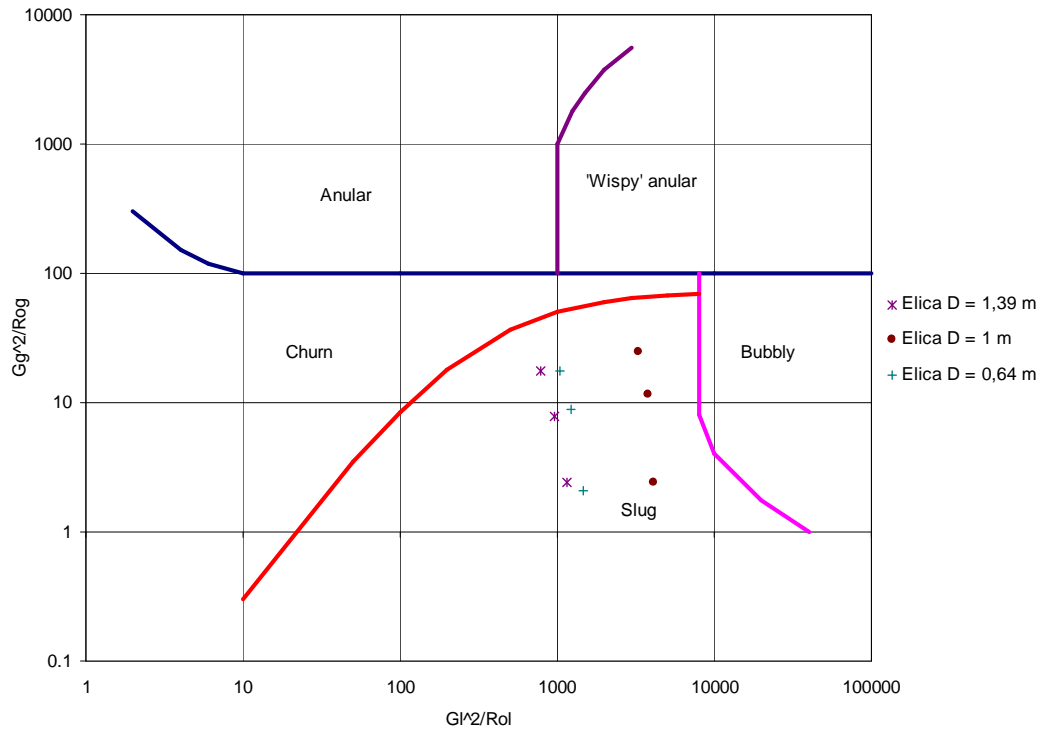
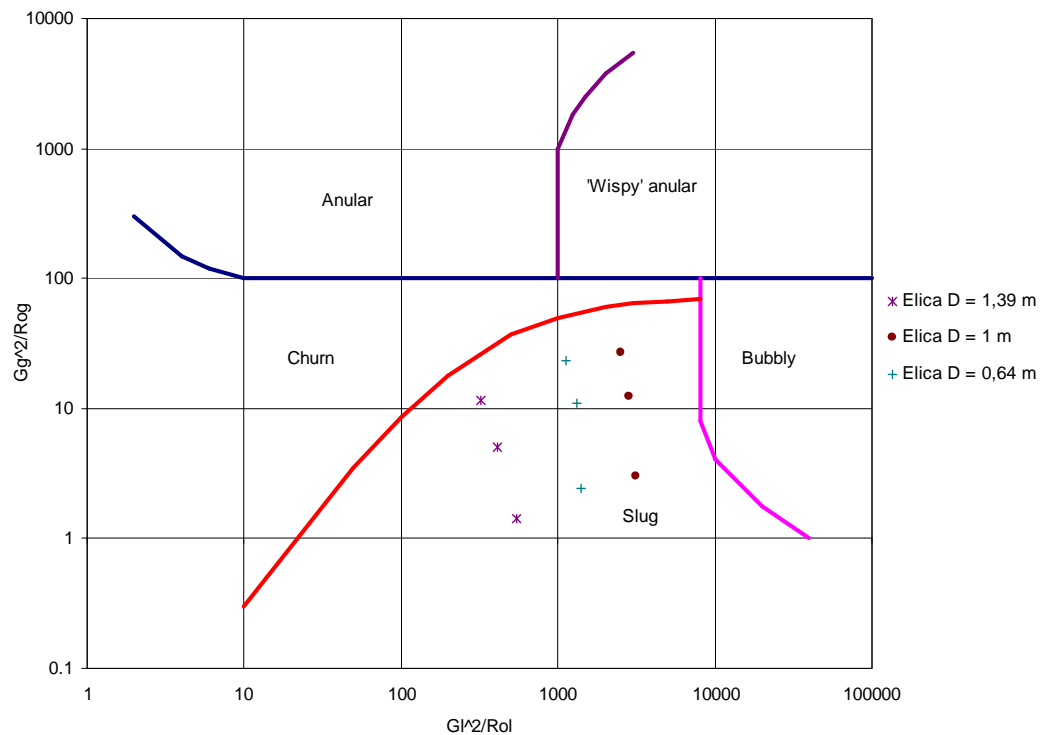


Figura 194: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per portata W2. Circuito B Prove I.



**Figura 195: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per portata W3. Circuito B Prove I.**



**Figura 196: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per portata W4. Circuito B Prove I.**

- **La mappa di Taitel - Dukler**

La mappa di Taitel - Dukler, valida per deflussi in tubi dritti orizzontali, è quella che meglio ha previsto i *flow pattern* per quanto riguarda le prove effettuate con il circuito A. Anche in questo caso si sono utilizzate delle tabelle per confrontare i dati sperimentali e le previsioni, poiché questa mappa è costituita da tre diagrammi complementari.

Nelle tabelle si sono riportati anche i risultati ottenuti con le previsioni delle mappe di Baker e di Hewitt - Roberts.

Per questa campagna sperimentale le previsioni dei *flow pattern* più attendibili sono date dalle mappe di Baker e di Hewitt - Roberts, mentre la mappa di Taitel - Dukler dà previsioni che non trovano riscontro nelle verifiche di laboratorio.

| Portata totale | D elica in deflusso bifase [m] | Portata d'acqua nell'elica bifase [g/s] | Portata d'aria nell'elica bifase [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|----------------|--------------------------------|---|--|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| W1             | 0,64                           | 58,4                                    | 0,28                                   | Slug                    | Slug           | Slug - Plug           | Slug                       |
|                | 0,64                           | 52,4                                    | 0,58                                   | Slug                    | Slug           | Slug - Plug           | Slug                       |
|                | 0,64                           | 43,8                                    | 0,83                                   | Churn                   | Slug           | Slug - Plug           | Slug                       |
|                | 1                              | 118,5                                   | 0,28                                   | Slug                    | Slug           | Slug - Bubble         | Slug                       |
|                | 1                              | 107,5                                   | 0,57                                   | Slug                    | Slug           | Slug - Bubble         | Slug                       |
|                | 1                              | 100,2                                   | 0,83                                   | Slug                    | Slug           | Slug - Bubble         | Slug, Plug                 |
|                | 1,39                           | 49,9                                    | 0,3                                    | Slug                    | Slug           | Slug - Plug           | Slug                       |
|                | 1,39                           | 43,6                                    | 0,56                                   | Slug                    | Slug           | Slug - Plug           | Slug                       |

**Tabella 55: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali per portata W1. Circuito B Prove I.**

| Portata totale | D elica in deflusso bifase [m] | Portata d'acqua nell'elica bifase [g/s] | Portata d'aria nell'elica bifase [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|----------------|--------------------------------|---|--|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| W2             | 0,64                           | 130,5                                   | 0,28                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,64                           | 115,6                                   | 0,56                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,64                           | 110,9                                   | 0,85                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug, Plug                 |
|                | 1                              | 235,5                                   | 0,32                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug, Plug                 |
|                | 1                              | 227,05                                  | 0,56                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug, Plug                 |
|                | 1                              | 213,4                                   | 0,83                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug, Plug                 |
|                | 1,39                           | 114,3                                   | 0,28                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 1,39                           | 101,9                                   | 0,54                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |

**Tabella 56: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali per portata W2. Circuito B Prove I.**

| Portata totale | D elica in deflusso bifase [m] | Portata d'acqua nell'elica bifase [g/s] | Portata d'aria nell'elica bifase [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|----------------|--------------------------------|---|--|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| W3             | 0,64                           | 136,2                                   | 0,28                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,64                           | 124,3                                   | 0,58                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,64                           | 115,5                                   | 0,82                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 1                              | 229,9                                   | 0,26                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug, Plug                 |
|                | 1                              | 219,8                                   | 0,57                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug, Plug                 |
|                | 1                              | 204,6                                   | 0,85                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug, Plug                 |
|                | 1,39                           | 121,4                                   | 0,3                                    | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 1,39                           | 110,4                                   | 0,55                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |

**Tabella 57: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali per portata W3. Circuito B Prove I.**

| Portata totale | D elica in deflusso bifase [m] | Portata d'acqua nell'elica bifase [g/s] | Portata d'aria nell'elica bifase [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|----------------|--------------------------------|---|--|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| W4             | 0,64                           | 133,4                                   | 0,27                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,64                           | 129,4                                   | 0,59                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,64                           | 119,2                                   | 0,86                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 1                              | 199,3                                   | 0,27                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 1                              | 190,6                                   | 0,56                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 1                              | 178,9                                   | 0,84                                   | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug, Plug                 |
|                | 1,39                           | 83,6                                    | 0,3                                    | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 1,39                           | 71,9                                    | 0,56                                   | Slug                    | Slug           | Slug - Plug           | Slug                       |

**Tabella 58: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali per portata W4. Circuito B Prove I.**

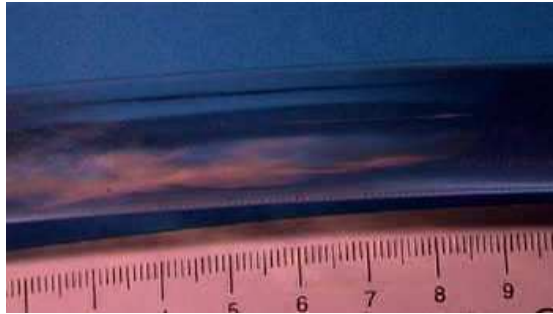
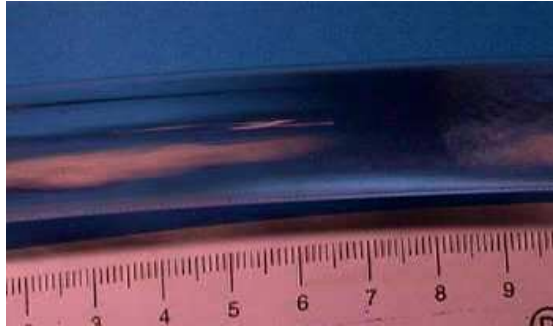
I *flow pattern* sono stati osservati sperimentalmente sia visivamente in modo diretto che, come già detto, mediante l'utilizzo di una videocamera ad alta definizione registrando il deflusso durante lo svolgimento dei test.

Per questa tipologia di prove (tipo I) le visualizzazioni dei *flow pattern* sono meno nitide di quanto si è ottenuto per il circuito A, ciò è imputabile al fatto che la velocità della miscela è elevata per tutte le condizioni testate e la fase gassosa percorre l'elica più velocemente della fase liquida.

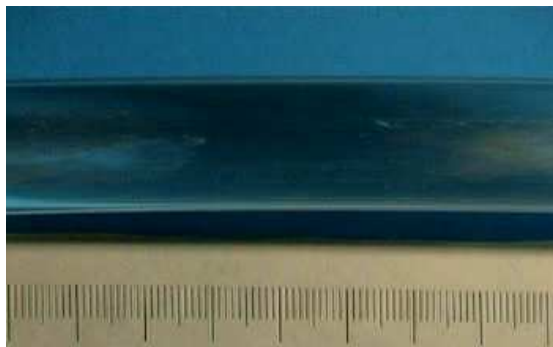
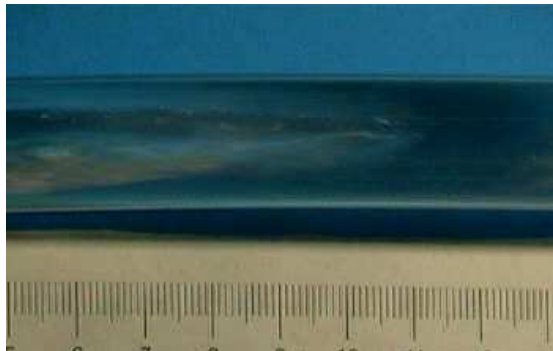
La scarsa definizione delle immagini non ha creato comunque difficoltà nell'identificazione dei tipi di *flow pattern* che si sono riscontrati nelle prove di tipo I.

Data la bassa qualità delle immagini non pare opportuno in questa sede dedicare un'appendice alla raccolta delle immagini dei *flow pattern* che si sono identificati per le prove di tipo I come è stato invece fatto per le prove effettuate con il circuito A.

Si riportano in Figura 197, Figura 198 e Figura 199 alcuni esempi di immagini dei *flow patterns* relativi a questa serie di misure.

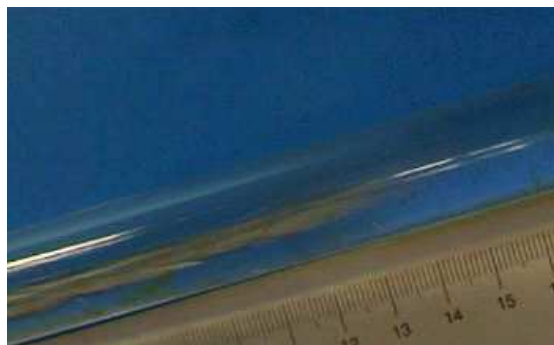
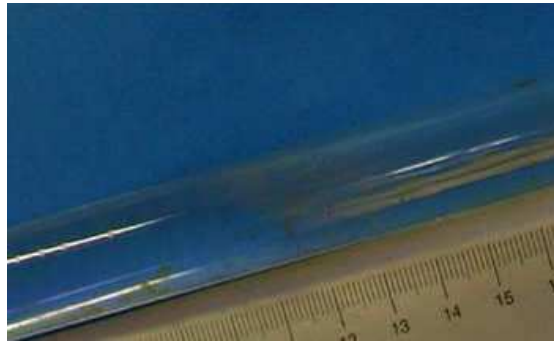
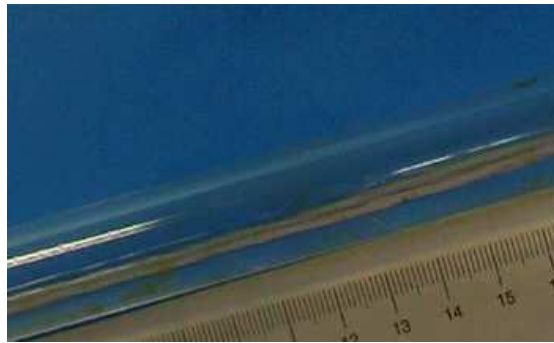


**Figura 197:**  $W_{\text{aria}} = 0,25 \text{ g/s}$ ,  $\Delta z \sim 1,35 \text{ m}$ ; Portata totale  $W1$ ; elica  $D = 0,64 \text{ m}$  in deflusso bifase. Prove tipo I Circuito B.



**Figura 198:**  $W_{\text{aria}} = 0,25 \text{ g/s}$ ,  $\Delta z \sim 1,25 \text{ m}$ ; Portata totale  $W1$ ; elica  $D = 1 \text{ m}$  in deflusso bifase. Prove tipo I Circuito B.





**Figura 199:**  $W_{\text{aria}} = 0,25 \text{ g/s}$ ,  $\Delta z \sim 1,25 \text{ m}$ ; Portata totale  $W1$ ; elica  $D = 1,39 \text{ m}$  in deflusso bifase. Prove tipo I Circuito B.

### 7.3 Risultati sperimentali prove tipo II: prove con tre sezioni di prova in deflusso bifase.

#### 7.3.1 Portata nei rami in ingresso delle sezioni di prova. Circuito B prove II.

In questo paragrafo si analizzano le variazioni della portata di acqua nei tre rami in ingresso alle sezioni di prova quando tutte le eliche sono in deflusso bifase.

Si considerano separatamente i due diversi casi.

- **Caso 1: Portate W1, W2, W3 e W4**

La distribuzione della portata nei tre rami subisce una notevole variazione nel corso delle prove, infatti risulta che per le portate totali W1, W2, W3 e W4 al crescere della portata d'aria imposta nelle eliche la portata d'acqua nei rami decresce. La differenza tra la portata d'acqua in regime monofase e quella che si ha nel caso di deflusso bifase è fortemente influenzata dall'utilizzo del bypass dopo la pompa di alimentazione per la regolazione della portata. Da Figura 200 a Figura 203, oltre alle portate nei rami, sono evidenziate le portate totali d'acqua (somma delle portate nei tre rami), esse decrescono al crescere della portata d'aria imposta nelle eliche.

La differenza tra la portata d'acqua totale iniziale (valutata con tutte e tre le sezioni di prova in regime monofase) e la portata d'acqua totale nelle prove in regime bifase risulta essere proporzionale alla portata d'aria imposta nelle eliche. In Tabella 59 sono riportate le variazioni riscontrate nelle portate d'acqua totali.

| W acqua totale in regime monofase | $\Delta W$ acqua con W aria = 0,25 g/s | $\Delta W$ acqua con W aria = 0,58 g/s | $\Delta W$ acqua con W aria = 0,85 g/s |
|-----------------------------------|--|--|--|
| W1 = 290 g/s                      | 36,7                                   | 50,05                                  | 61,5                                   |
| W2 = 560 g/s                      | 35,6                                   | 55,2                                   | 68,8                                   |
| W3 = 580 g/s                      | 36,1                                   | 53,8                                   | 67,2                                   |
| W4 = 530 g/s                      | 35                                     | 51,5                                   | 65,5                                   |

Tabella 59: Quantità di cui sono diminuite le portate d'acqua totali nel caso di regime bifase. Circuito B Prove II Caso 1.

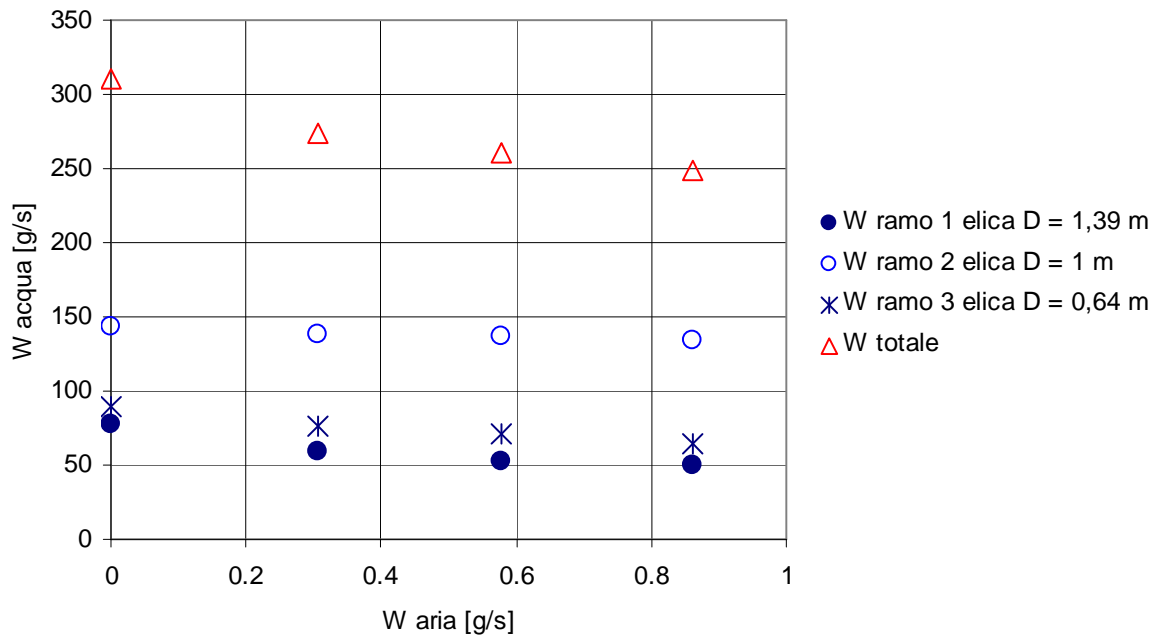


Figura 200: Ripartizione delle portate nei rami (Portata W1). Circuito B Prove II Caso 1.

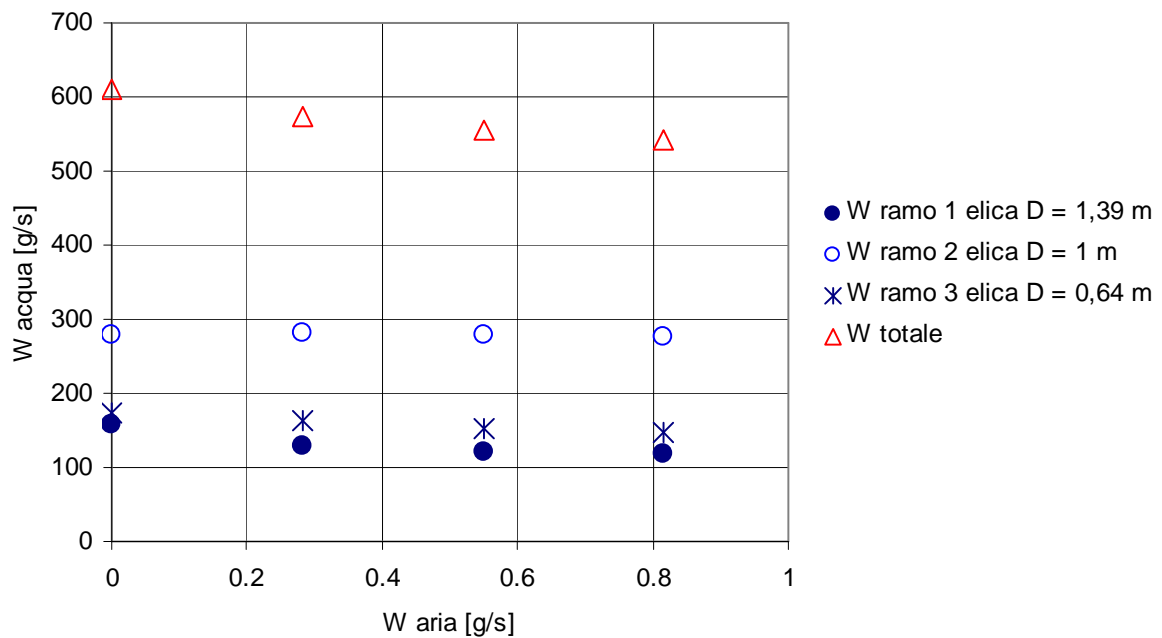


Figura 201: Ripartizione delle portate nei rami (Portata W2). Circuito B Prove II Caso 1.

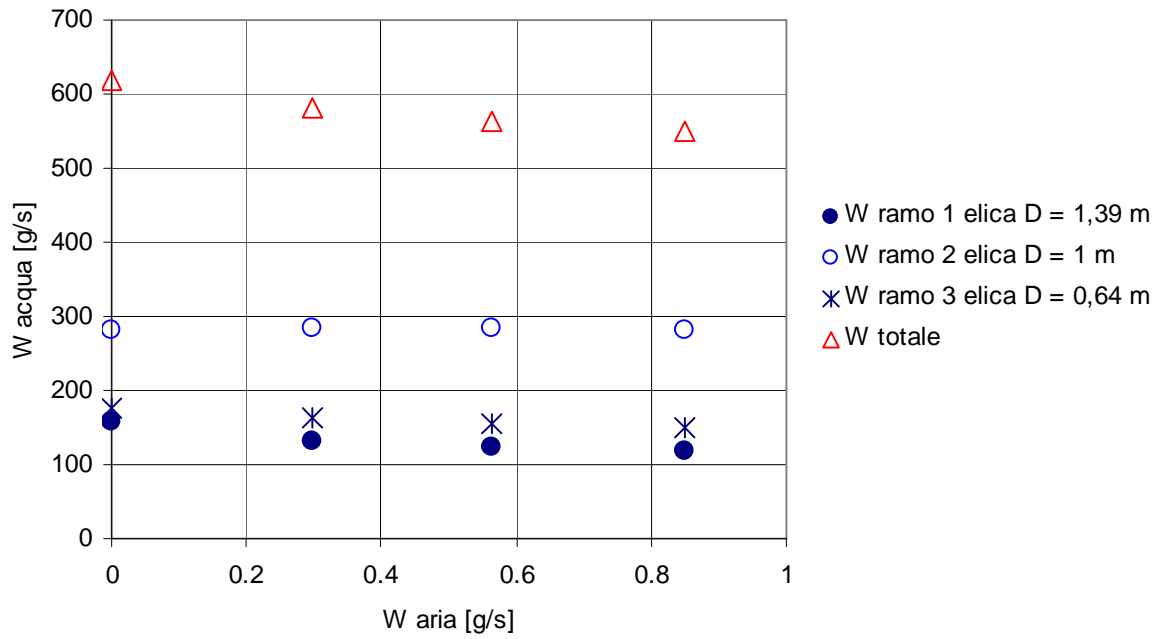


Figura 202: Ripartizione delle portate nei rami (Portata W3). Circuito B Prove II Caso 1.

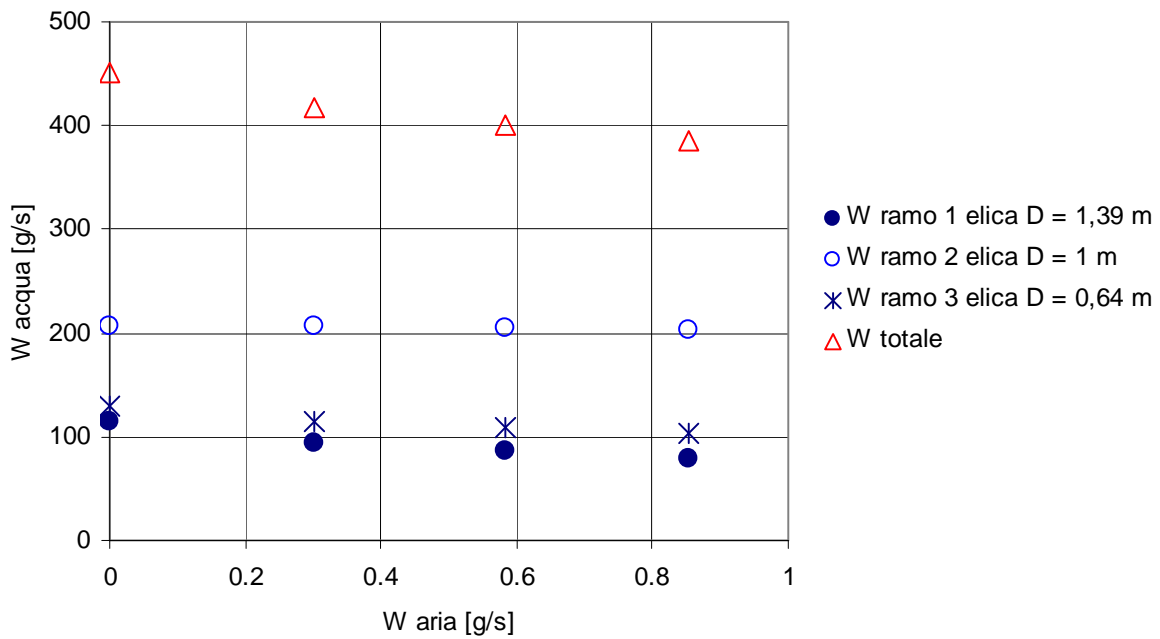


Figura 203: Ripartizione delle portate nei rami (Portata W4). Circuito B Prove II Caso 1.

- **Caso 2: Portate W5 e W6**

Nel caso delle prove con portate totali W5 e W6, pari a 112 g/s e 240 g/s, non si è riscontrata una notevole variazione della portata totale con l'inserimento nelle eliche della portata d'aria imposta. Anche in questo caso nei diagrammi oltre alle portate nei rami sono evidenziate le portate totali d'acqua (somma delle portate nei tre rami).

In Tabella 60 sono riportate le quantità di cui sono variate le portate d'acqua totali; per quanto riguarda il caso W5 si ha, al contrario di tutti gli altri casi trattati, un aumento della portata totale con l'inserimento della portata d'aria nelle eliche e, inoltre, all'aumentare della portata d'aria la portata d'acqua non aumenta con costanza, ma con andamento 'oscillante'.

| W acqua totale in regime monofase | $\Delta W$ acqua con W aria = 1,45 g/s | $\Delta W$ acqua con W aria = 1,65 g/s | $\Delta W$ acqua con W aria = 1,9 g/s |
|-----------------------------------|--|--|---------------------------------------|
| W5 = 112 g/s                      | -13,4                                  | -10,7                                  | -18,8                                 |
| W6 = 240 g/s                      | 28,5                                   | 28,5                                   | 26,7                                  |

**Tabella 60: Quantità di cui sono diminuite le portate d'acqua totali nel caso di regime bifase. Circuito B Prove II Caso 2.**

In Figura 204 e in Figura 205 sono riportati i diagrammi degli andamenti delle portate trattate in questo caso.

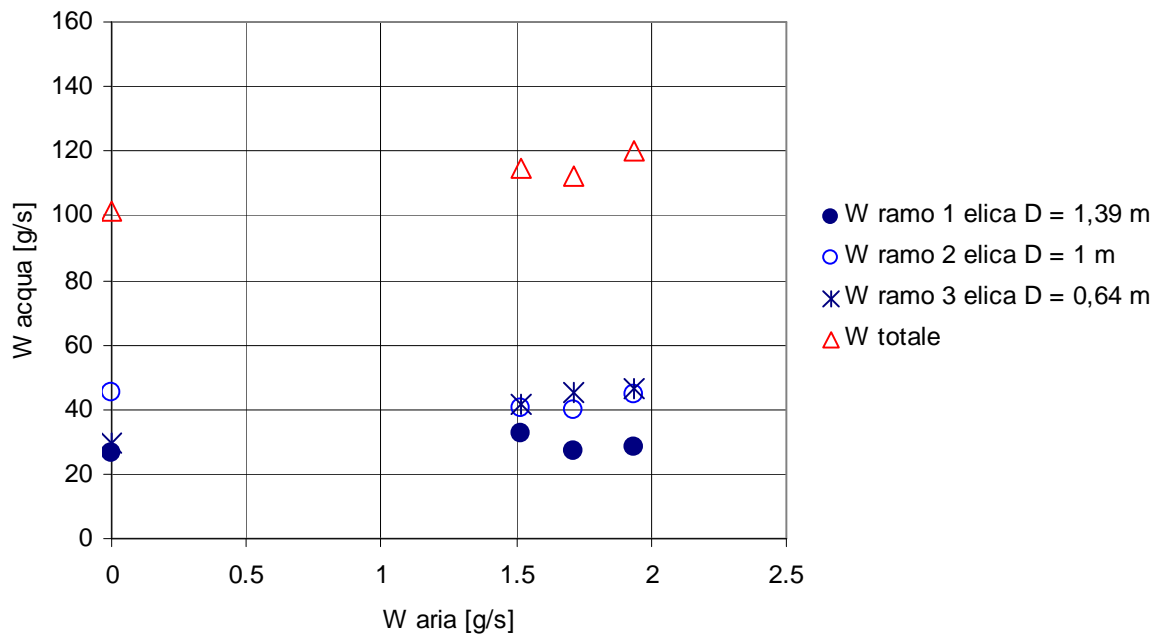


Figura 204: Ripartizione delle portate nei rami (Portata W5). Circuito B Prove II Caso 2.

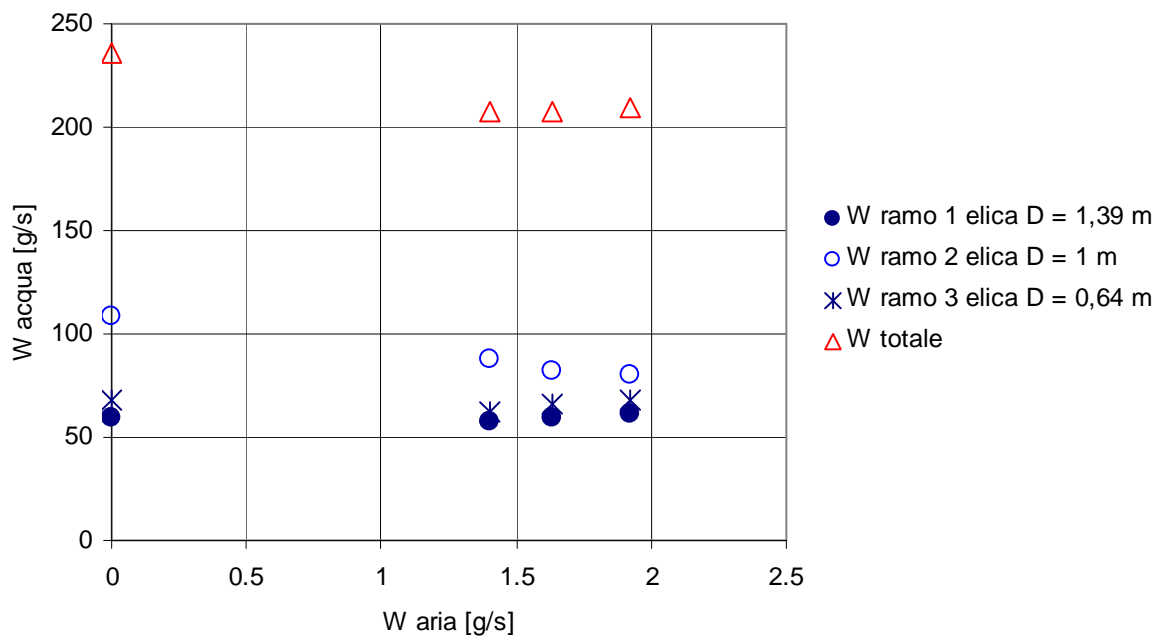


Figura 205: Ripartizione delle portate nei rami (Portata W6). Circuito B Prove II Caso 1.

### 7.3.2 Differenze di pressione. Circuito B prove II.

- **Caso 1: Portate W1, W2, W3 e W4**

Le portate d'acqua totale utilizzate nelle prove II, definite come Caso 1, sono le stesse utilizzate nella analisi effettuata con una sola elica alla volta in deflusso bifase (prove di tipo I); per questa ragione le cadute di pressione che si sono misurate tra ingresso ed uscita delle sezioni di prova in regime monofase sono confrontabili.

Si riporta quindi l'andamento delle cadute di pressione in regime monofase confrontandola con la curva ricavata con la sperimentazione in regime monofase con il circuito A (Figura 206, Figura 207 e Figura 208). Anche in questo caso i punti testati si posizionano sulla curva ricavata precedentemente, con piccoli scostamenti dovuti all'incertezza di misura.

Come per le prove precedentemente effettuate si sono valutate le cadute di pressione per attrito. Queste sono riportate, con le cadute di pressione misurate, in Appendice B.

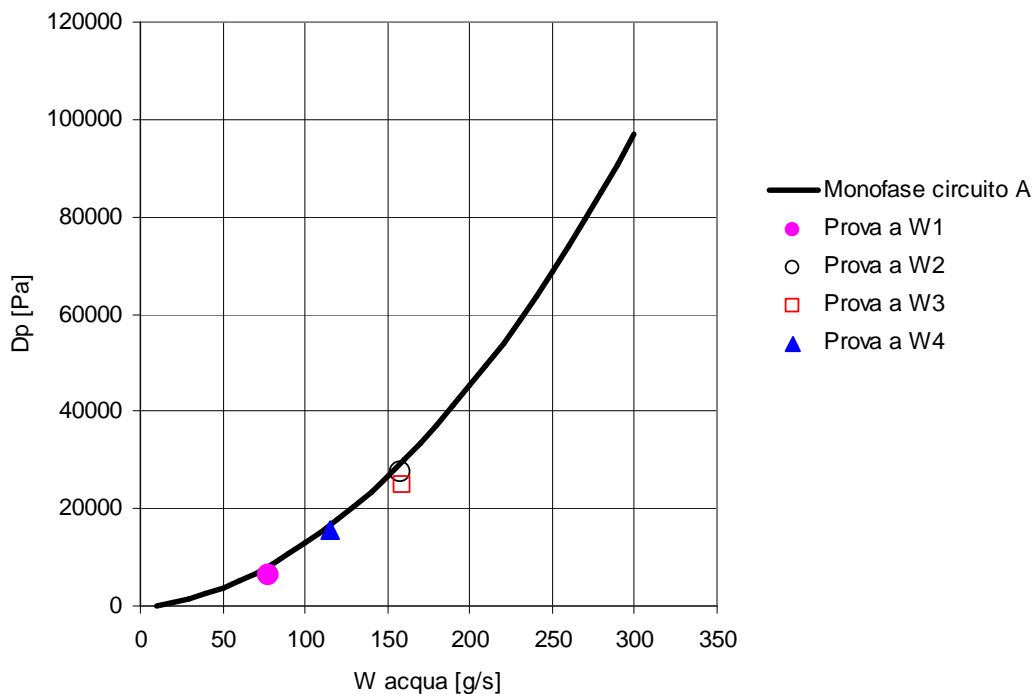


Figura 206: Confronto cadute di pressione in monofase nell' elica con  $D = 1,39$  m. Circuito B Prove II Caso 1.

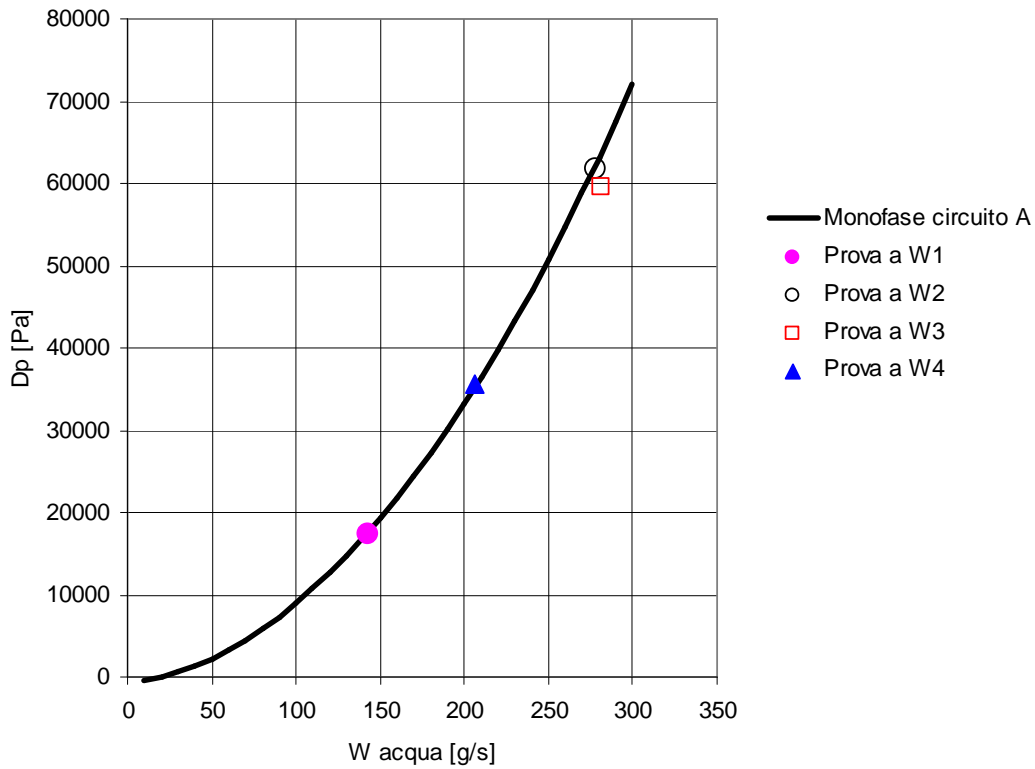


Figura 207: Confronto cadute di pressione in monofase nell' elica con  $D = 1$  m. Circuito B Prove II Caso 1.

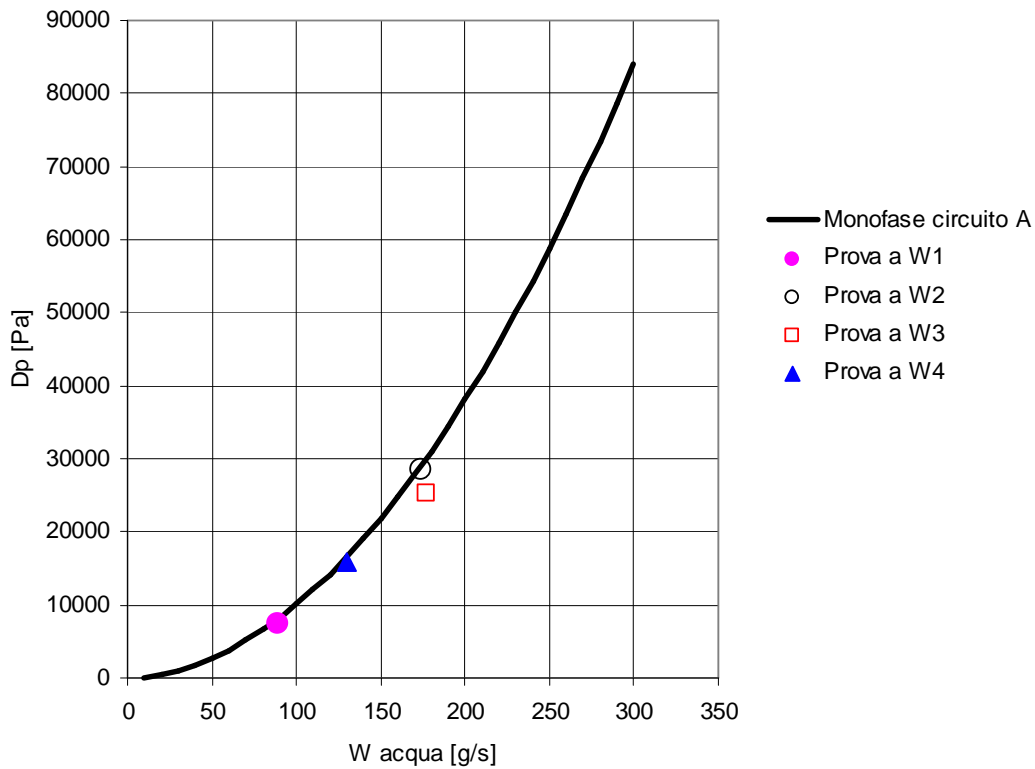


Figura 208: Confronto cadute di pressione in monofase nell' elica con  $D = 0,64$  m. Circuito B Prove II Caso 1.



• **Caso 2: Portate W5 e W6**

Le portate d'acqua totale utilizzate nelle prove, definite come Caso 2, sono molto basse, questo rende difficile la misura delle cadute di pressione in regime monofase trovandoci in prossimità del fondo scala degli strumenti utilizzati nel circuito.

Queste prove hanno lo scopo di mettere in luce le instabilità fluidodinamiche nel caso di canali in parallelo, per questa ragione la rilevazione delle portate d'acqua nei rami risulta difficoltosa e la media dei valori acquisiti non è significativa. Non appare quindi utile riportare in questa sede i diagrammi portata d'acqua - cadute di pressione misurate o cadute di pressione per attrito, essendo la coordinata x solo indicativa e fortemente influenzata dall'instabilità fluidodinamica e pertanto dal tempo di acquisizione.

In Tabella 61 si definiscono le condizioni di prova testate in termini di portate d'acqua totali e portate d'aria. Sono riportati in Tabella 62 i valori medi delle cadute di pressione misurate, tra ingresso ed uscita delle tre eliche, per ogni condizione di prova testata e le relative cadute di pressione per attrito calcolate.

| Condizioni di prova | W acqua totale [g/s] | W aria elica D = 1,39 m [g/s] | W aria elica D = 1m [g/s] | W aria elica D = 0,64 m [g/s] |
|---------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Cond-1              | W5 = 112             | 1,52                          | 1,48                      | 1,58                          |
| Cond-2              |                      | 1,71                          | 1,77                      | 1,91                          |
| Cond-3              |                      | 1,93                          | 2,07                      | 2,32                          |
| Cond-4              | W6 = 240             | 1,40                          | 1,48                      | 1,63                          |
| Cond-5              |                      | 1,63                          | 1,77                      | 1,86                          |
| Cond-6              |                      | 1,92                          | 2,07                      | 2,23                          |

**Tabella 61: Condizioni di prova; Circuito B Prove II Caso 2.**

| Condizioni di prova | $\Delta p$ misurate elica D = 1,39 m [Pa] | $\Delta p$ misurate elica D = 1m [Pa] | $\Delta p$ misurate elica D = 0,64 m [Pa] |
|---------------------|---|---------------------------------------|---|
| Cond-1              | -11606,2                                  | -13988,9                              | -219,05                                   |
| Cond-2              | -11378,27                                 | -13880,4                              | -456,73                                   |
| Cond-3              | -11163,9                                  | -13843,4                              | -483,65                                   |
| Cond-4              | -10771,1                                  | -13748,8                              | -304,4                                    |
| Cond-5              | -10577,8                                  | -13707,8                              | -202,2                                    |
| Cond-6              | -10331,5                                  | -13628,6                              | -50                                       |
| Condizioni di prova | $\Delta p$ attrito elica D = 1,39m [Pa]   | $\Delta p$ attrito elica D = 1m [Pa]  | $\Delta p$ attrito elica D = 0,64m [Pa]   |
| Cond-1              | 16391,54                                  | 9407,95                               | 23717,35                                  |
| Cond-2              | 16619,47                                  | 9516,45                               | 23479,67                                  |
| Cond-3              | 16833,84                                  | 9553,45                               | 23452,75                                  |
| Cond-4              | 17226,67                                  | 9648,05                               | 23632                                     |
| Cond-5              | 17419,94                                  | 9689,05                               | 23734,2                                   |
| Cond-6              | 17666,24                                  | 9768,25                               | 23886,4                                   |

**Tabella 62: Cadute di pressione misurate e per attrito; Circuito B Prove II Caso 2.**

### 7.3.3 Calcolo della portata in massa di aria. Circuito B prove II.

La scala dei rotametri è riportata in condizioni nominali (temperatura pari a 20°C e pressione pari a 1,013 bar). La pressione di esercizio dei rotametri per le prove di tipo II è risultata essere circa 6,8 bar. La formula utilizzata per ottenere la portata d'aria è la stessa riportata in questo capitolo nel paragrafo 1.2.3. Le caratteristiche degli asometri utilizzati nelle prove per i due casi sono riportate in Tabella 63 e Tabella 64.

| Tipo       | Range portata asometri            | Temperatura valutazione [°C] | Pressione valutazione [mbar] | Elica di riferimento [m] |
|------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| COF 002068 | 0,077 – 0,77 [nm <sup>3</sup> /h] | 20                           | 1031                         | 1,39                     |
| N5 2400 B  | 0 – 1000 [nl/h]                   | 20                           | 760                          | 1                        |
| N5 2300 B  | 0 – 340 [nl/h]                    | 20                           | 760                          | 0,64                     |

**Tabella 63: Caratteristiche asometri utilizzati nelle prove II Caso 1. Circuito B.**

| Tipo       | Range portata asometri            | Temperatura valutazione [°C] | Pressione valutazione [mbar] | Elica di riferimento [m] |
|------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| COF 002068 | 0,077 – 0,77 [nm <sup>3</sup> /h] | 20                           | 1031                         | 1,39                     |
| N5 2400 B  | 0 – 1000 [nl/h]                   | 20                           | 760                          | 1                        |
| COF 002069 | 0,31 – 3,1 [nm <sup>3</sup> /h]   | 20                           | 1031                         | 0,64                     |

**Tabella 64: Caratteristiche asometri utilizzati nelle prove II Caso 2. Circuito B.**

Per le prove di tipo II, in entrambi i casi, al variare della portata d'acqua si è effettuata una prima acquisizione in deflusso monofase, allo scopo di avere un controllo sistematico attraverso un confronto immediato dei risultati ottenuti, come per le prove di tipo I, con le prove in monofase preliminari.

Le portate d'aria utilizzate nei due casi trattati sono riportate nella tabella della matrice sperimentale (Tabella 49 paragrafo 1.1.2).

### 7.3.4 Grado di vuoto. Circuito B prove II.

- **Caso 1: Portate W1, W2, W3 e W4**

Il grado di vuoto  $\alpha$ , il titolo in massa  $x$  e il titolo volumetrico  $\beta$  si sono stati valutati con le formule utilizzate per l'analisi delle prove I.

In questo paragrafo sono riportati gli andamenti del grado di vuoto nelle sezioni di prova in regime bifase in funzione della portata d'aria e della portata d'acqua utilizzate per le prove denominate Caso 1.

Il grado di vuoto in queste prove risulta compreso tra 0,14 e 0,67; questi valori sono confrontabili con quelli ottenuti con le prove di tipo I.

Anche in questo caso, a causa della redistribuzione della portata d'acqua nei rami al variare della portata d'aria nell'elica in condizioni bifase si ottengono differenti gradi di vuoto, riportati nei diagrammi seguenti (da Figura 209 a Figura 216).

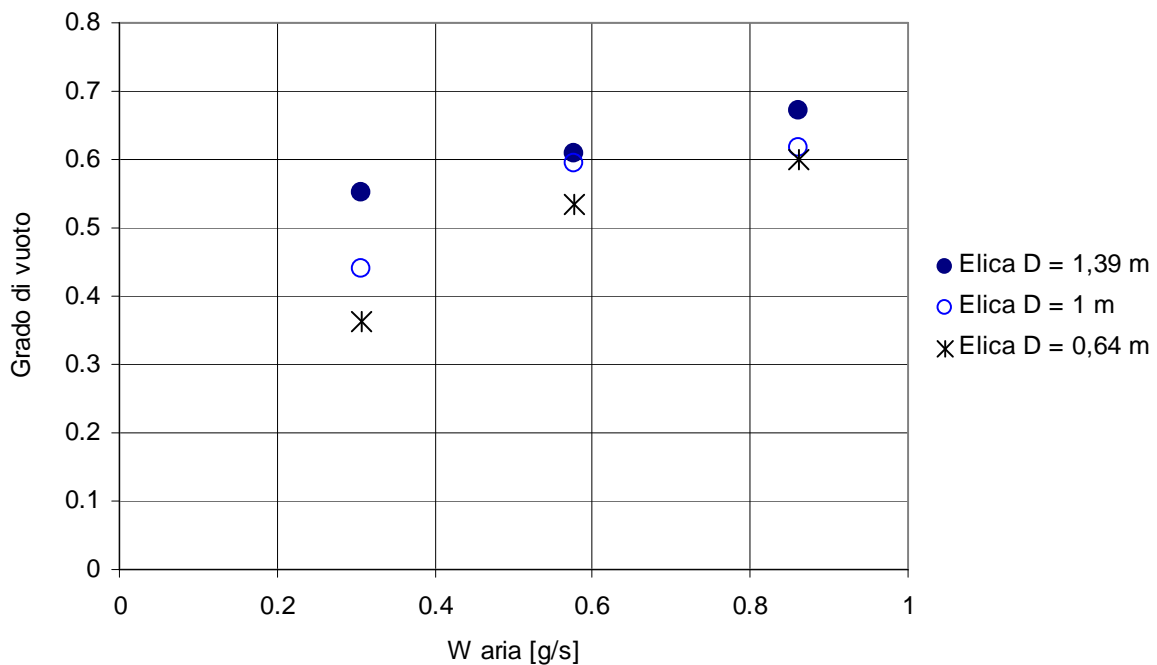
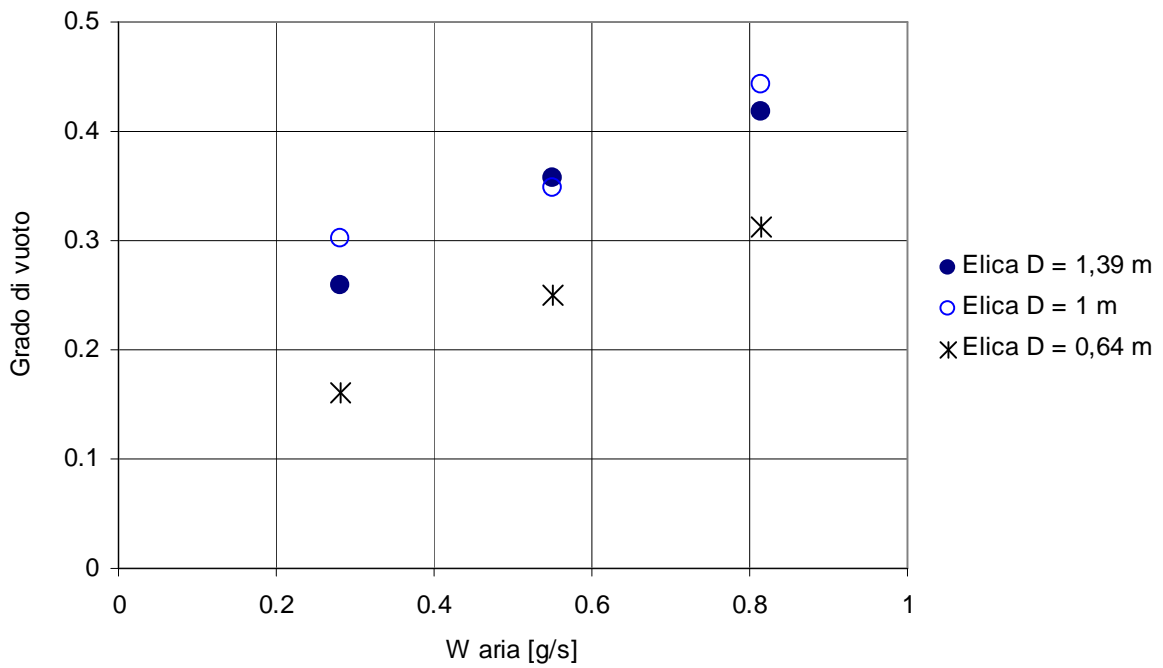
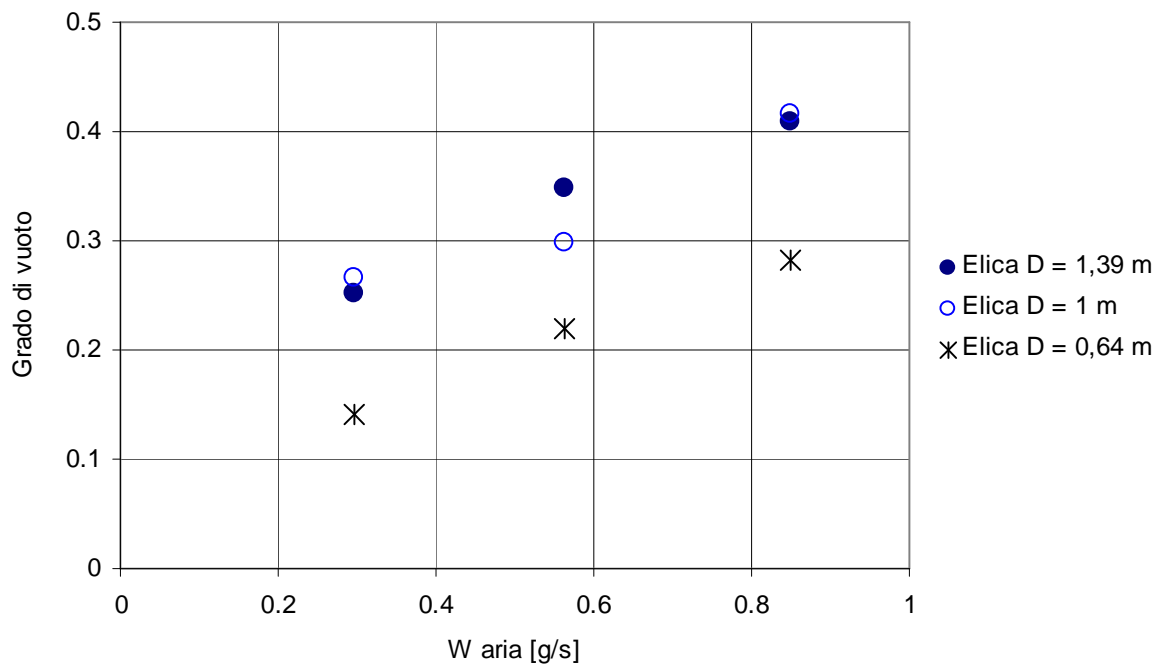


Figura 209: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria (Portata acqua W1). Circuito B. Prove II Caso 1



**Figura 210: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria (Portata acqua W2). Circuito B. Prove II Caso 1**



**Figura 211: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria (Portata acqua W3). Circuito B. Prove II Caso 1**

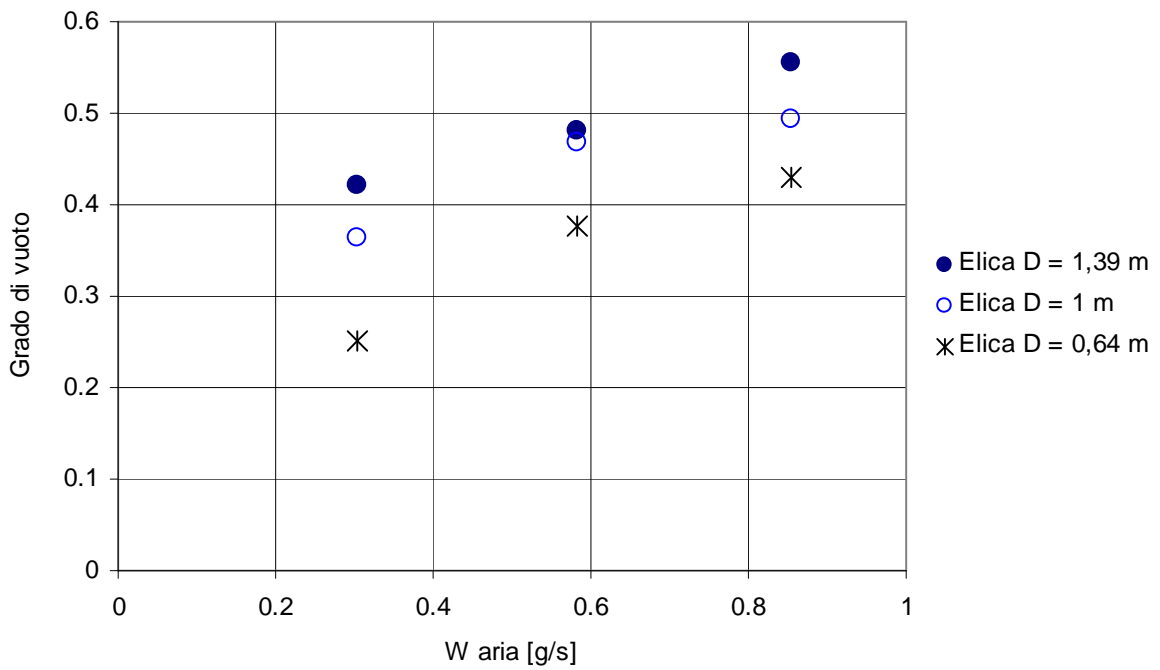


Figura 212: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria (Portata acqua  $W_4$ ).  
Circuito B. Prove II Caso 1

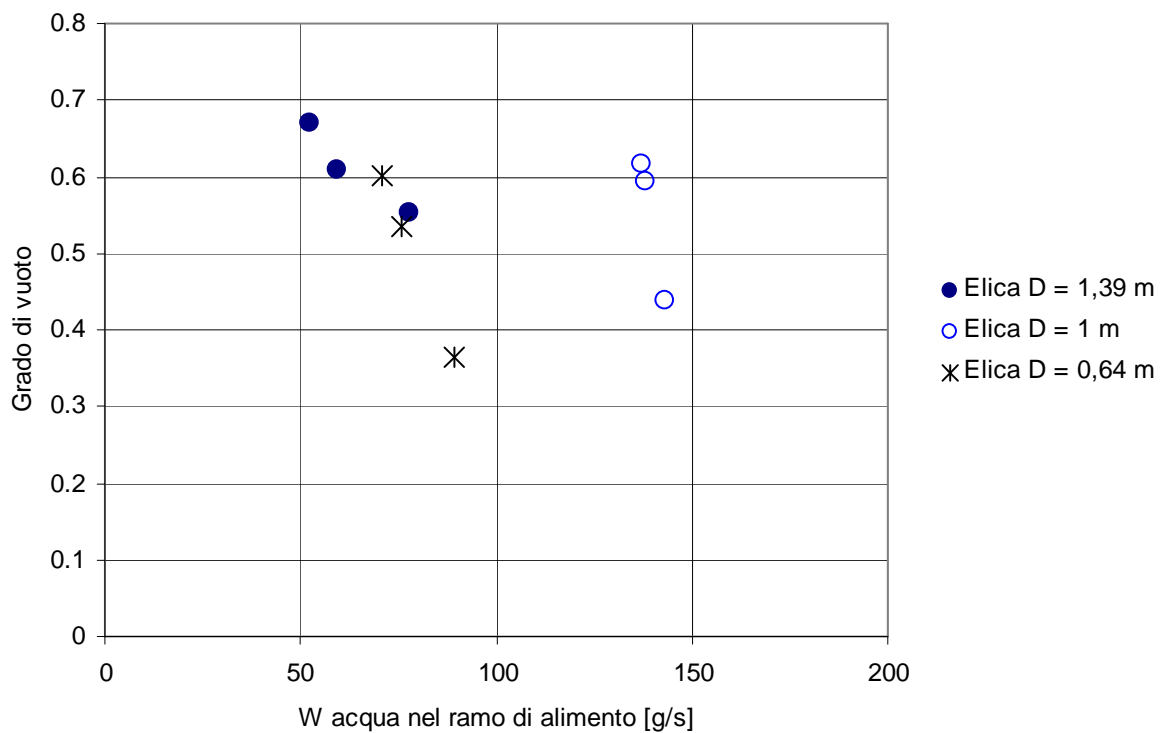
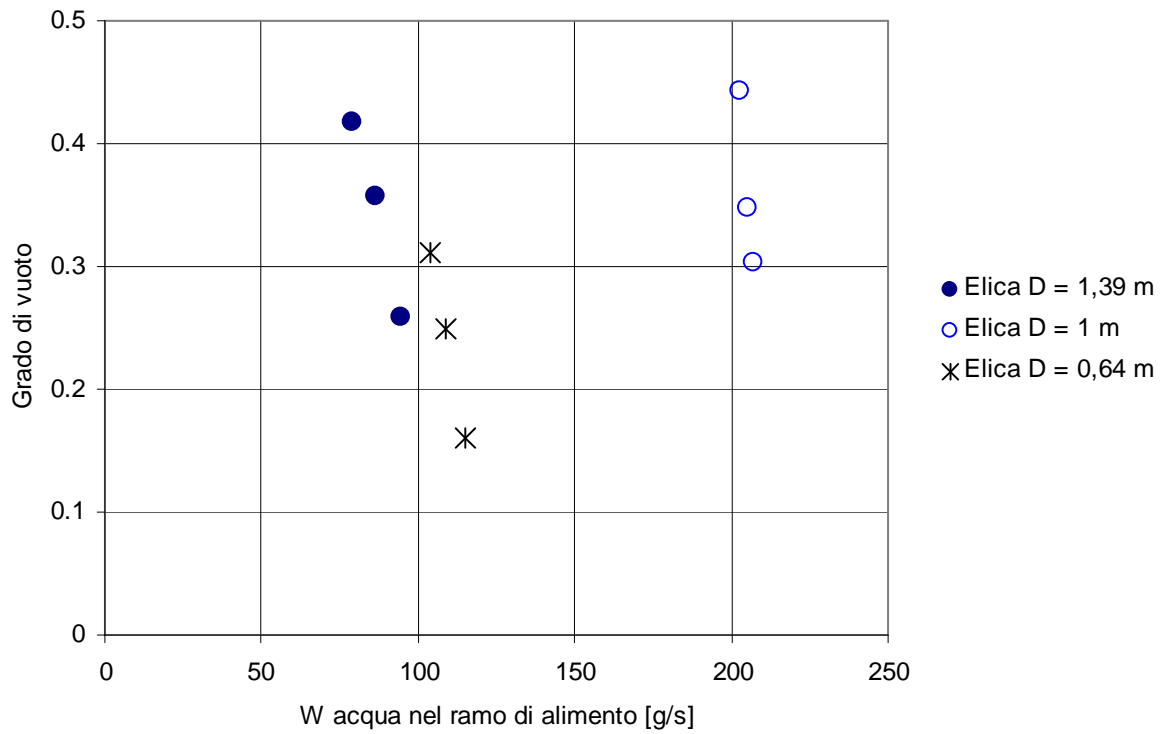
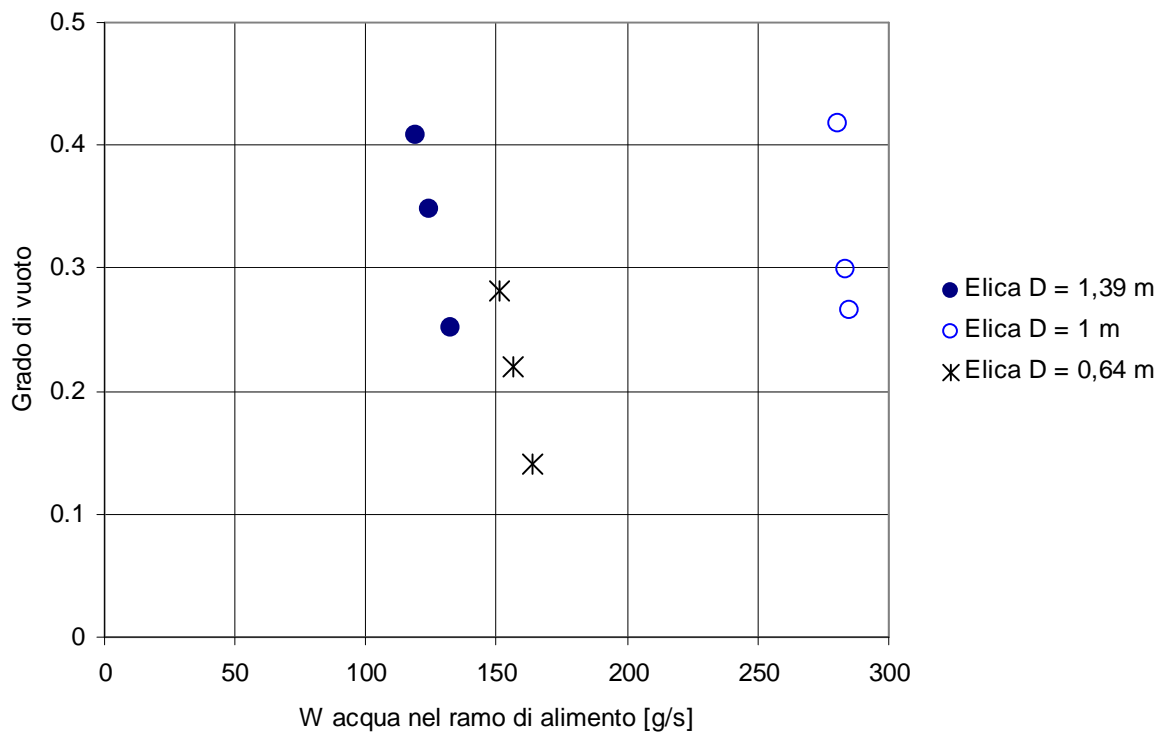


Figura 213: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di acqua (Portata acqua  $W_1$ ).  
Circuito B. Prove II Caso 1



**Figura 214: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di acqua (Portata acqua W2). Circuito B. Prove II Caso 1**



**Figura 215: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di acqua (Portata acqua W3). Circuito B. Prove II Caso 1**

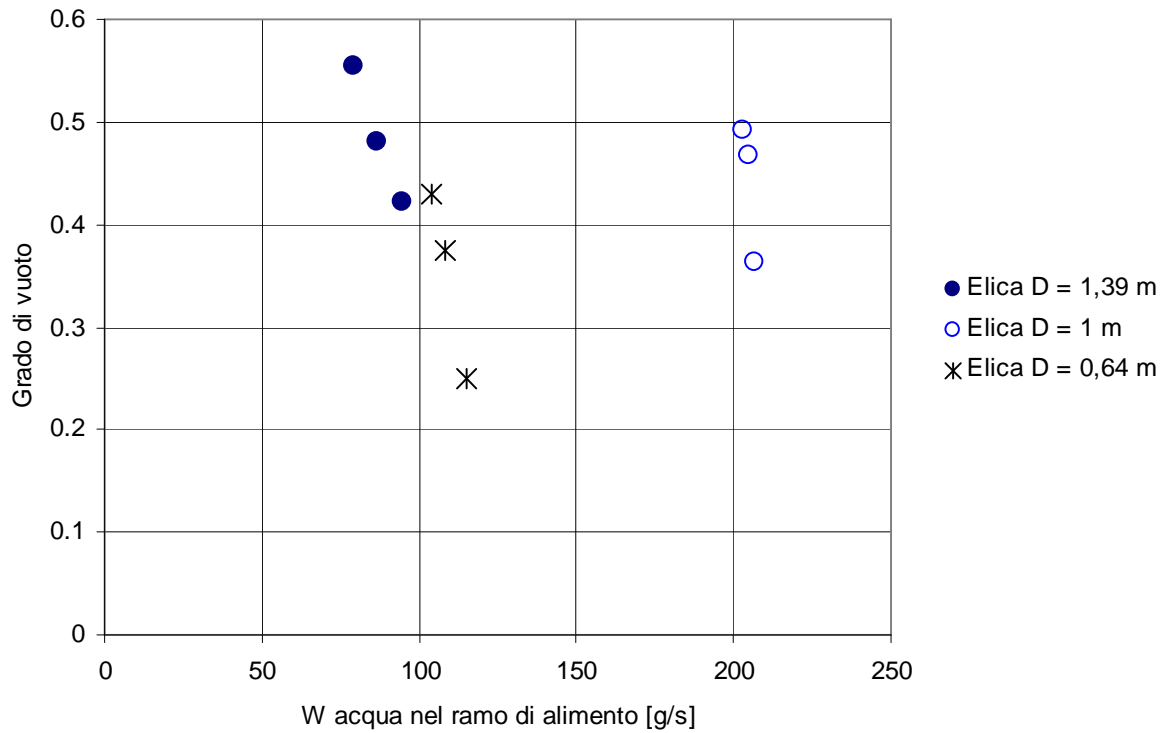


Figura 216: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di acqua (Portata acqua W4). Circuito B. Prove II Caso 1

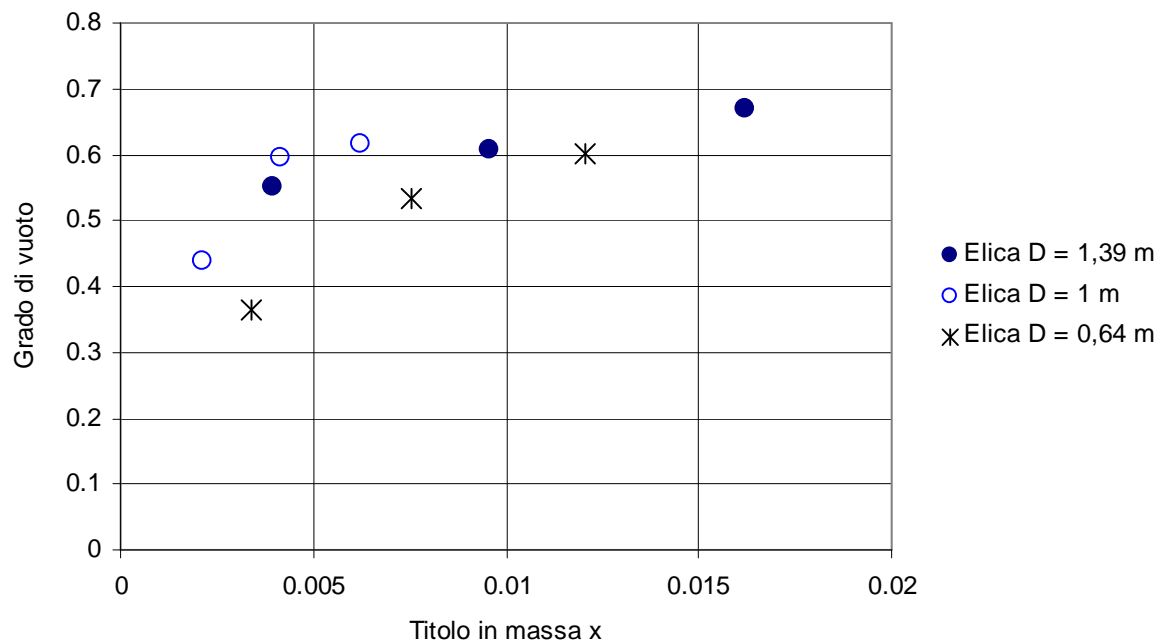


Figura 217: Grado di vuoto  $\alpha$  - titolo in massa x. (Portata W1) Circuito B. Prove II Caso 1



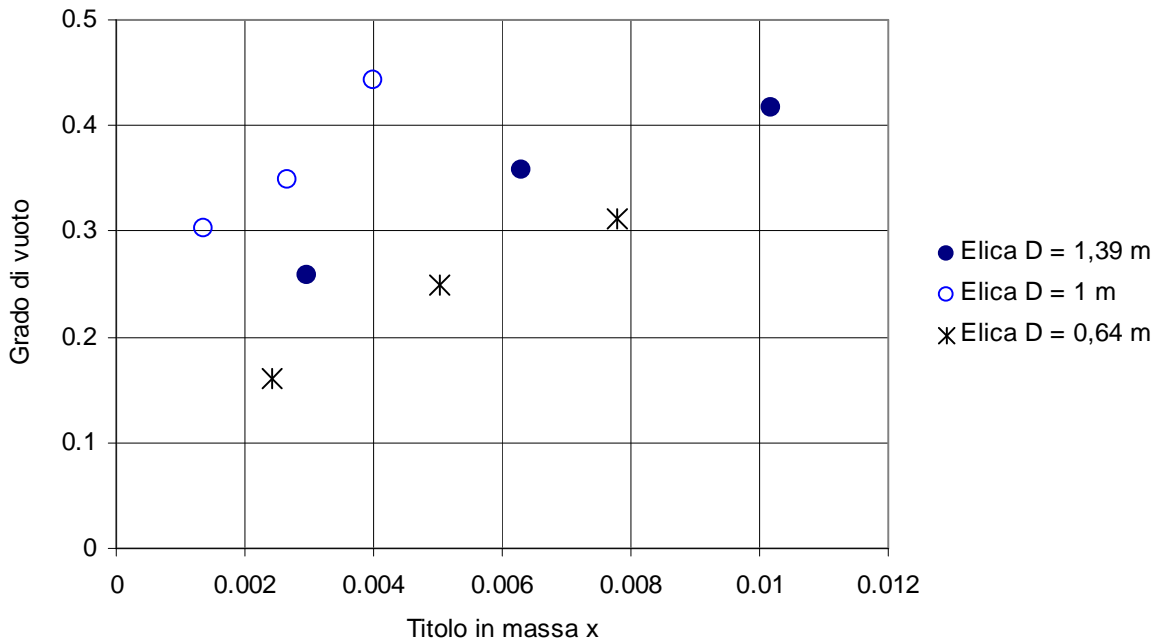


Figura 218: Grado di vuoto  $\alpha$  - titolo in massa  $x$ . (Portata W2) Circuito B. Prove II Caso 1

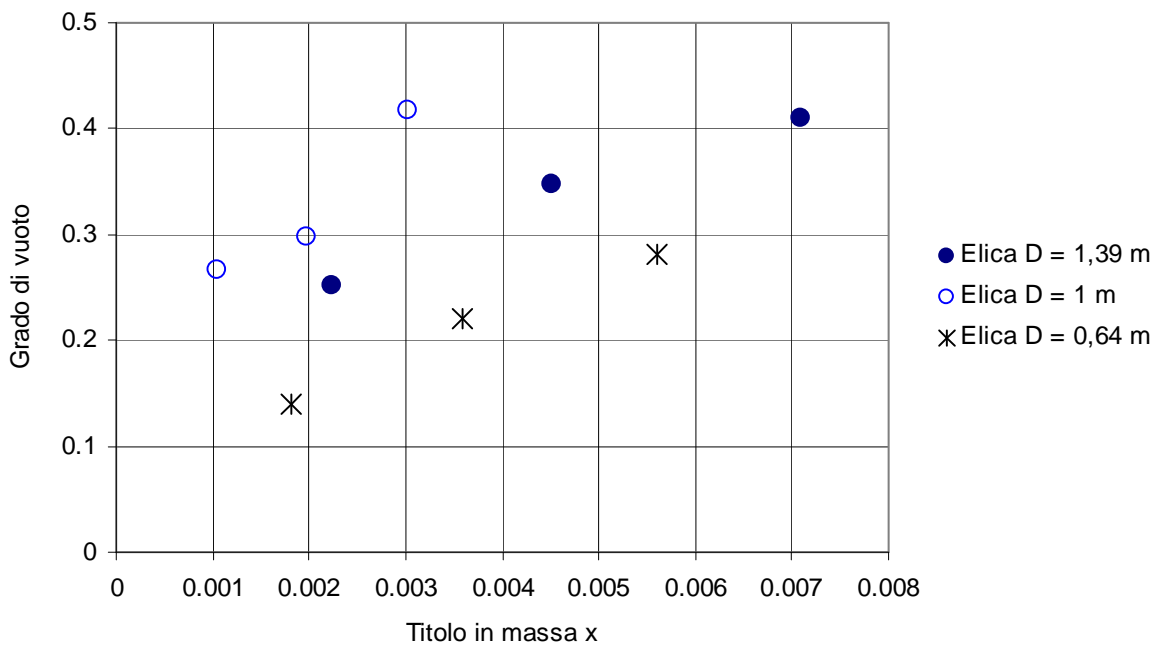


Figura 219: Grado di vuoto  $\alpha$  - titolo in massa  $x$ . (Portata W3) Circuito B. Prove II Caso 1

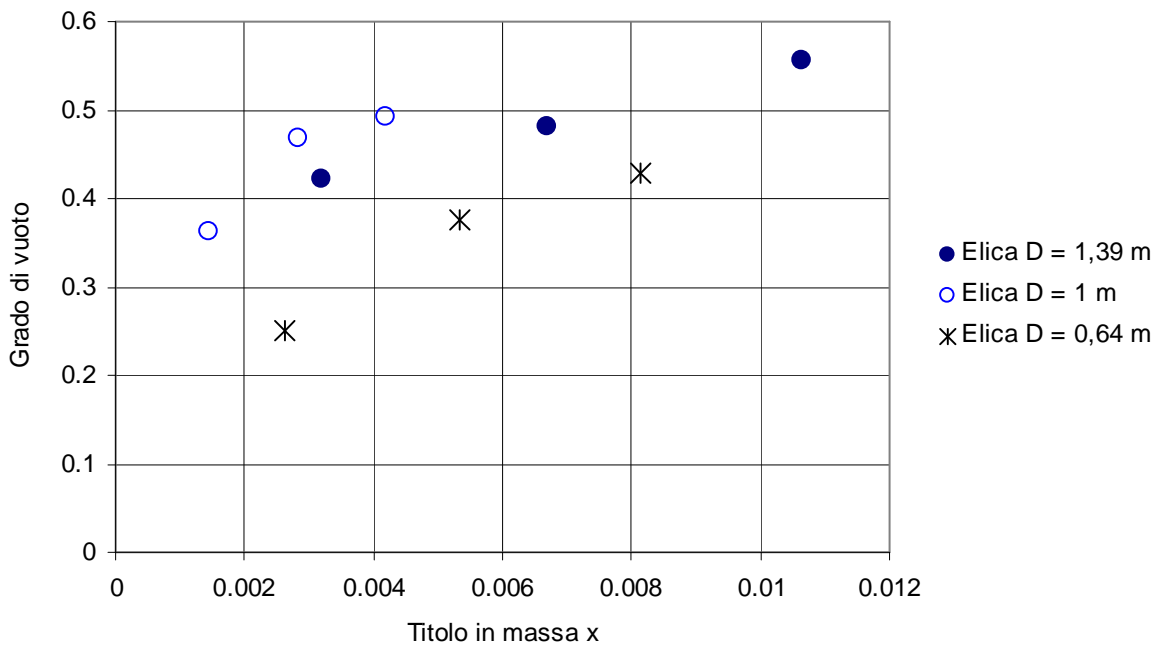


Figura 220: Grado di vuoto  $\alpha$  - titolo in massa  $x$ . (Portata W4) Circuito B. Prove II Caso 1

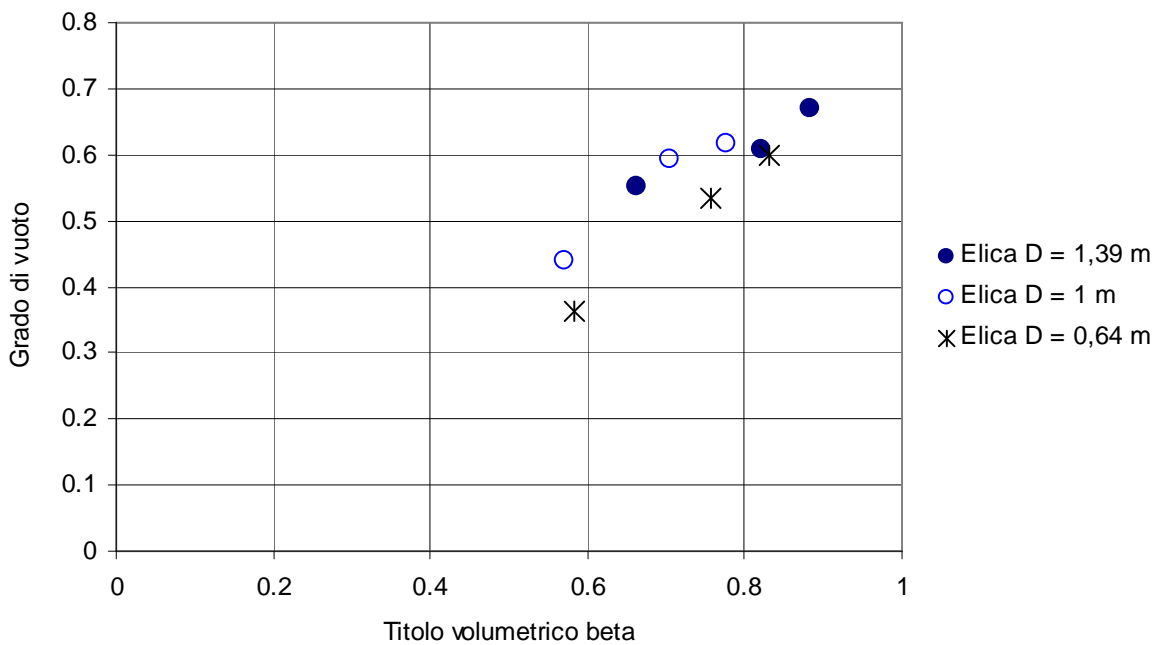


Figura 221: Grado di vuoto - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W1) Circuito B. Prove II Caso 1

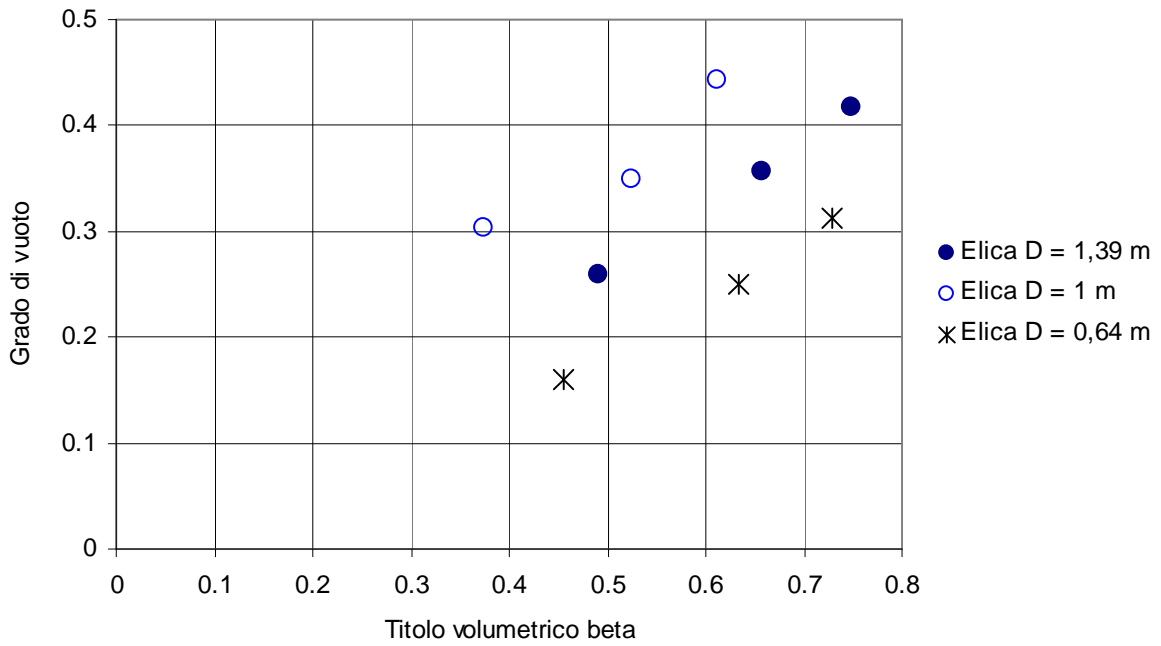


Figura 222: Grado di vuoto - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W2) Circuito B. Prove II Caso 1

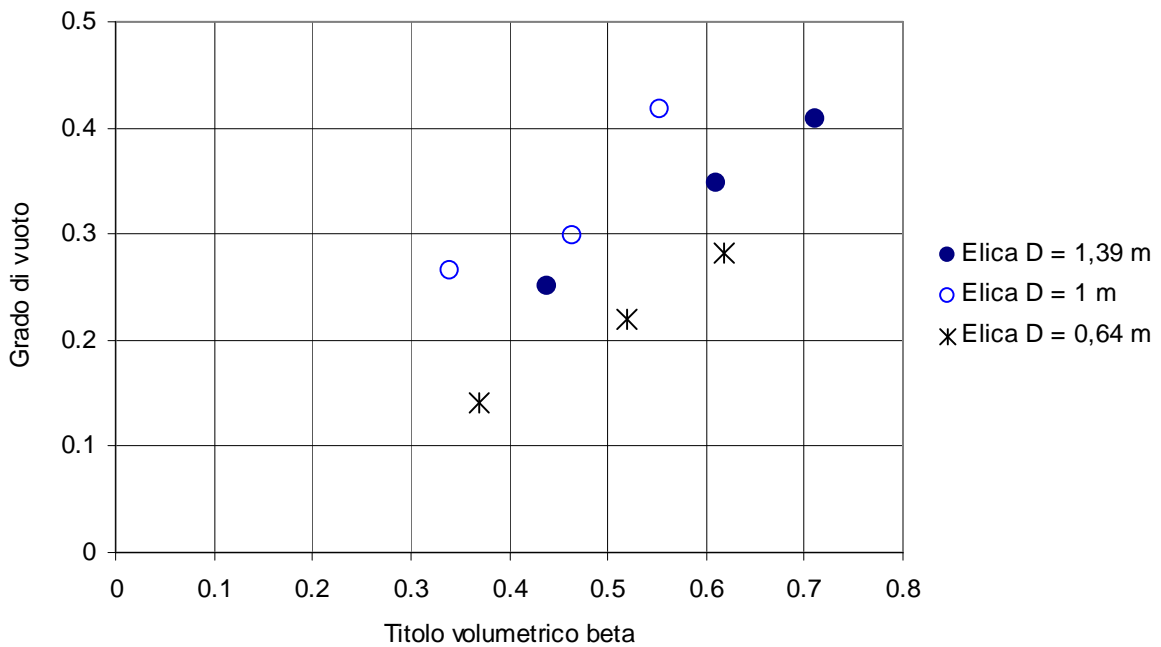


Figura 223: Grado di vuoto - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W3) Circuito B. Prove II Caso 1

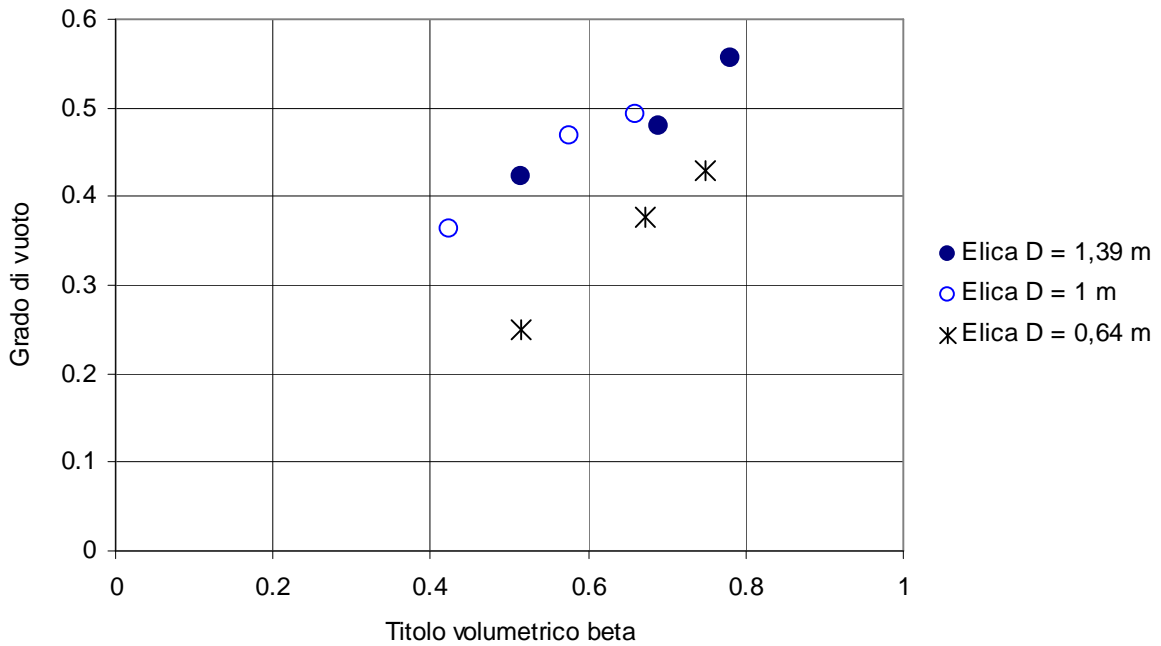


Figura 224: Grado di vuoto - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W4) Circuito B. Prove II Caso 1

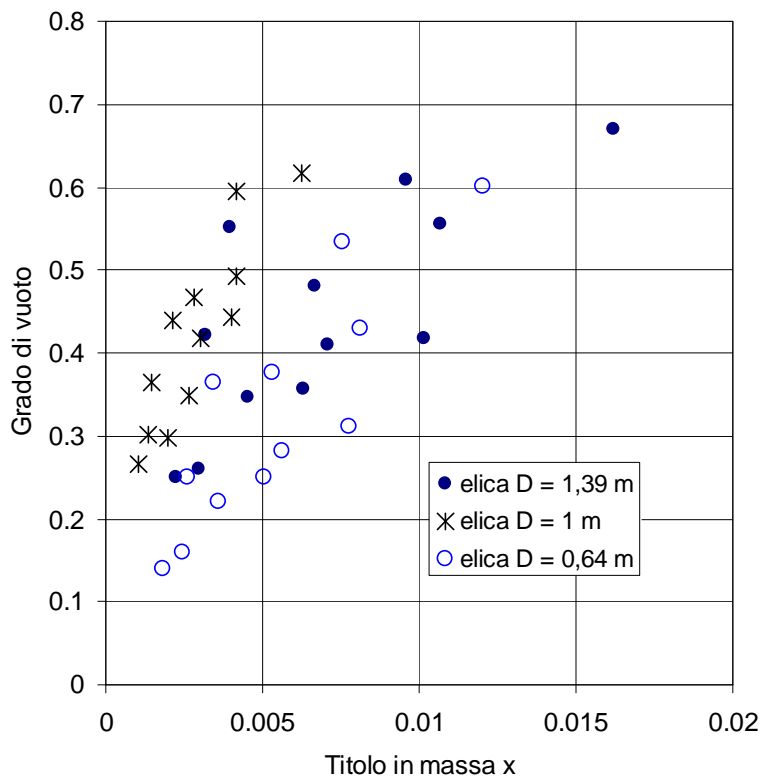
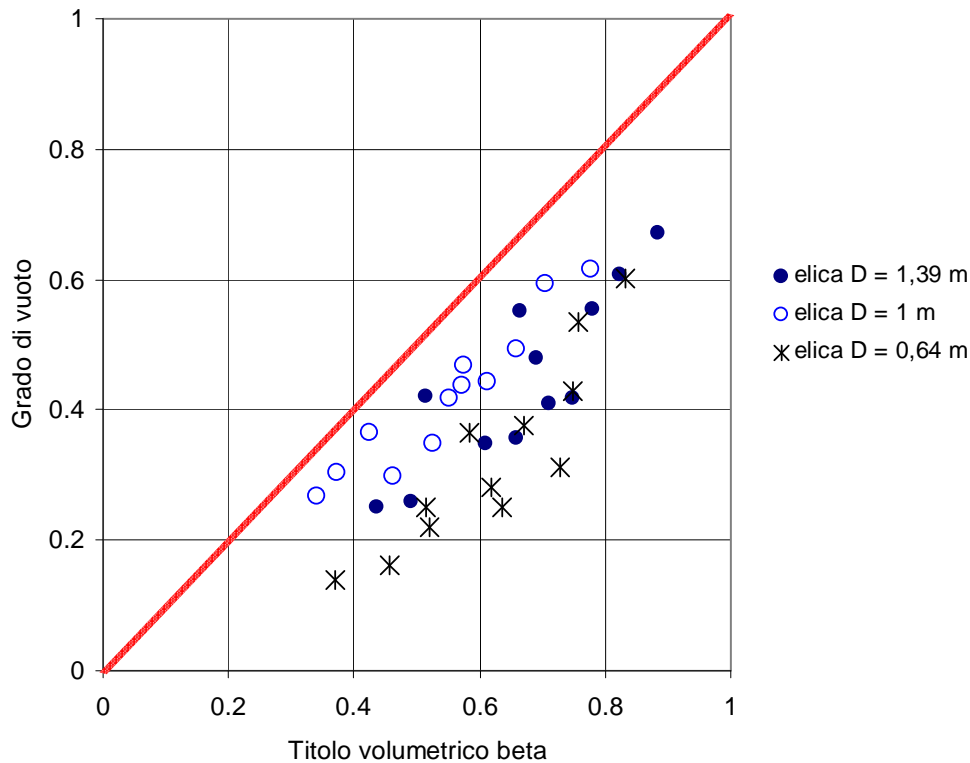


Figura 225: Grado di vuoto - titolo in massa x medio per le tre eliche. Circuito B. Prove II Caso 1



**Figura 226: Grado di vuoto - del titolo volumetrico per le tre eliche. Circuito B. Prove II Caso 1**

Da Figura 217 a Figura 226 sono riportati gli andamenti del grado di vuoto nelle sezioni di prova in regime bifase in funzione del titolo in massa  $x$  e del titolo volumetrico  $\beta$ . Il grado di vuoto risulta anche per questa serie di prove minore del titolo volumetrico in accordo con quanto ottenuto per le prove di tipo I. Lo *slip ratio*  $S$  è maggiore di uno per tutti i punti testati: la fase gassosa percorre l'elica a velocità più elevata della fase liquida. In Tabella 65 si riportano i valori di *slip ratio* ricavati per le prove definite come Caso1.

| Portate d'acqua totali | Valori <i>slip ratio</i><br>Elica D = 0,64 m | Valori <i>slip ratio</i><br>Elica D = 1 m | Valori <i>slip ratio</i><br>Elica D = 1,39 m |
|------------------------|--|---|--|
| W1 = 290 g/s           | 2,44 – 2,69 – 3,3                            | 1,7 – 1,63 – 2,18                         | 1,6 – 2,99 – 3,74                            |
| W2 = 560 g/s           | 4,4 – 5,22 – 5,92                            | 1,38 – 2,06 – 1,98                        | 2,75 – 3,46 – 4,17                           |
| W3 = 580 g/s           | 3,58 – 3,82 – 4,12                           | 1,42 – 2,03 – 1,73                        | 2,32 – 2,94 – 3,56                           |
| W4 = 530 g/s           | 3,18 – 3,4 – 3,99                            | 1,29 – 1,55 – 2                           | 1,45 – 2,4 – 2,85                            |

**Tabella 65: Valori dello *slip ratio*. Circuito B Prove II Caso 1.**

- **Caso 2: Portate W5 e W6**

Per quanto concerne il Caso 2 il grado di vuoto  $\alpha$  rilevato è fortemente influenzato, come atteso, dall'instabilità fluidodinamica della portata nei rami. Per tale ragione sono state effettuate più chiusure rapide delle valvole d'intercettazione e relative pesate del liquido rimasto intrappolato nelle sezioni di prova, in modo da ottenere un valore medio del grado di vuoto per ogni condizione di prova testata.

Il grado di vuoto medio misurato è elevato per entrambe le portate d'acqua totale utilizzate per questa serie di prove; esso è compreso tra 0,70 e 0,84.

In Figura 227 e in Figura 228 si riportano gli andamenti del grado di vuoto medio, in funzione della portata d'aria nelle eliche.

Il calcolo del titolo in massa  $x$  e del titolo volumetrico  $\beta$  è stato eseguito considerando una portata d'acqua media nei rami, non tenendo conto delle instabilità fluidodinamiche ad essa associate; pertanto i valori trovati sono da ritenersi indicativi di una 'zona d'interesse' e non rappresentativi di valori reali, da Figura 229 a Figura 234 sono riportati andamenti del grado di vuoto medio, in funzione del titolo in massa  $x$  e del titolo volumetrico  $\beta$ .

Per gli stessi motivi non si riporta l'andamento del grado di vuoto in funzione della portata d'acqua media essendo il suo valore fortemente influenzato dalle elevate instabilità fluidodinamiche ad essa associate.

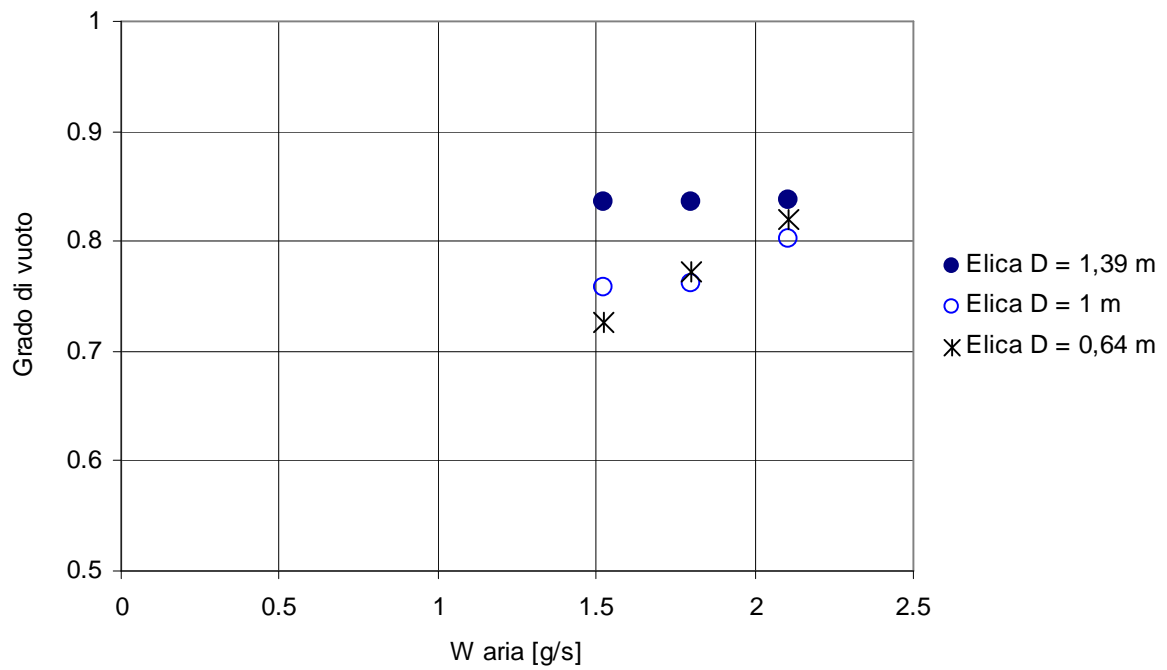


Figura 227: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria (Portata acqua W5).  
Circuito B. Prove II Caso 2

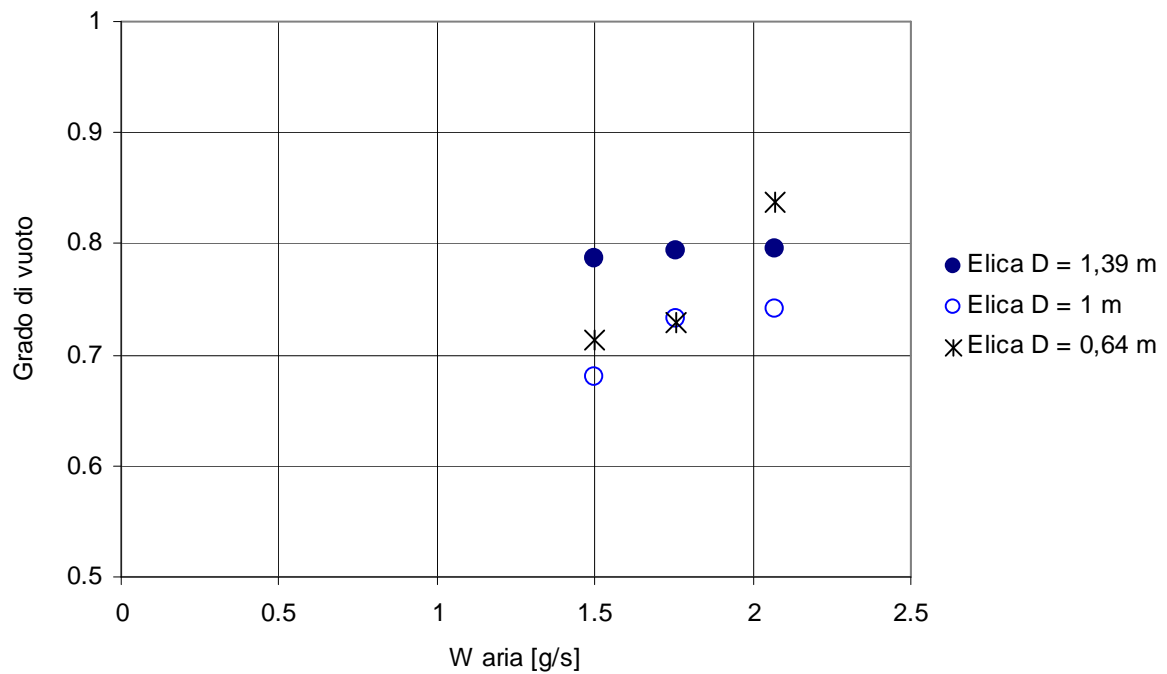


Figura 228: Andamento grado di vuoto  $\alpha$  in funzione della portata di aria (Portata acqua W6).  
Circuito B. Prove II Caso 2

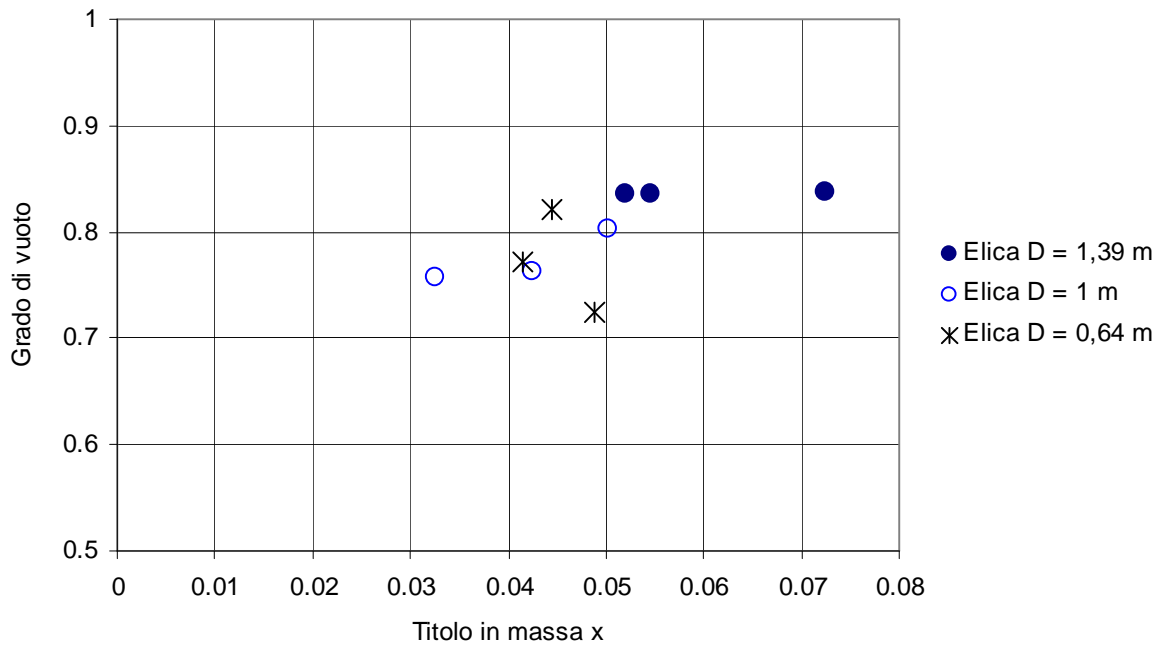


Figura 229: Grado di vuoto  $\alpha$  - titolo in massa  $x$ . (Portata W5) Circuito B. Prove II Caso 2.

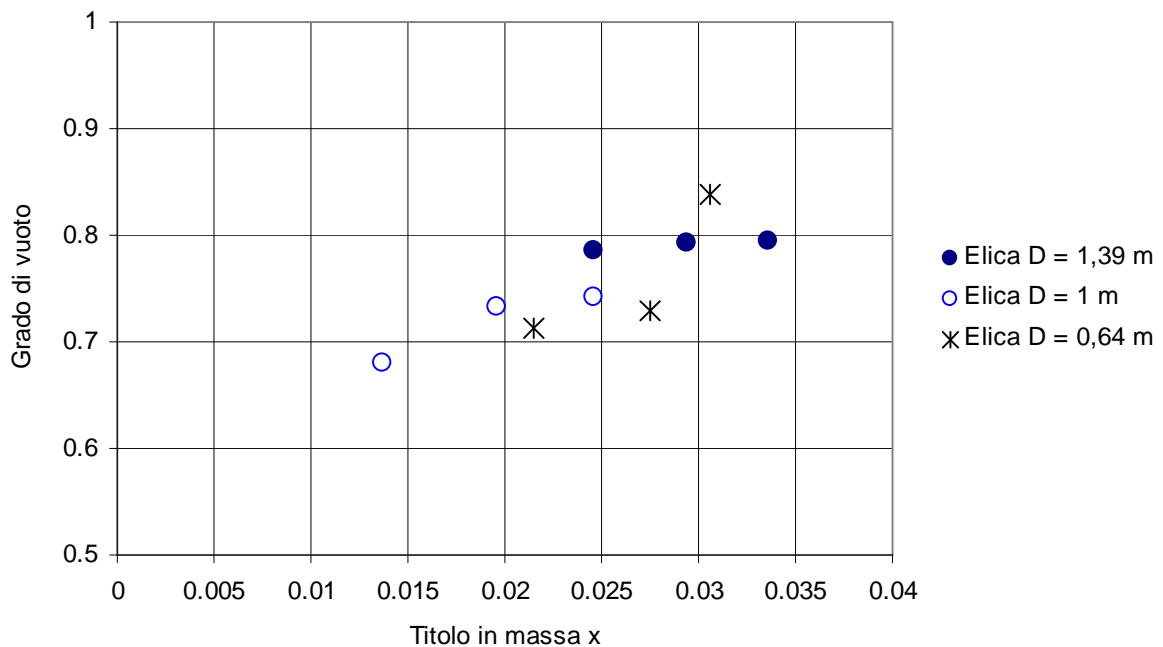


Figura 230: Grado di vuoto  $\alpha$  - titolo in massa  $x$ . (Portata W6) Circuito B. Prove II Caso 2.



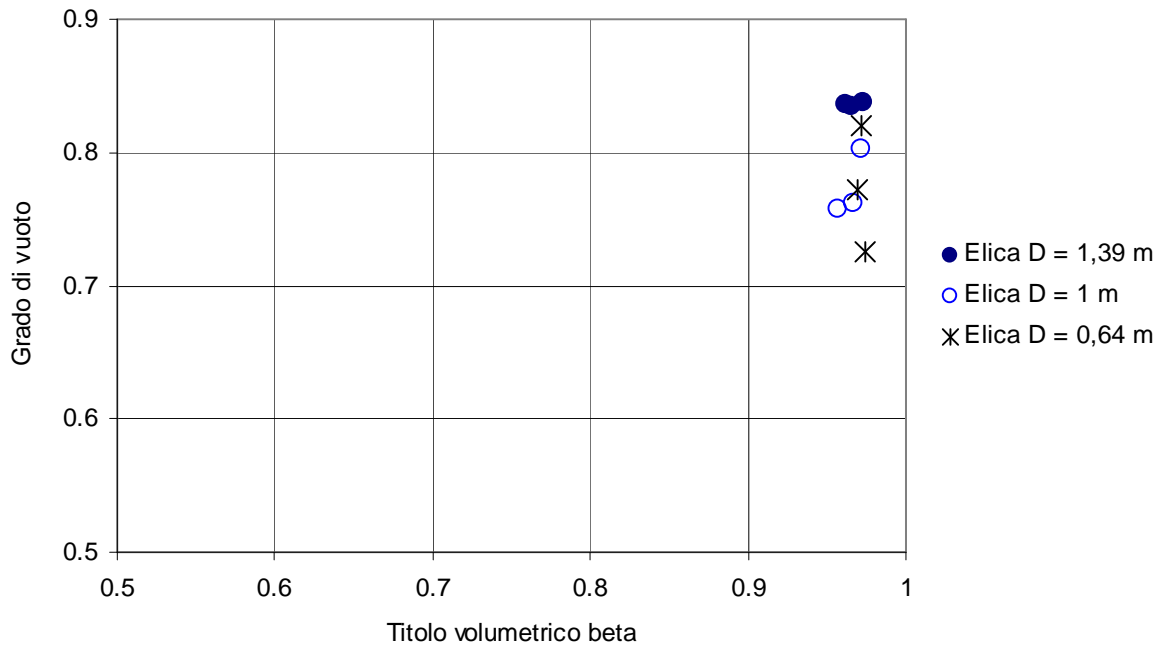


Figura 231: Grado di vuoto - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W5) Circuito B. Prove II Caso 2.

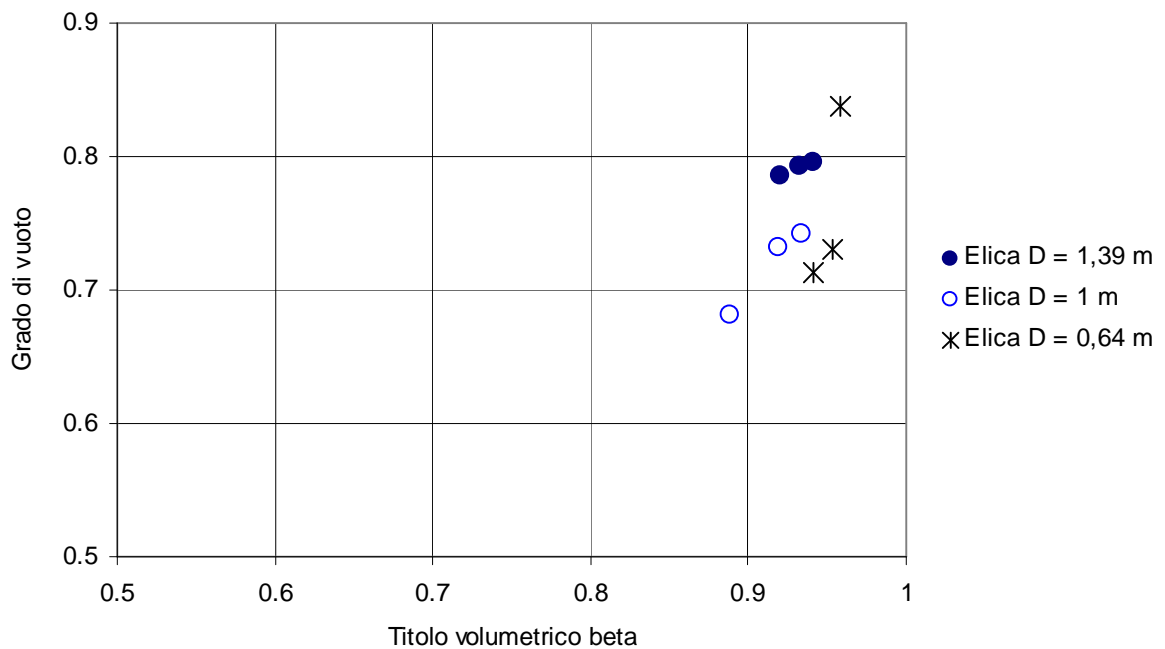


Figura 232: Grado di vuoto - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W6) Circuito B. Prove II Caso 2.

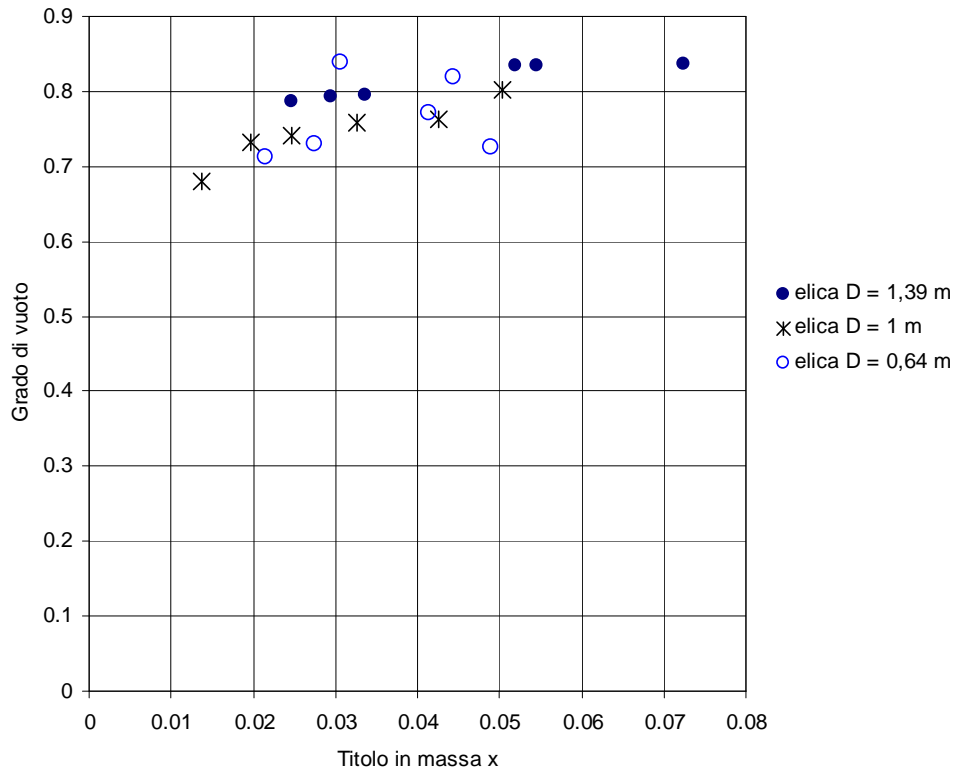


Figura 233: Grado di vuoto - titolo in massa x medio per le tre eliche. Circuito B. Prove II Caso 2.

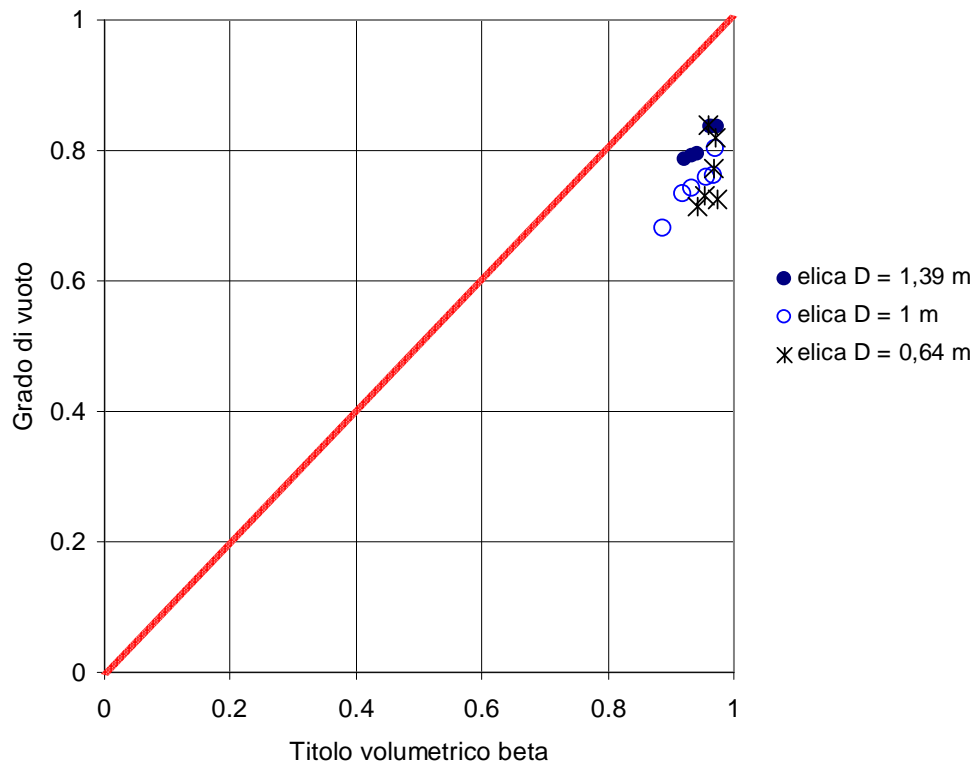


Figura 234: Grado di vuoto - titolo volumetrico per le tre eliche. Circuito B. Prove II Caso 2.

Il grado di vuoto risulta nettamente minore del titolo volumetrico e si ha quindi che lo *slip ratio*  $S$  è maggiore dell'unità per tutti i punti testati nel Caso 2, ciò implica che, anche per questa serie di misure, la fase gassosa percorre l'elica a velocità più elevata della fase liquida.

In Tabella 66 si riportano gli elevati valori di *slip ratio* ricavati per questa tipologia di prove.

| Portate d'acqua<br>totali | Valori <i>slip ratio</i><br>Elica D = 0,64 m | Valori <i>slip ratio</i><br>Elica D = 1 m | Valori <i>slip ratio</i><br>Elica D = 1,39 m |
|---------------------------|--|---|--|
| W5 = 112 g/s              | 14,17 – 9,34 – 7,43                          | 7,08 – 9,19 – 8,56                        | 5,58 – 4,97 – 6,99                           |
| W6 = 240 g/s              | 6,45 – 7,63 – 4,43                           | 3,72 – 4,12 – 4,86                        | 3,17 – 3,63 – 4,11                           |

**Tabella 66: Valori dello *slip ratio*. Circuito B Prove II Caso 2.**

### 7.3.5 Velocità media della miscela. Circuito B prove II.

- **Caso 1: Portate W1, W2, W3 e W4**

Si è calcolata la velocità media della miscela  $j$  come descritto in precedenza.

Anche per le prove II Caso 1 la velocità media della miscela cresce con continuità all'aumentare sia del titolo in massa  $x$  che del titolo volumetrico  $\beta$ , quindi all'aumentare della portata d'aria, all'aumentare della portata d'acqua.

In Tabella 67 sono riportati i valori di  $j$  calcolati per il Caso 1; questi valori sono elevati e sono confrontabili con quelli trovati per le prove di tipo I.

| Portate d'acqua<br>totali | Valori di $j$ [m/s]<br>Elica D = 0,64 m | Valori di $j$ [m/s]<br>Elica D = 1 m | Valori di $j$ [m/s]<br>Elica D = 1,39 m |
|---------------------------|---|--------------------------------------|---|
| W1 = 290 g/s              | 1,9 – 2,75 – 3,73                       | 2,96 – 4,15 – 5,48                   | 2,04 – 2,98 – 3,99                      |
| W2 = 560 g/s              | 1,88 – 2,64 – 3,4                       | 2,93 – 3,83 – 4,64                   | 1,65 – 2,25 – 2,8                       |
| W3 = 580 g/s              | 2,3 – 2,89 – 3,51                       | 3,83 – 4,7 – 5,58                    | 2,09 – 2,83 – 3,66                      |
| W4 = 530 g/s              | 2,12 – 2,93 – 3,68                      | 3,18 – 4,29 – 5,3                    | 1,73 – 2,48 – 3,2                       |

**Tabella 67: Valori della velocità media della miscela  $j$ ; Circuito B Prove II Caso 1.**

Nelle pagine seguenti sono riportati, da Figura 235 a Figura 242, i diagrammi della velocità media della miscela in funzione del titolo in massa e del titolo volumetrico.

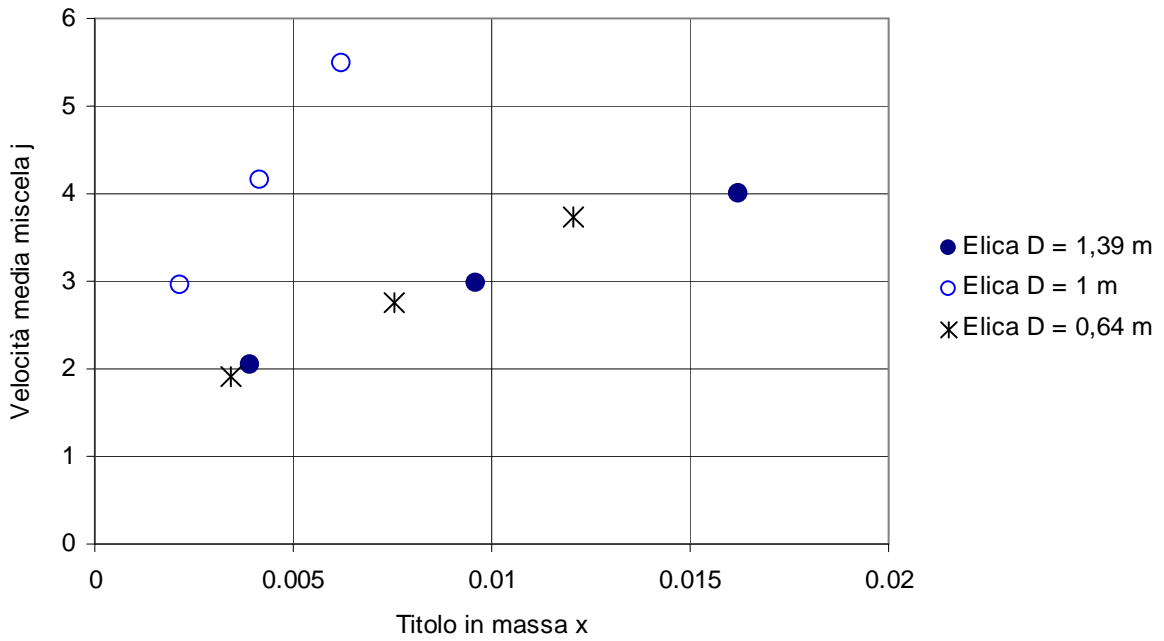


Figura 235: Velocità della miscela - titolo in massa  $x$ . (Portata W1). Circuito B Prove II Caso 1.

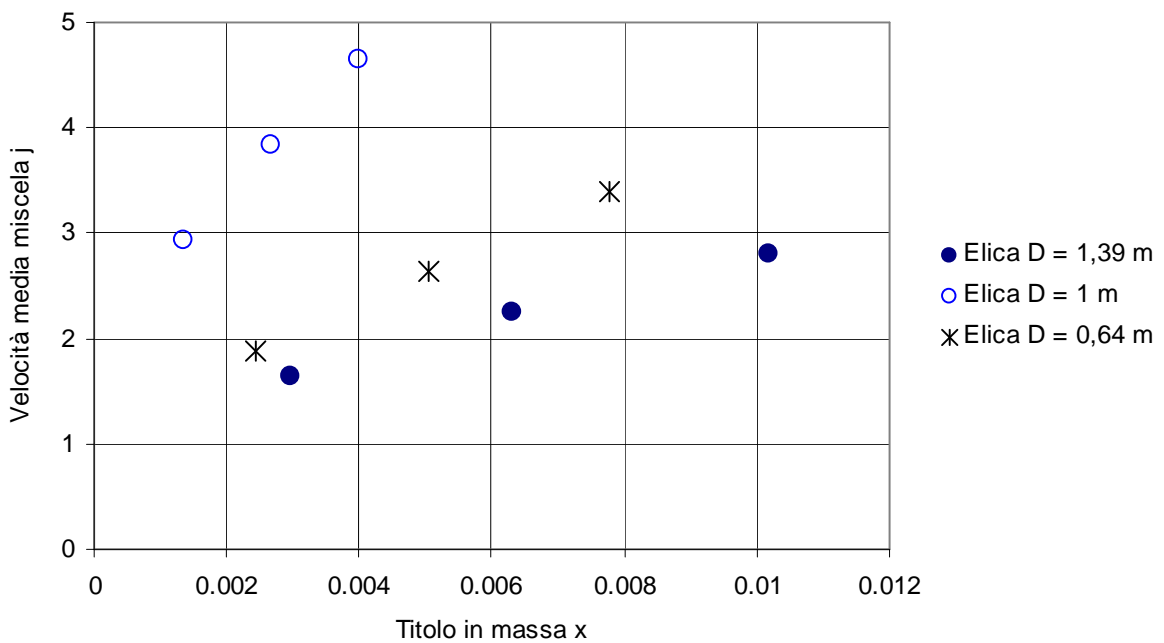


Figura 236: Velocità della miscela - titolo in massa  $x$ . (Portata W2). Circuito B Prove II Caso 1.

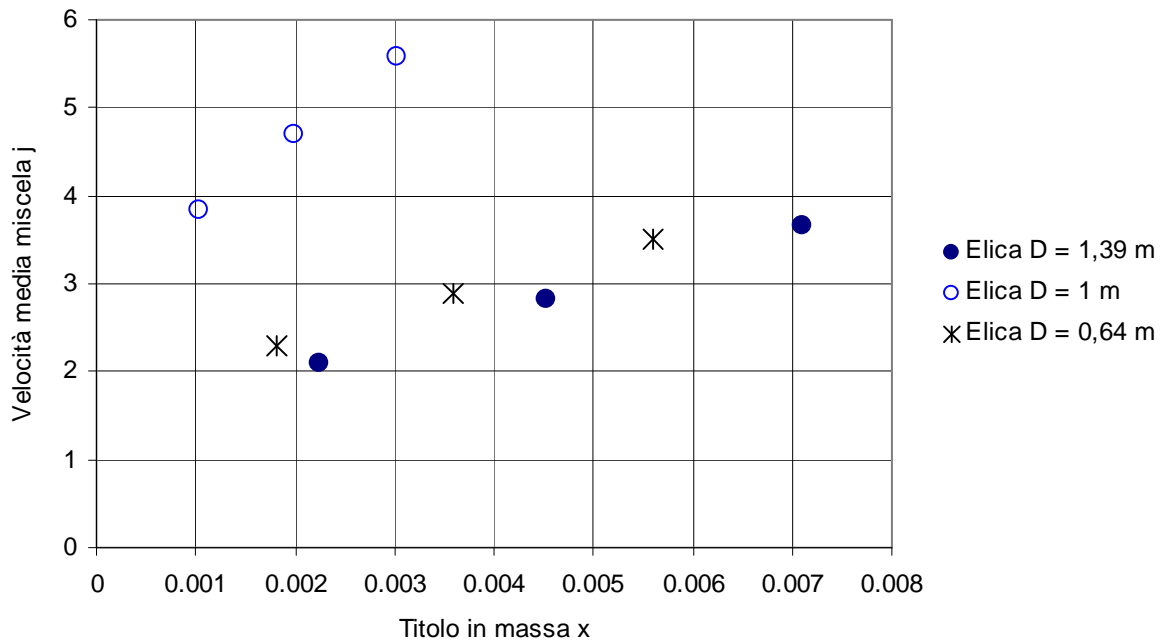


Figura 237: Velocità della miscela - titolo in massa x. (Portata W3). Circuito B Prove II Caso 1.

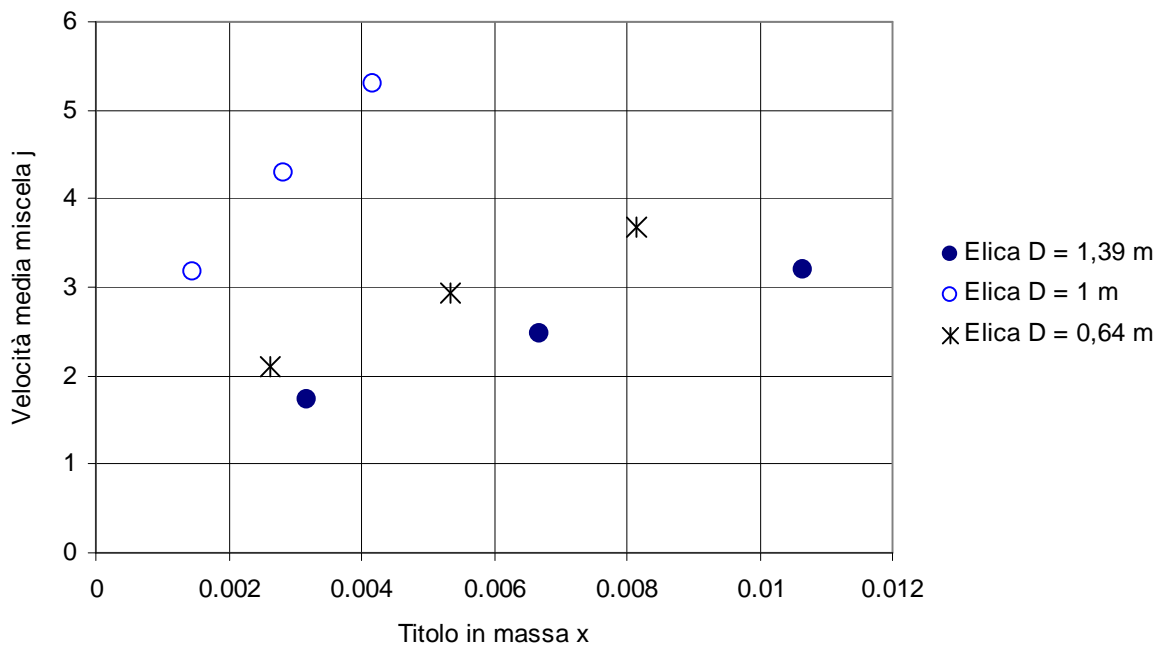


Figura 238: Velocità della miscela - titolo in massa x. (Portata W4). Circuito B Prove II Caso 1.

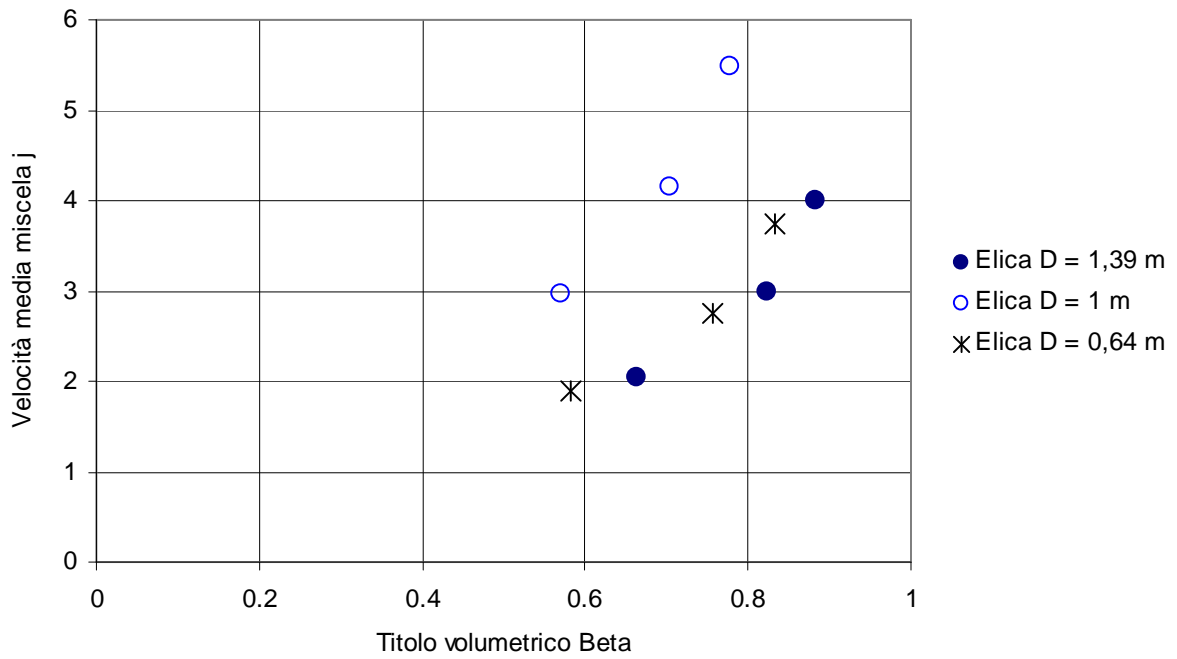


Figura 239: Velocità della miscela - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W1). Circuito B Prove II Caso 1.

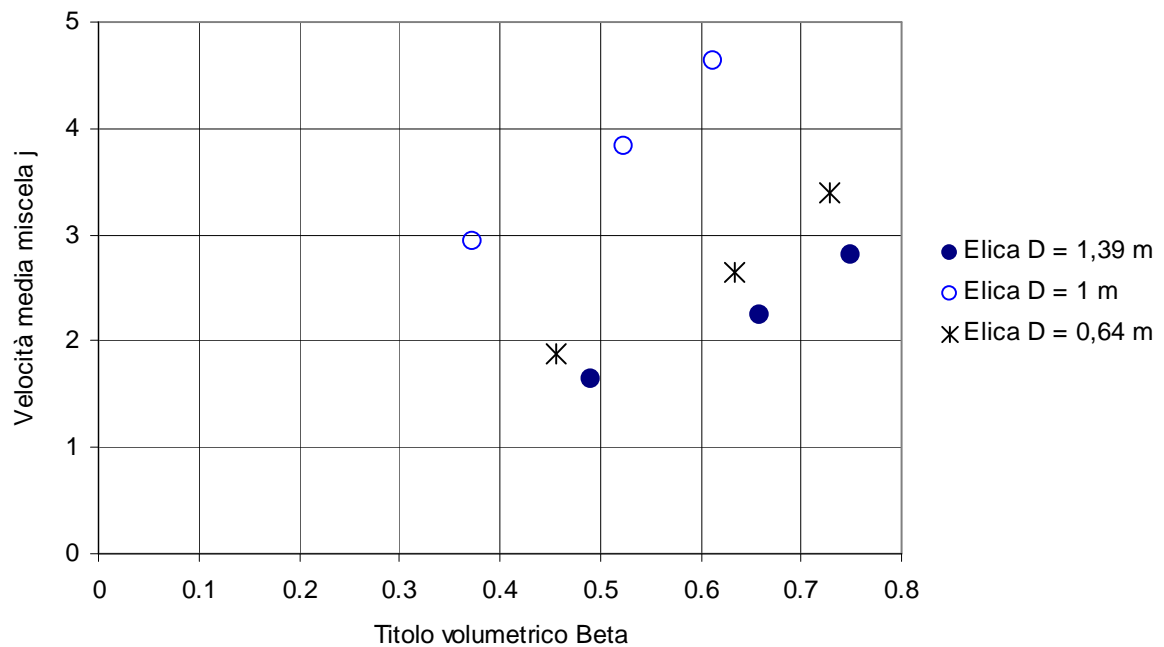


Figura 240: Velocità della miscela - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W2). Circuito B Prove II Caso 1.

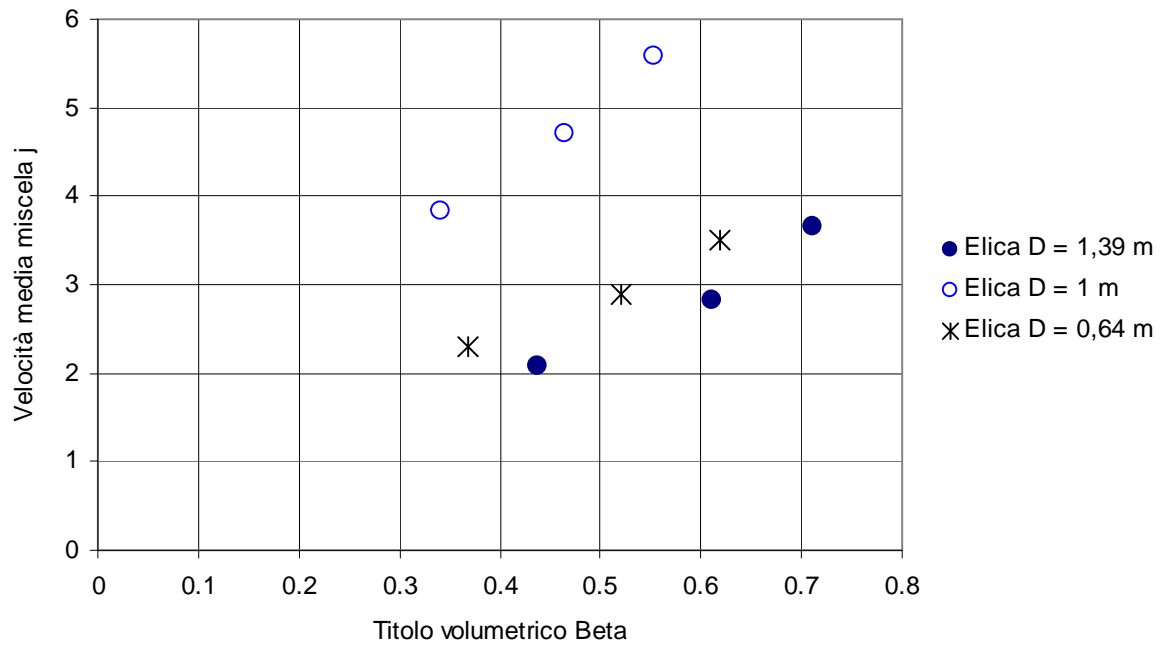


Figura 241: Velocità della miscela - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W3). Circuito B Prove II Caso 1.

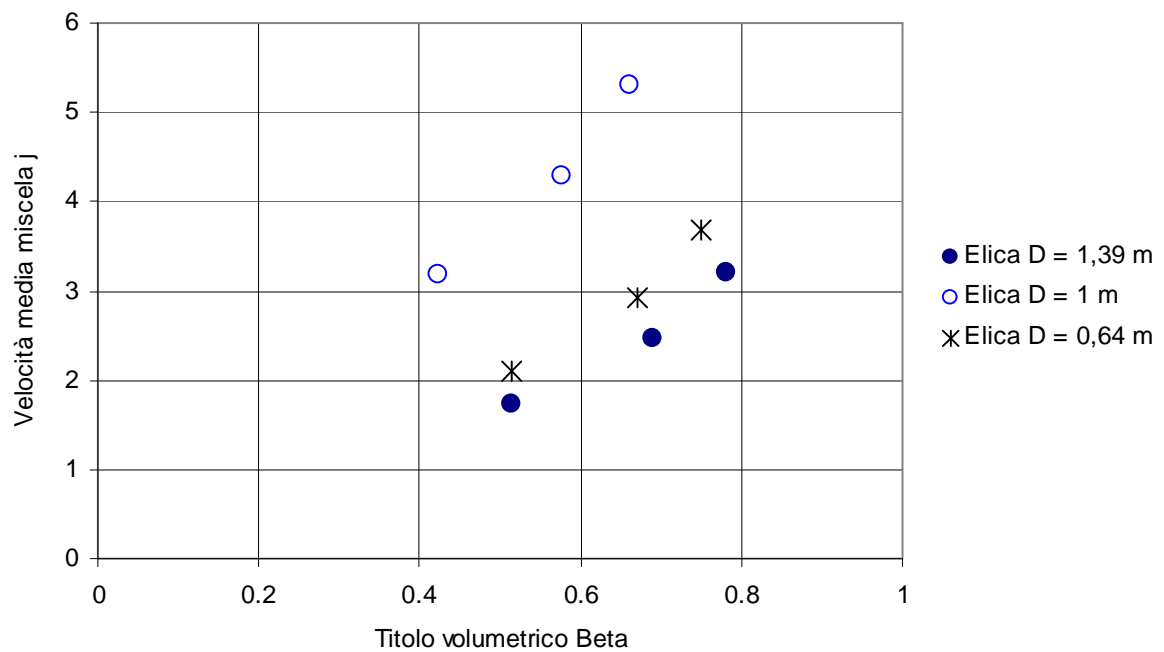


Figura 242: Velocità della miscela - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W4). Circuito B Prove II Caso 1.



• **Caso 2: Portate W5 e W6**

La velocità media della miscela  $j$  nelle sezioni di prova è dipendente dalla portata volumetrica totale, quindi dalle portate d'acqua nei rami di alimentazione delle eliche; questo implica che nel Caso 2 a causa della instabilità delle portate d'acqua nei rami i valori di  $j$  trovati sono solamente indicativi, per il titolo in massa  $x$  e il titolo volumetrico  $\beta$ .

L'andamento delle velocità media della miscela per le tre eliche è crescente all'aumentare sia del titolo in massa  $x$  che del titolo volumetrico  $\beta$  come per i casi precedentemente trattati. Nei diagrammi riportati in questo paragrafo (da Figura 243 a Figura 246) sono descritti gli andamenti di  $j$  in funzione del titolo in massa  $x$  e del titolo volumetrico  $\beta$ .

In Tabella 68 sono riportati i valori di  $j$  calcolati per il Caso 2.

| Portate d'acqua<br>totali | Valori di $j$ [m/s]<br>Elica D = 0,64 m | Valori di $j$ [m/s]<br>Elica D = 1 m | Valori di $j$ [m/s]<br>Elica D = 1,39 m |
|---------------------------|---|--------------------------------------|---|
| W5 = 112 g/s              | 10,13 – 12 – 14,06                      | 9,33 – 10,9 – 12,65                  | 6,86 – 7,65 – 8,84                      |
| W6 = 240 g/s              | 10,33 – 11,92 – 14                      | 8,6 – 9,56 – 10,94                   | 6,68 – 7,68 – 9                         |

**Tabella 68: Valori della velocità media della miscela  $j$ ; Circuito B Prove II Caso 2.**

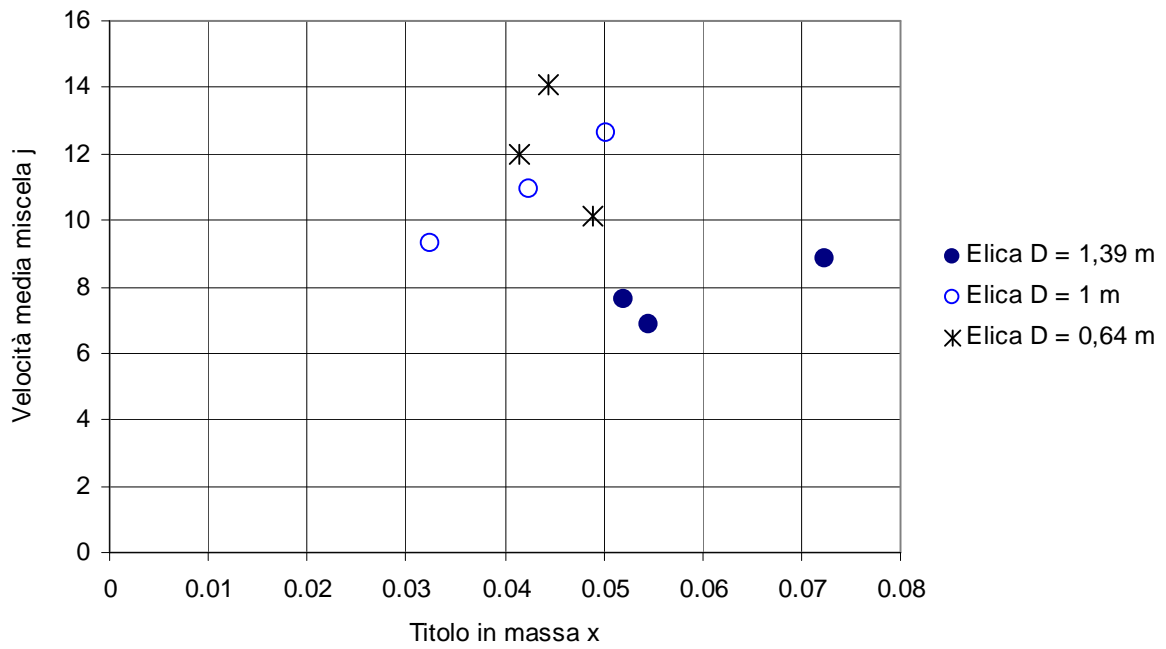


Figura 243: Velocità della miscela - titolo in massa  $x$ . (Portata W5). Circuito B Prove II Caso 2.

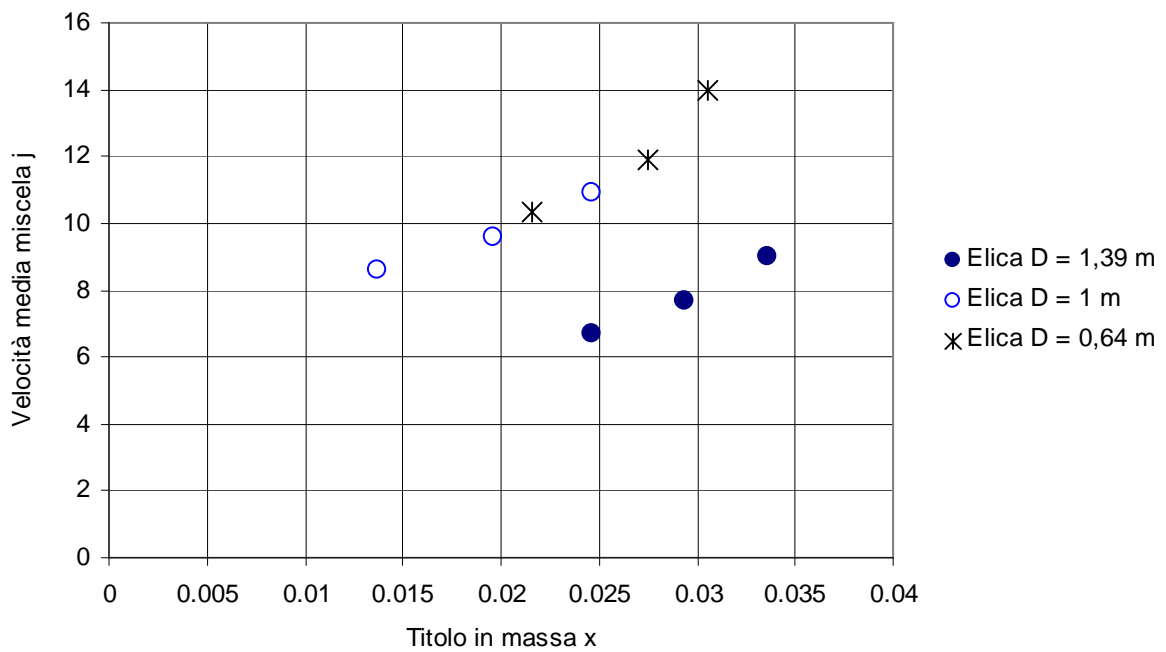


Figura 244: Velocità della miscela - titolo in massa  $x$ . (Portata W6). Circuito B Prove II Caso 2.

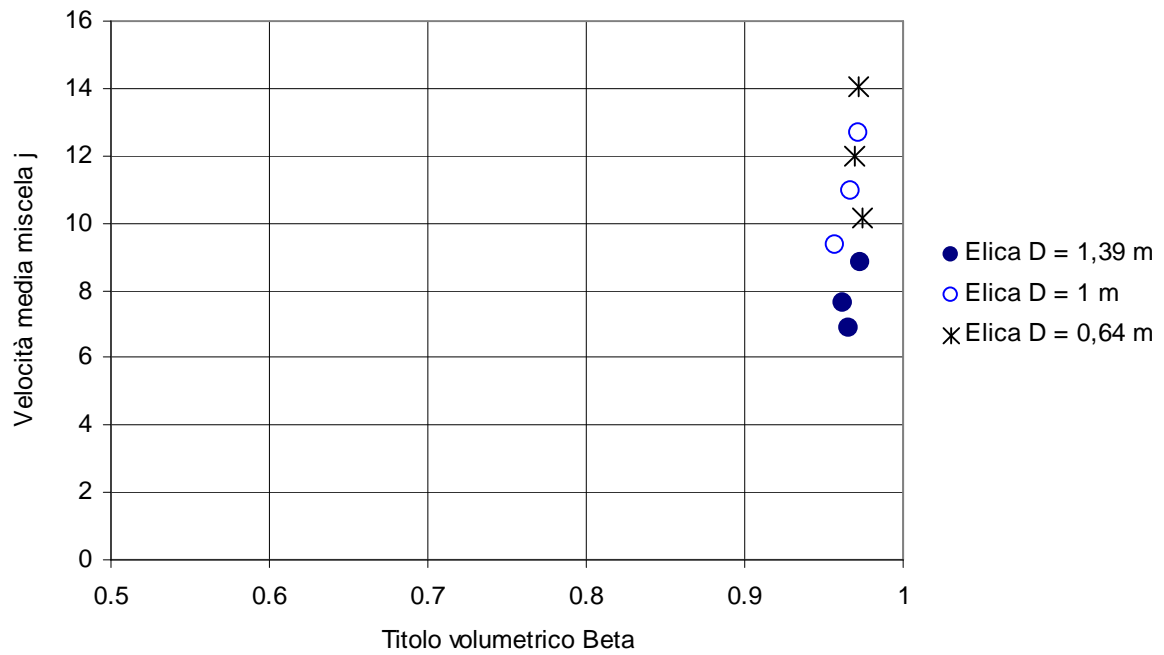


Figura 245: Velocità della miscela - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W5). Circuito B Prove II Caso 2.

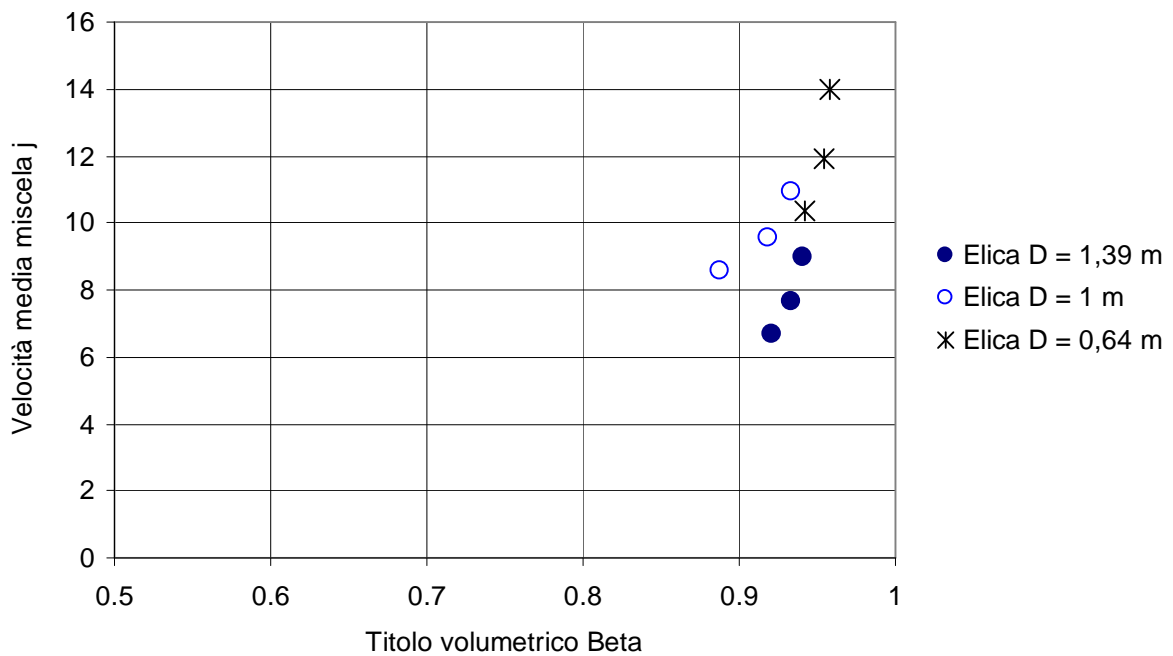


Figura 246: Velocità della miscela - titolo volumetrico  $\beta$ . (Portata W6). Circuito B Prove II Caso 2.

### 7.3.6 Parametro di Martinelli e moltiplicatori bifase per attrito. Circuito B prove II.

- **Caso 1: Portate W1, W2, W3 e W4**

Si è valutato il parametro di Martinelli nelle condizioni sperimentali e il moltiplicatore bifase per attrito con le formulazioni utilizzate in precedenza.

Si sono confrontati i risultati ottenuti dall'analisi delle prove effettuate con questa metodologia con le formulazioni presenti in letteratura per il calcolo del fattore di moltiplicazione bifase per tubi dritti.

Si riportano da Figura 247 a Figura 258 gli andamenti del moltiplicatore bifase per attrito in funzione del parametro di Martinelli per le tre sezioni di prova al variare della portata d'acqua totale presa in esame (Caso 1).

- **Portata W1**

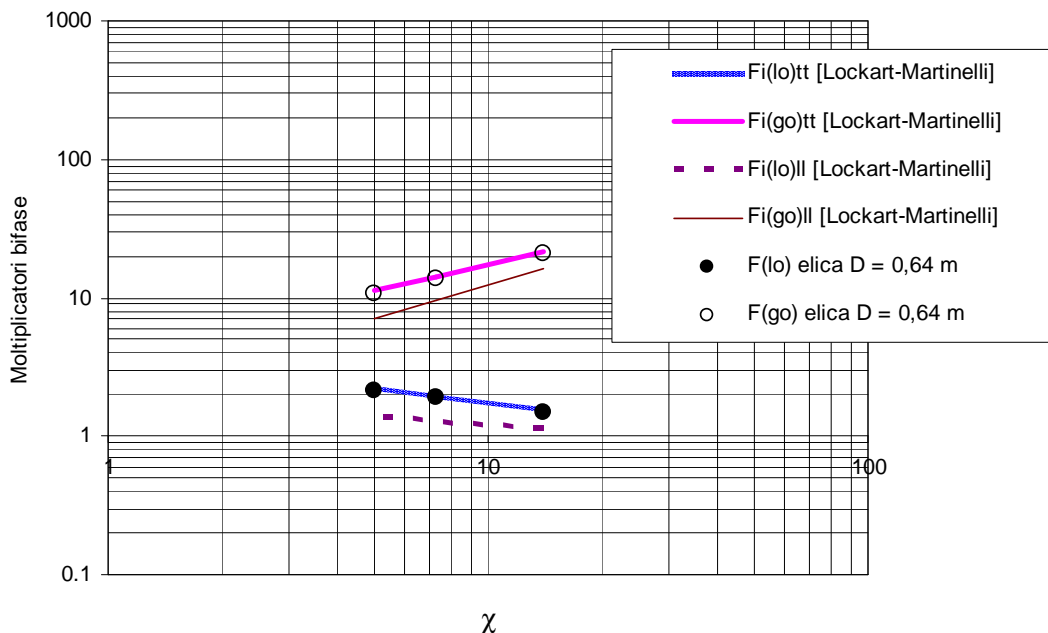
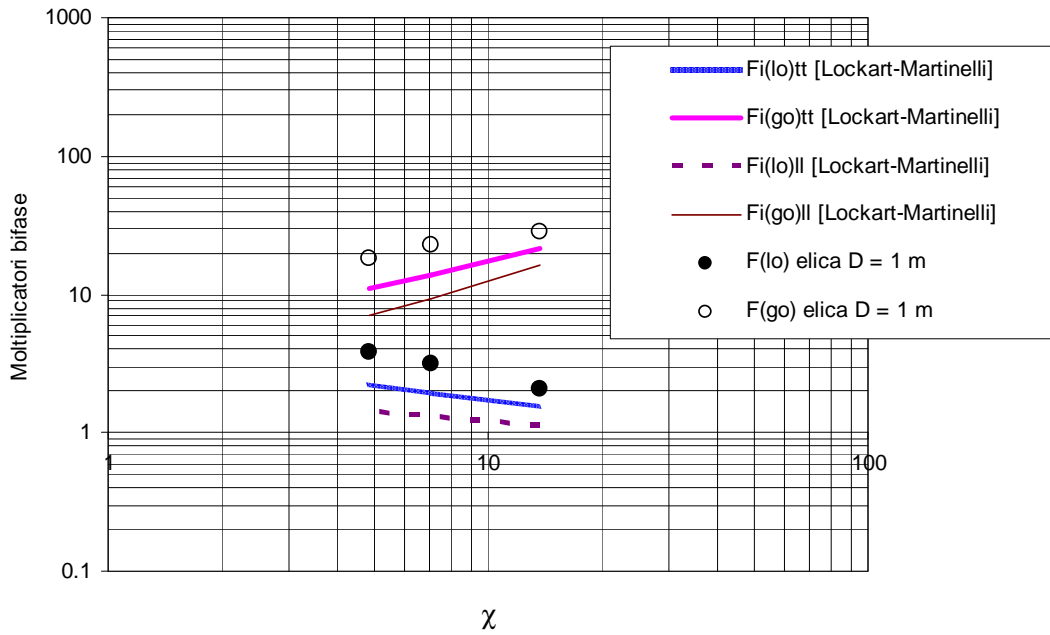
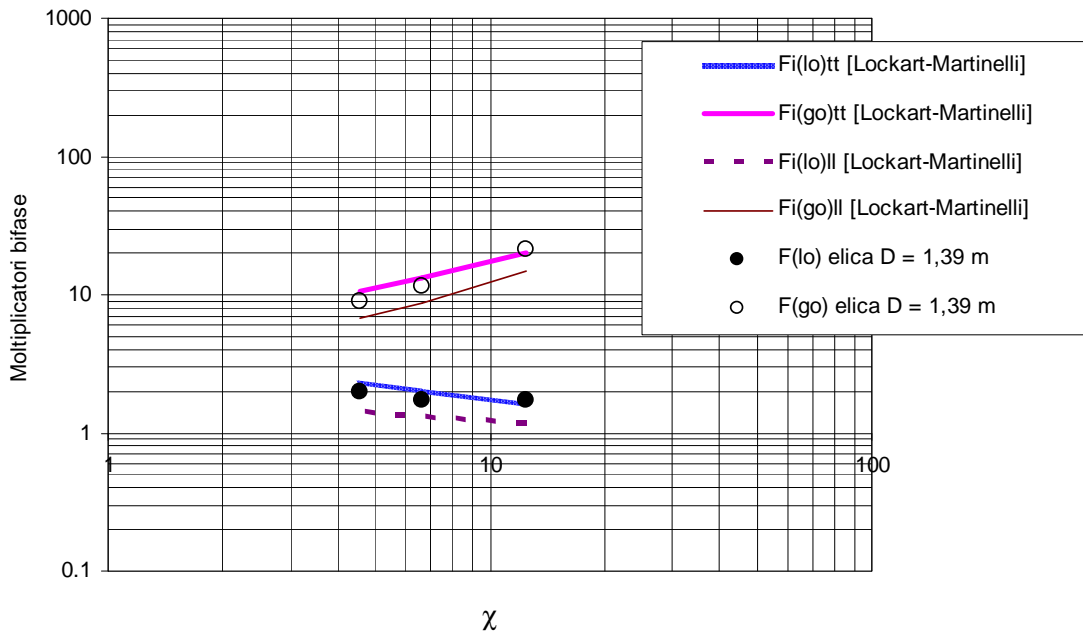


Figura 247: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 0,64$  m  
Circuito B Prove II Caso 1.



**Figura 248: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1$  m  
Circuito B Prove II Caso 1.**



**Figura 249: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1,39$  m  
Circuito B Prove II Caso 1.**

• Portata W2

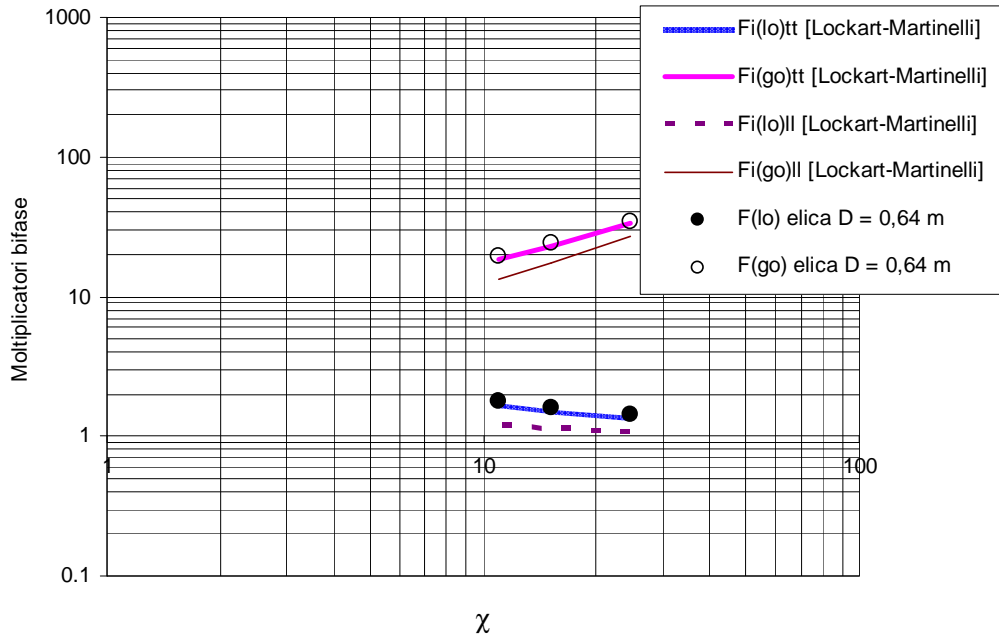


Figura 250: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 0,64$  m  
Circuito B Prove II Caso 1.

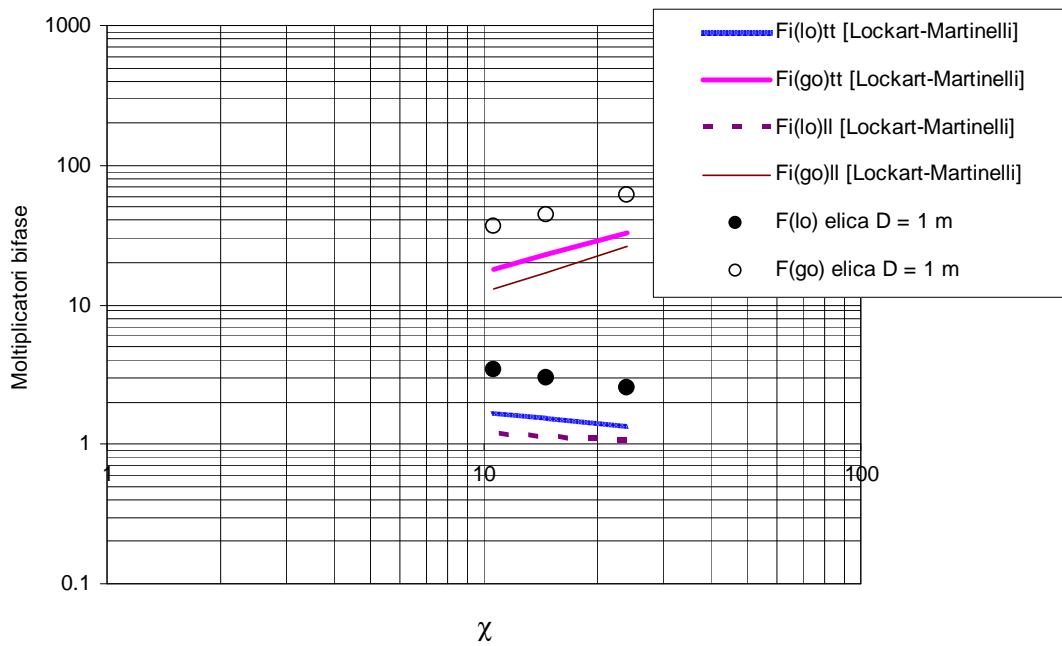


Figura 251: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1$  m  
Circuito B Prove II Caso 1.

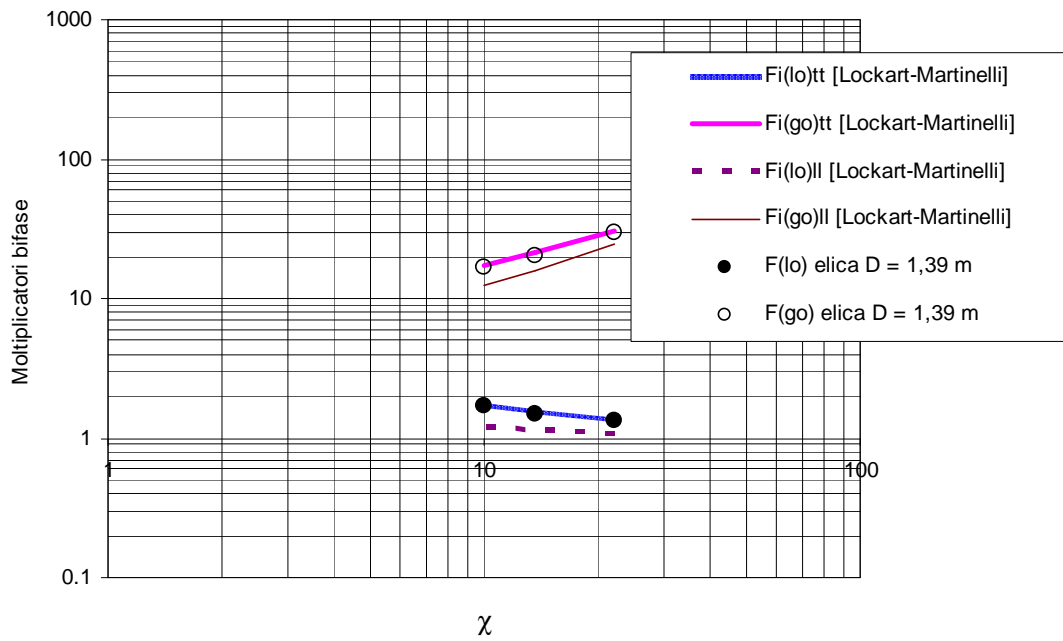


Figura 252: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica D = 1,39 m  
Circuito B Prove II Caso 1.

- Portata W3

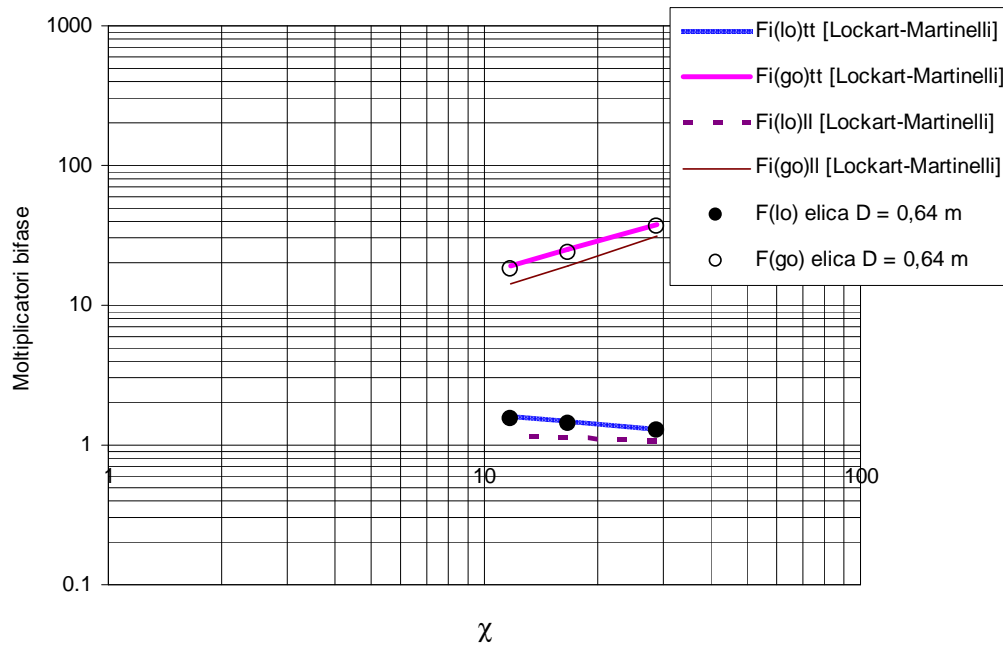


Figura 253: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica D = 0,64 m  
Circuito B Prove II Caso 1.

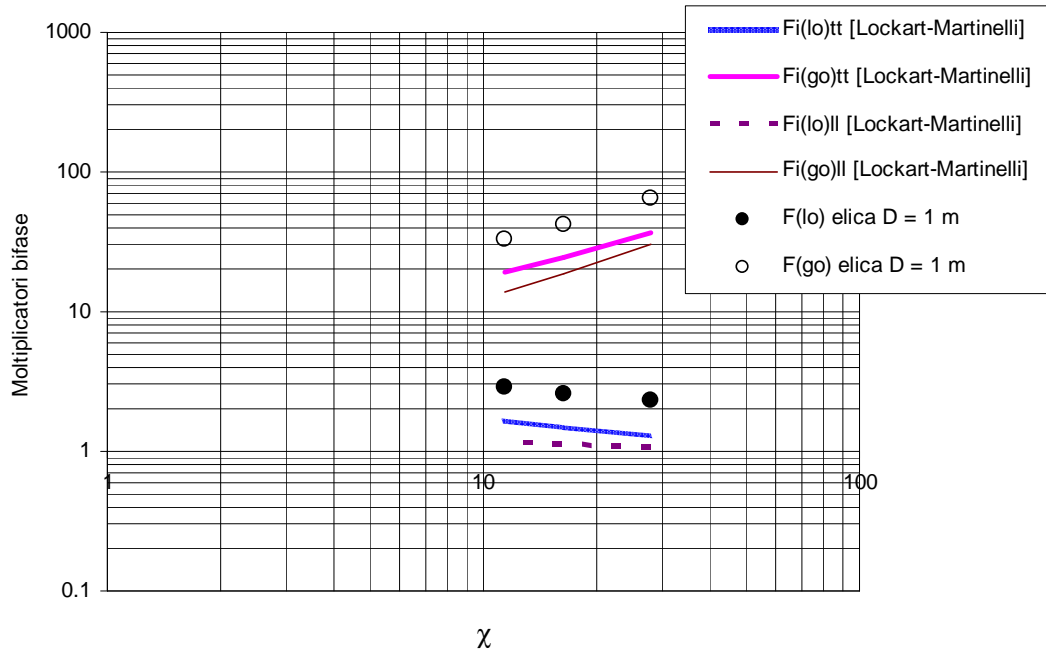


Figura 254: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1$  m  
Circuito B Prove II Caso 1.

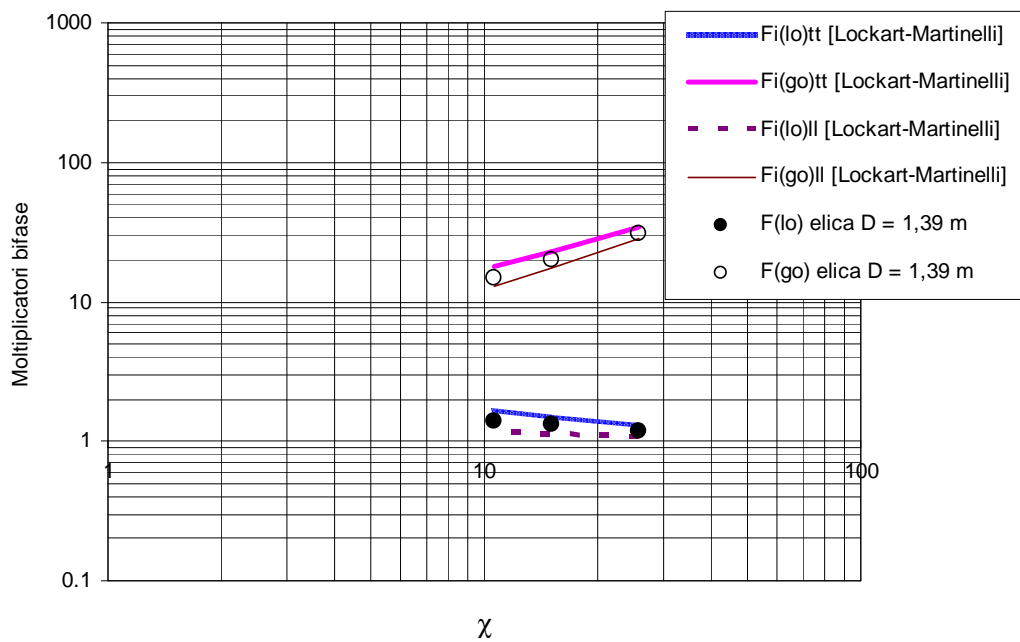


Figura 255: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1,39$  m  
Circuito B Prove II Caso 1.



• Portata W4

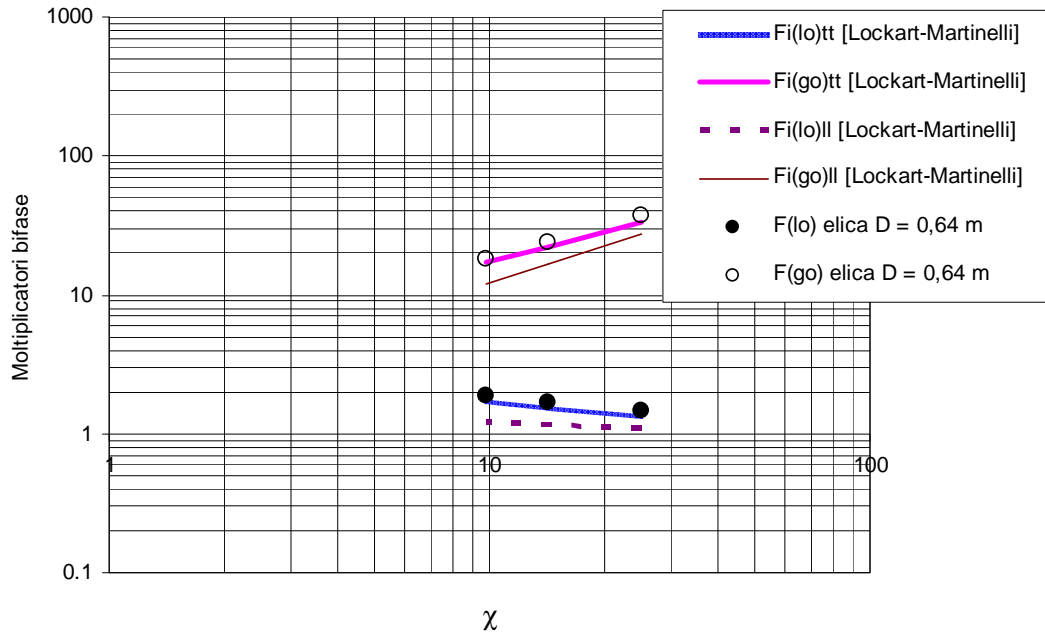


Figura 256: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 0,64$  m  
Circuito B Prove II Caso 1.

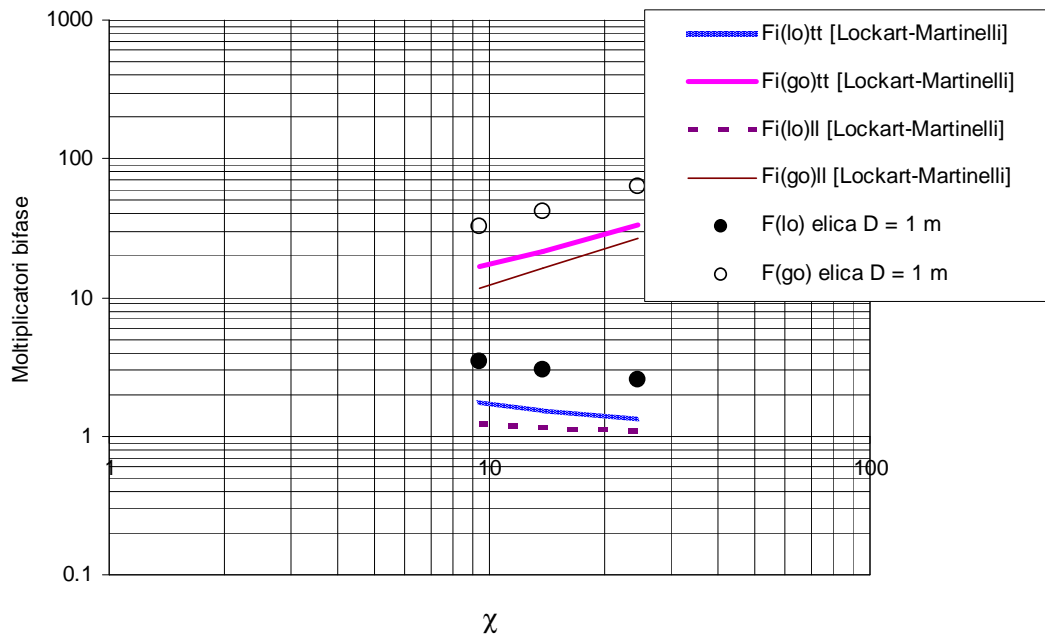
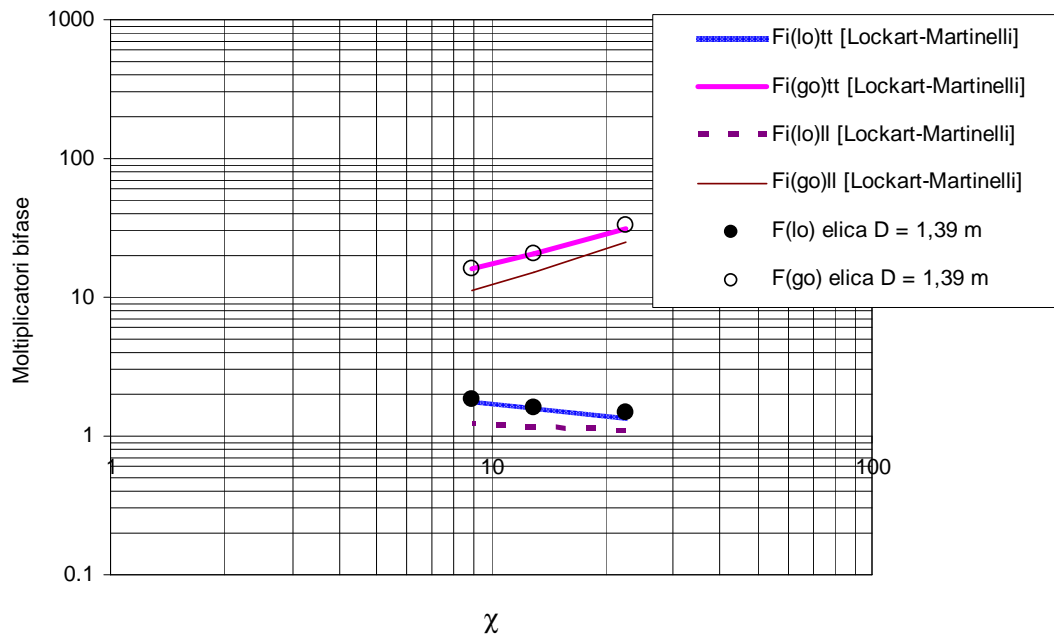


Figura 257: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1$  m  
Circuito B Prove II Caso 1.



**Figura 258: Risultati sperimentali e modello di Lockhart-Martinelli. Elica  $D = 1,39$  m  
Circuito B Prove II Caso 1.**

Anche per questa campagna di prove si riscontra un buon accordo tra le previsioni delle correlazioni per moto turbolento ed i risultati sperimentali, per quanto riguarda le eliche di diametro 1,39 m e 0,64 m, mentre per l'elica di diametro 1 m i moltiplicatori bifase per attrito sperimentali sono molto maggiori dei valori previsti dal modello.

Si è proceduto al confronto tra i risultati sperimentali e le previsioni del modello di Lockhart - Martinelli le cui formule sono già state riportate nel paragrafo 1.2.6, utilizzando i valori del parametro  $C$  già adottati nelle precedenti analisi.

In Figura 259 e Figura 260 sono riportate le previsioni del modello utilizzando i diversi parametri  $C$  ed i risultati dell'analisi sperimentale; i valori dei moltiplicatori bifase per attrito delle eliche di diametro pari a 1,39 m e 0,64 m, sia per la fase gassosa che per la fase liquida, possono essere stimati utilizzando il modello di Lockhart-Martinelli con un coefficiente  $C$  che varia tra 10,64 e 35 a seconda della prova effettuata. Per quanto concerne, invece, l'elica di diametro pari a 1 m il modello non riesce a prevedere i valori dei moltiplicatori bifase per attrito per nessun coefficiente  $C$  nel campo utilizzato.

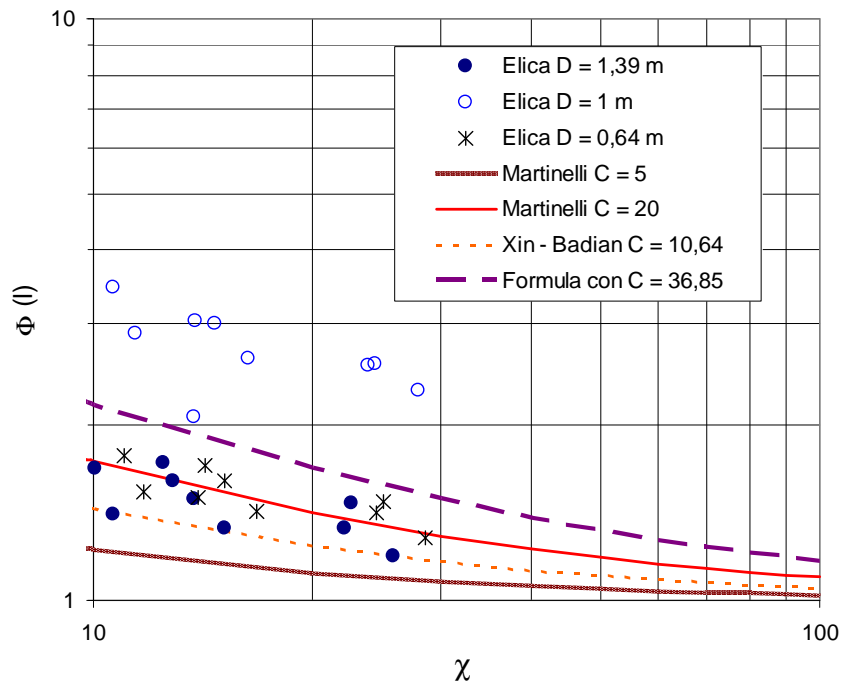


Figura 259: Confronto globale tra moltiplicatore bifase per attrito fase liquida sperimentale e modello di Lockhart-Martinelli con parametri  $C$  diversi. Circuito B Prova II Caso 1.

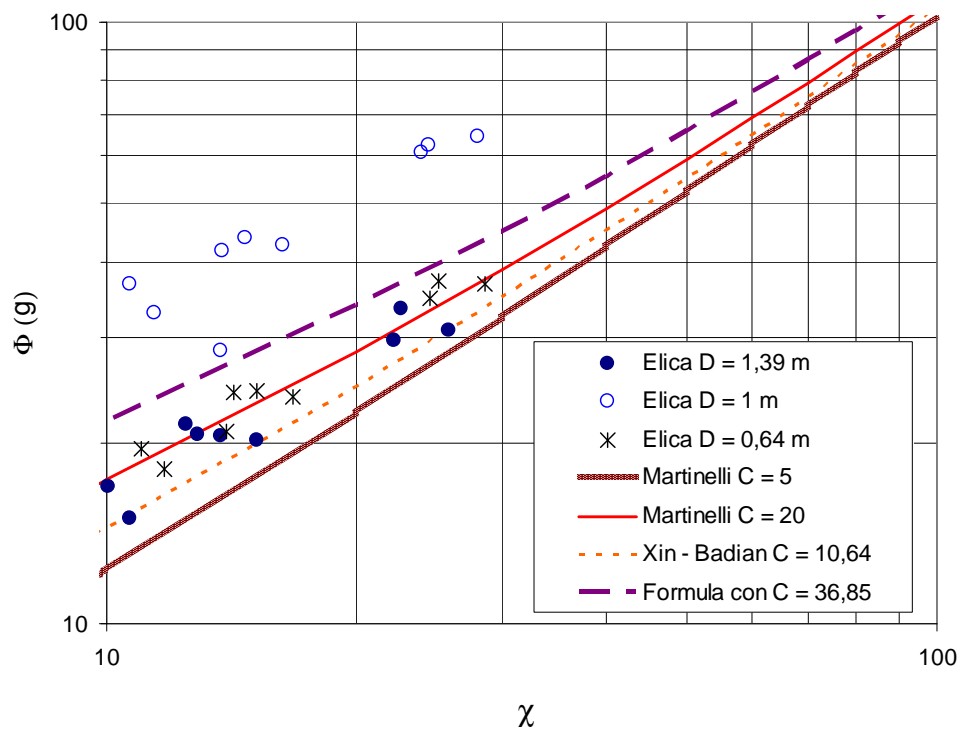


Figura 260: Confronto globale tra moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa sperimentale e modello di Lockhart-Martinelli con parametri  $C$  diversi. Circuito B Prova II Caso 1.

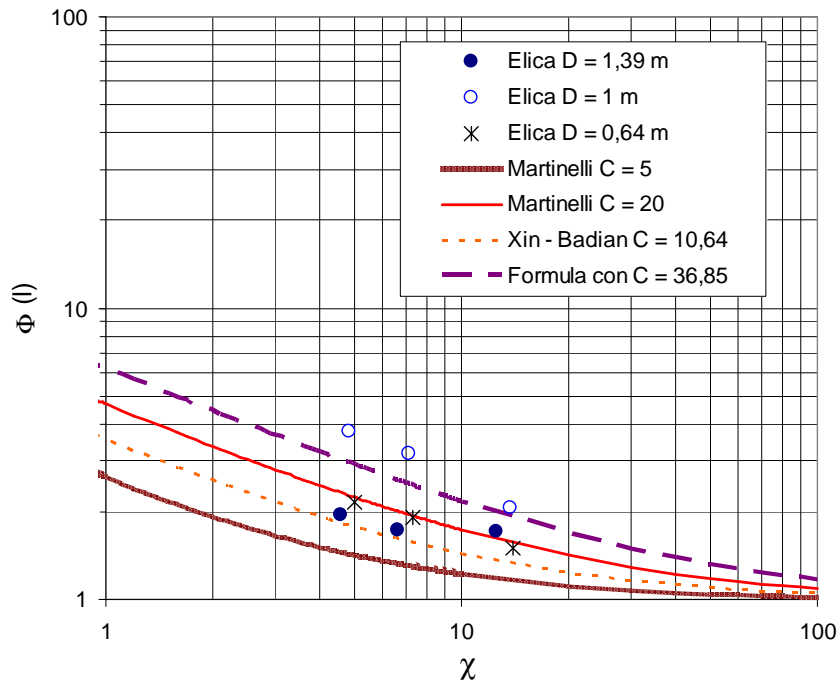


Figura 261: Moltiplicatore bifase per attrito fase liquida e curve con parametro  $C$  diversi. (W1)  
Circuito B Prova II Caso 1.

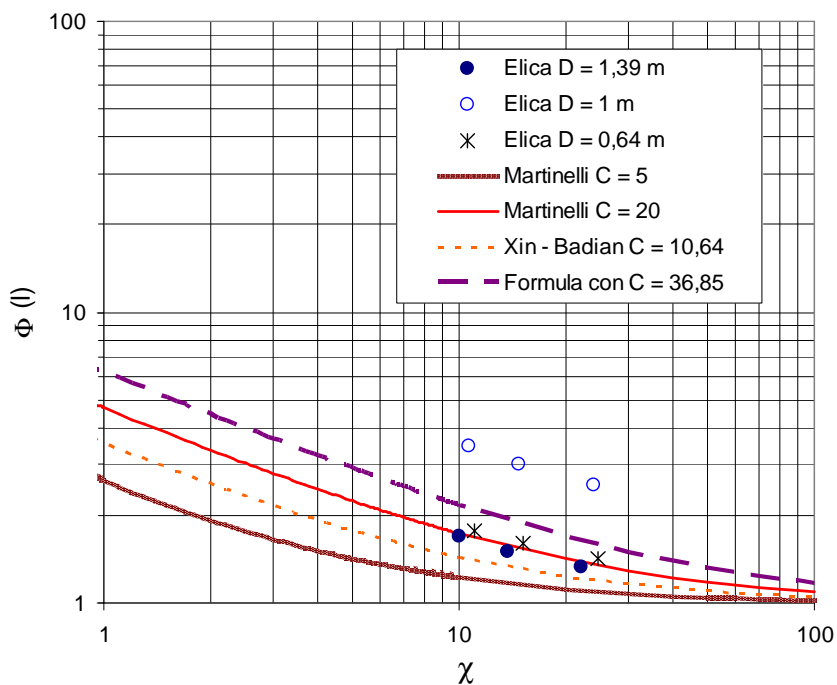


Figura 262: Moltiplicatore bifase per attrito fase liquida e curve con parametro  $C$  diversi. (W2)  
Circuito B Prova II Caso 1.

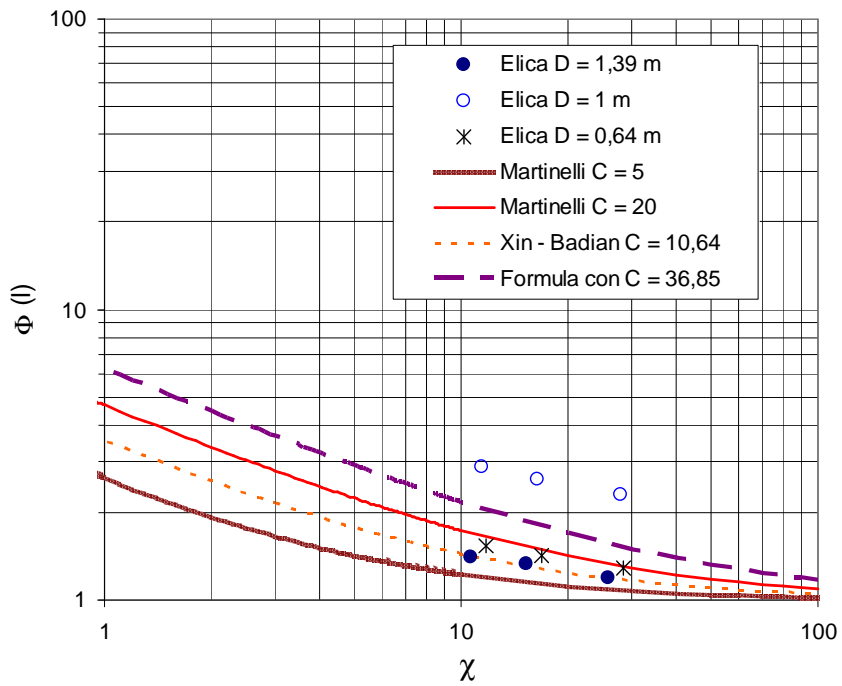


Figura 263: Moltiplicatore bifase per attrito fase liquida e curve con parametro  $C$  diversi. (W3)  
Circuito B Prova II Caso 1.

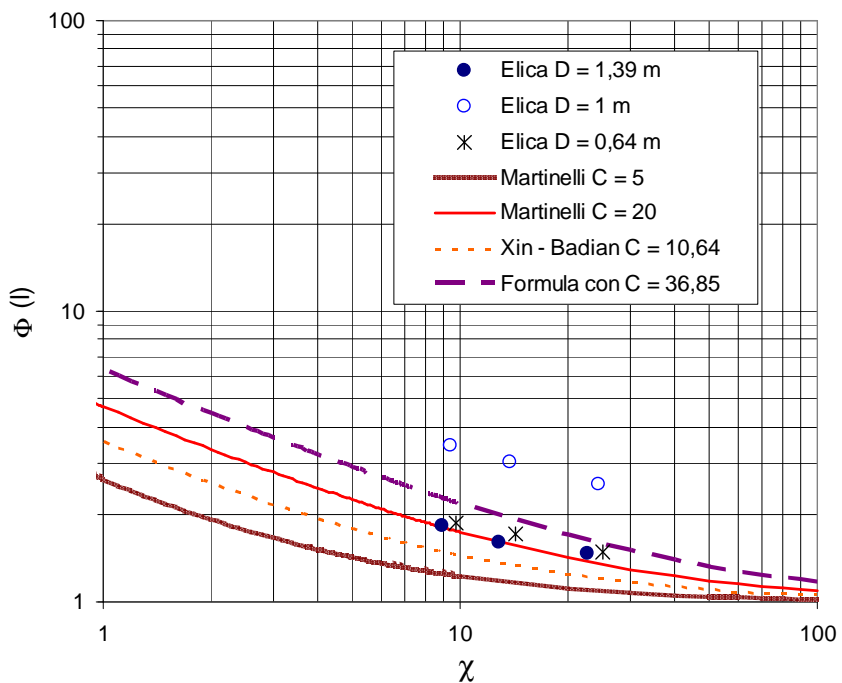


Figura 264: Moltiplicatore bifase per attrito fase liquida e curve con parametro  $C$  diversi. (W4)  
Circuito B Prova II Caso 1.

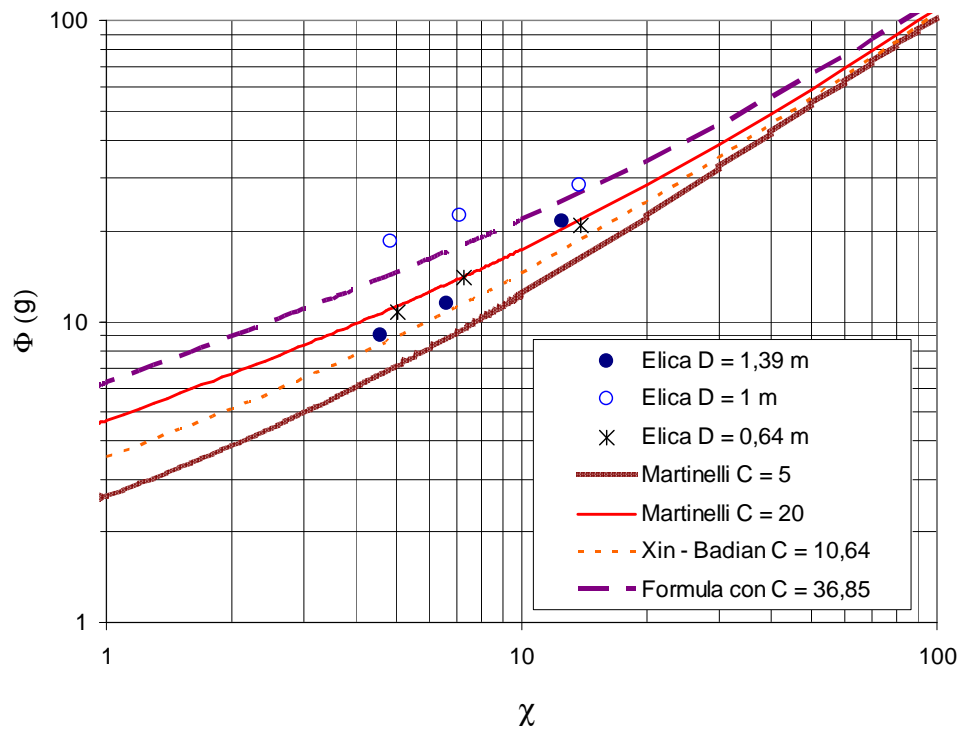


Figura 265: Moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa e curve con parametro  $C$  diversi.(W1)  
Circuito B Prova II Caso 1.

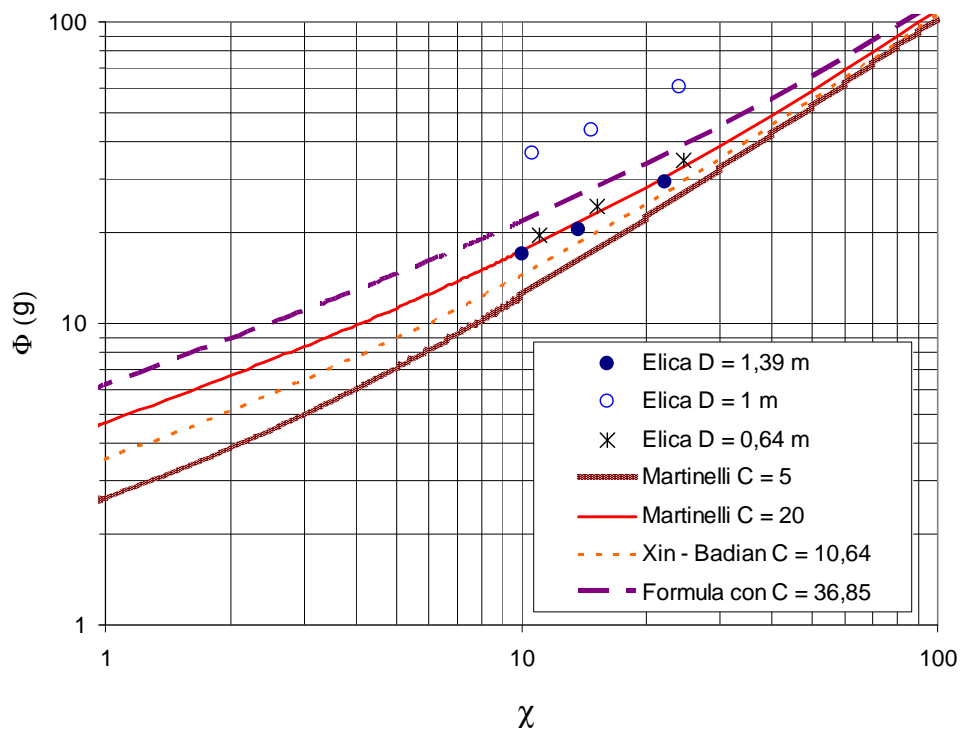


Figura 266: Moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa e curve con parametro  $C$  diversi.(W2)  
Circuito B Prova II Caso 1.

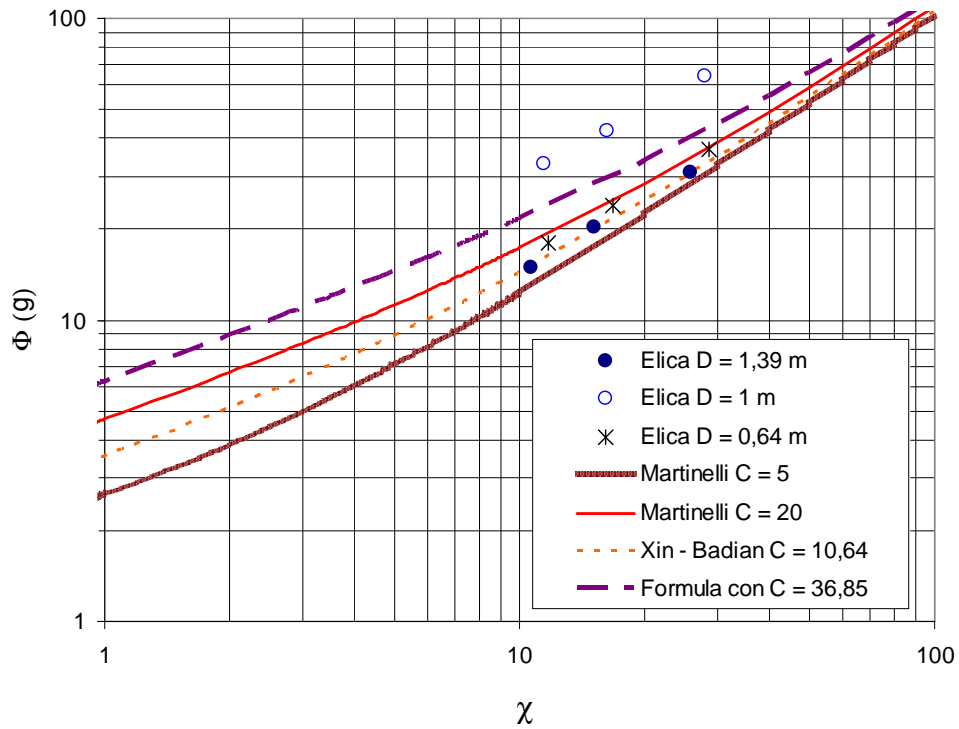


Figura 267: Moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa e curve con parametro C diversi.(W3)  
Circuito B Prova II Caso 1.

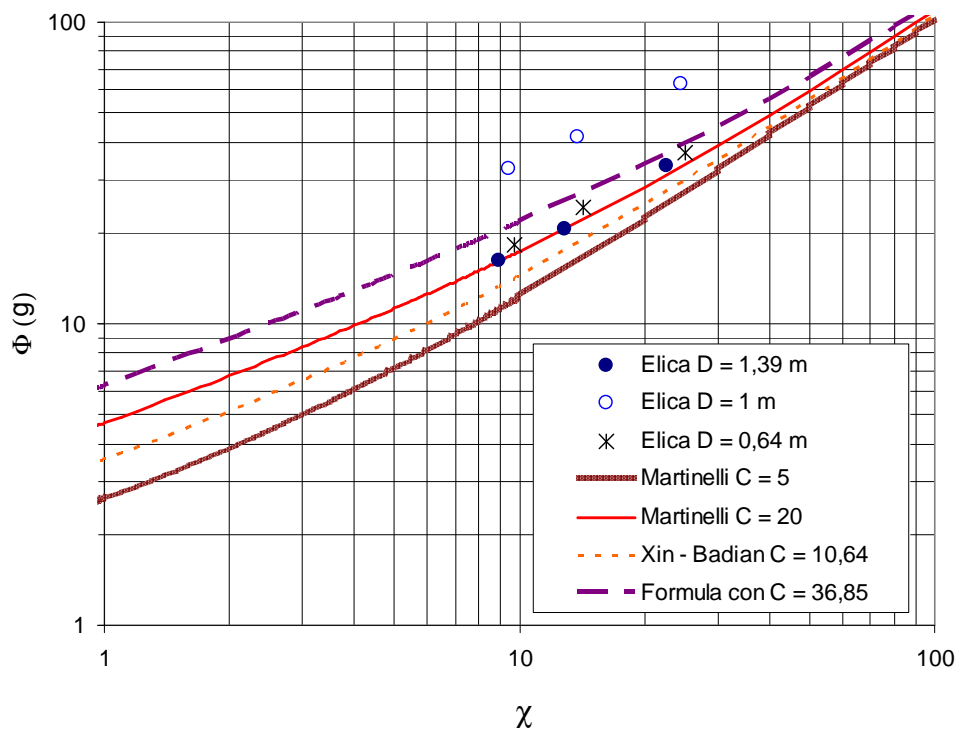


Figura 268: Moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa e curve con parametro C diversi.(W4)  
Circuito B Prova II Caso 1.

Nei diagrammi precedenti, da Figura 261 a Figura 268, è evidenziato, per ogni portata totale d'acqua testata, il confronto tra i risultati dell'analisi sperimentale e il modello di Lockhart - Martinelli utilizzando i diversi valori del coefficiente  $C$  presi in esame.

Si riporta una tabella riassuntiva dei coefficienti  $C$  per i quali il modello di Lockhart - Martinelli approssima meglio i moltiplicatori bifase per attrito sperimentali per ogni condizione sperimentale (Tabella 69).

| Portate d'acqua<br>totali | Elica D = 1,39 m |                | Elica D = 1m |          | Elica D = 0,64 m |                |
|---------------------------|------------------|----------------|--------------|----------|------------------|----------------|
|                           | $\Phi_l$         | $\Phi_g$       | $\Phi_l$     | $\Phi_g$ | $\Phi_l$         | $\Phi_g$       |
| W1 = 290 g/s              | $10 < C < 20$    | $10 < C < 20$  | $C > 37$     | $C > 37$ | $C \approx 20$   | $C \approx 20$ |
| W2 = 560 g/s              | $C \approx 20$   | $C \approx 20$ | $C > 37$     | $C > 37$ | $C \approx 20$   | $C \approx 20$ |
| W3 = 580 g/s              | $C = 10,64$      | $C = 10,64$    | $C > 37$     | $C > 37$ | $10 < C < 20$    | $10 < C < 20$  |
| W4 = 530 g/s              | $C \approx 20$   | $C \approx 20$ | $C > 37$     | $C > 37$ | $20 < C < 37$    | $20 < C < 37$  |

**Tabella 69: Coefficienti  $C$  modello Lockhart-Martinelli per approssimare i risultati sperimentali. Circuito B Prova II Caso 1.**



• **Caso 2: Portate W5 e W6**

Anche per il Caso 2 si è valutato il paramento di Martinelli nelle condizioni sperimentali e si sono confrontati i valori del moltiplicatore bifase per attrito previsti con il modello di Lockhart-Martinelli utilizzando i valori del coefficiente  $C$  usati in precedenza.

Sono riportati, da Figura 269 a Figura 274, le previsioni del modello utilizzando i diversi parametri  $C$  ed i risultati dell'analisi sperimentale. Il valore dei moltiplicatori bifase per attrito per l'elica di diametro pari a 1 m non può essere stimato con l'utilizzo del modello utilizzato per nessun coefficiente  $C$  considerato. Per le altre due sezioni di prova l'attendibilità delle previsioni è subordinata alla portata d'acqua presa in esame: in Tabella 70 si illustrano puntualmente i risultati trovati.

| Portate d'acqua<br>totali | Elica D = 1,39 m |          | Elica D = 1m |          | Elica D = 0,64 m |          |
|---------------------------|------------------|----------|--------------|----------|------------------|----------|
|                           | $\Phi_l$         | $\Phi_g$ | $\Phi_l$     | $\Phi_g$ | $\Phi_l$         | $\Phi_g$ |
| W1 = 112 g/s              | 10<C<20          | 10<C<20  | C < 5        | C < 5    | 10<C<37          | 10<C<37  |
| W2 = 240 g/s              | C < 5            | C < 5    | C < 5        | C < 5    | C ≈ 5            | C ≈ 5    |

**Tabella 70: Coefficienti  $C$  modello Lockhart-Martinelli per approssimare i risultati sperimentali. Circuito B Prova II Caso 2.**

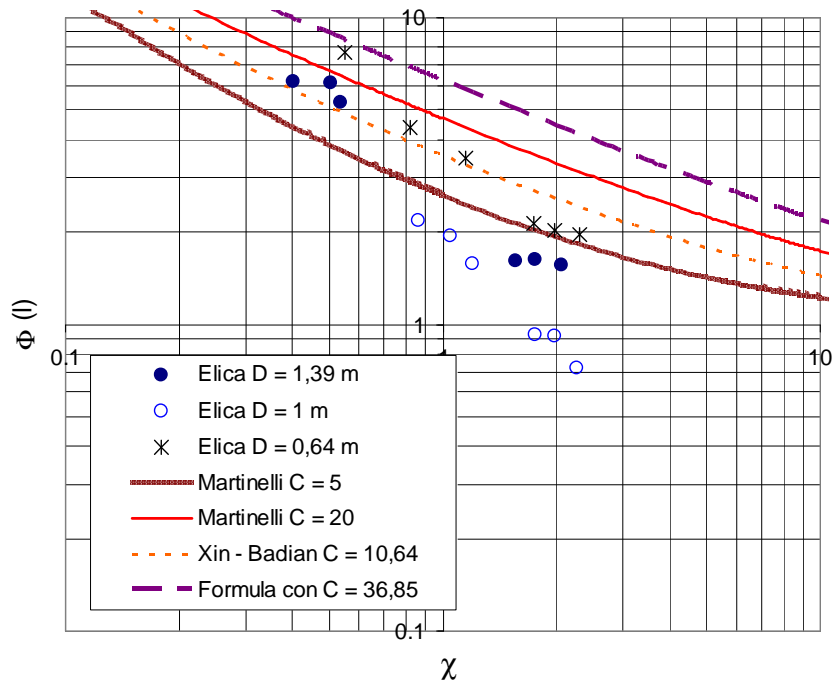


Figura 269: Confronto globale tra moltiplicatore bifase per attrito fase liquida sperimentale e modello di Lockhart-Martinelli con parametri  $C$  diversi. Circuito B Prova II Caso 2.

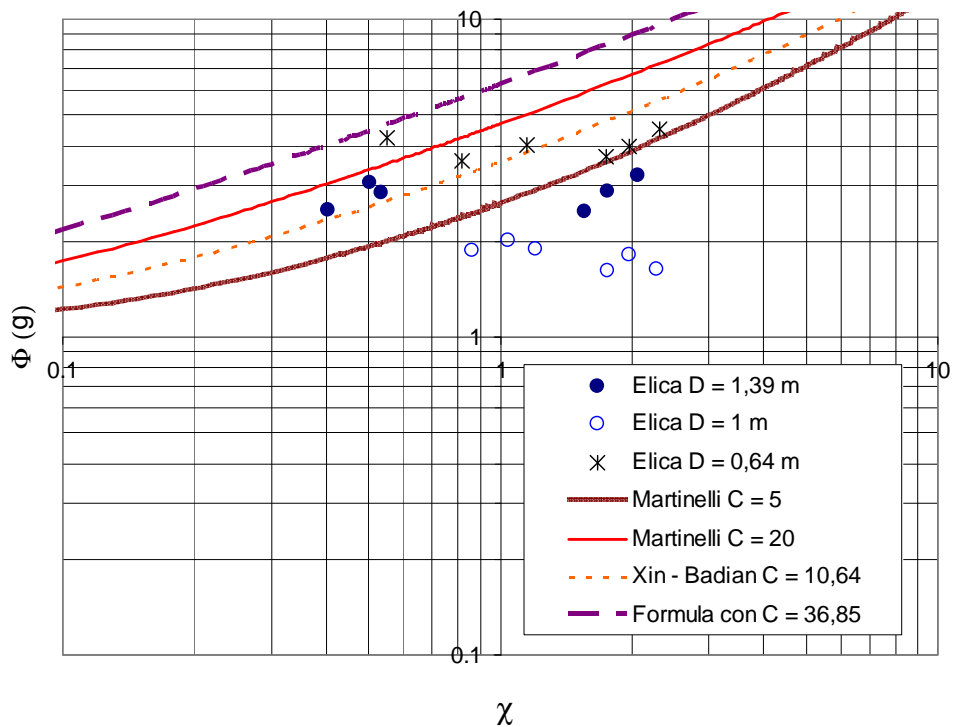


Figura 270: Confronto globale tra moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa sperimentale e modello di Lockhart-Martinelli con parametri  $C$  diversi. Circuito B Prova II Caso 2.

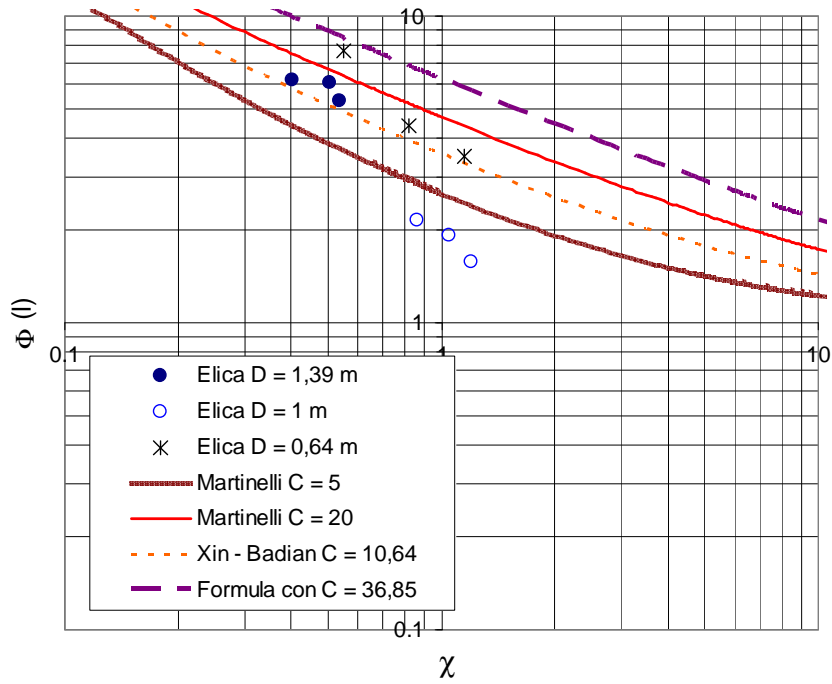


Figura 271: Moltiplicatore bifase per attrito fase liquida e curve con parametro  $C$  diversi. (W5)  
Circuito B Prova II Caso 2.

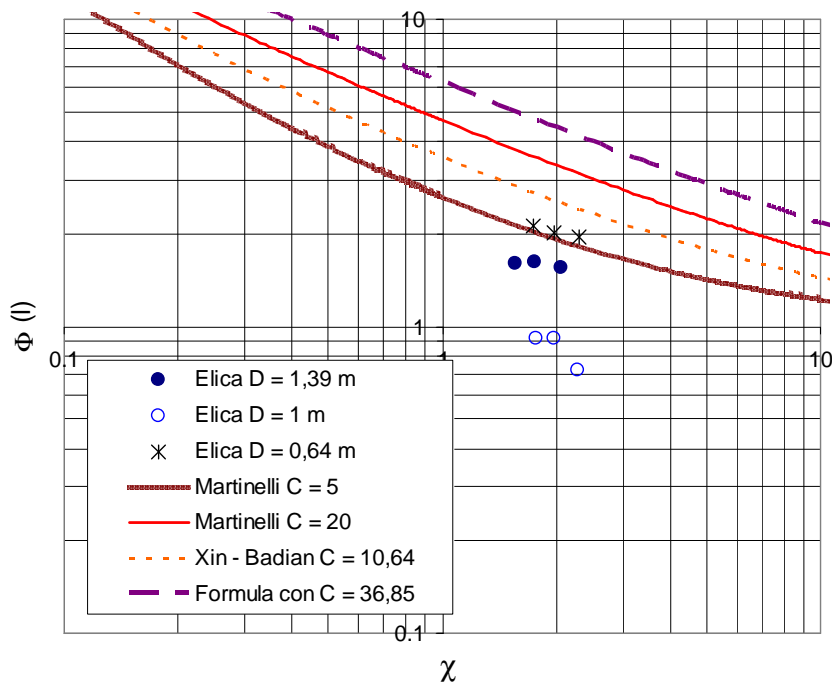


Figura 272: Moltiplicatore bifase per attrito fase liquida e curve con parametro  $C$  diversi. (W6)  
Circuito B Prova II Caso 2.

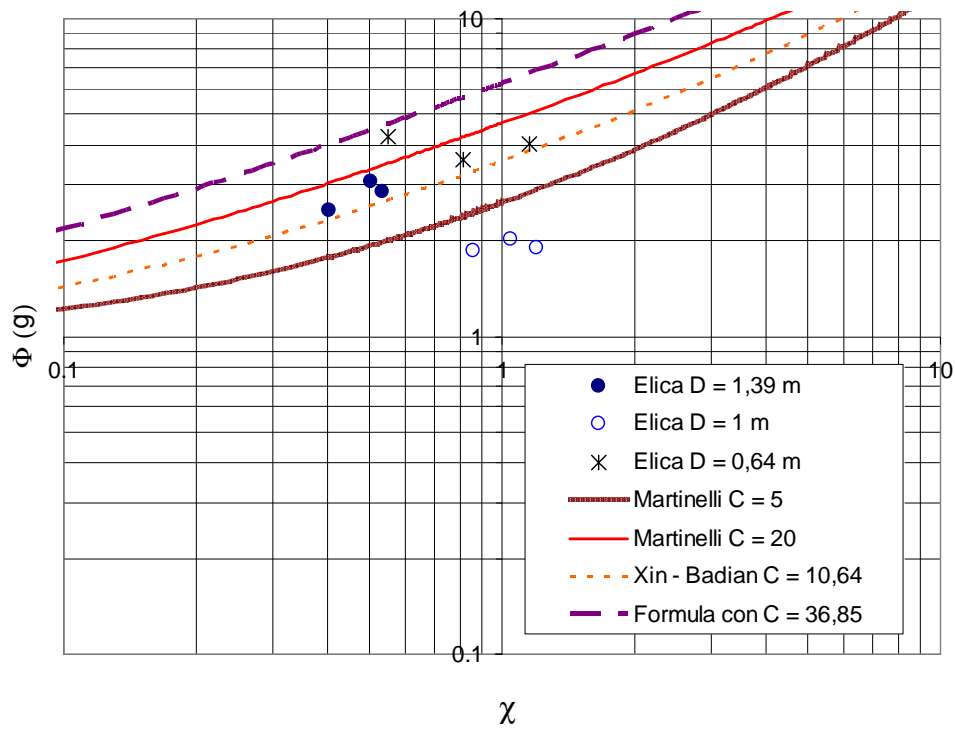


Figura 273: Moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa e curve con parametro C diversi. (W5)  
Circuito B Prova II Caso 2.

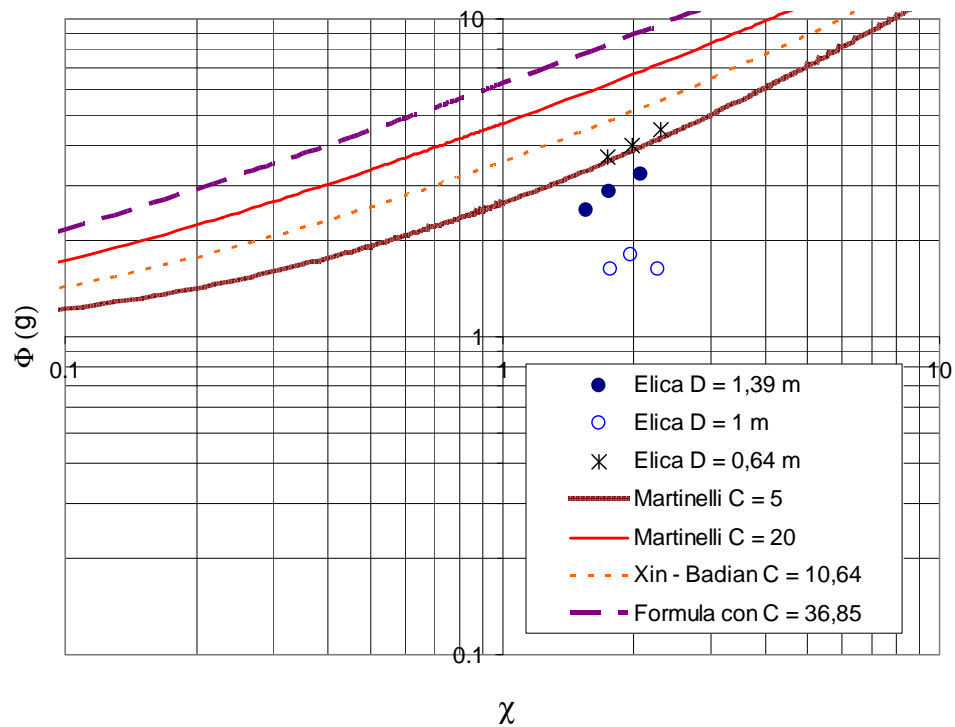


Figura 274: Moltiplicatore bifase per attrito fase gassosa e curve con parametro C diversi. (W6)  
Circuito B Prova II Caso 2.

### 7.3.7 Grado di vuoto sperimentale e correlazioni teoriche. Circuito B prove II

- **Caso 1: Portate W1, W2, W3 e W4**

Si è confrontato il grado di vuoto sperimentale con il grado di vuoto teorico, calcolato con la formulazione di Lockhart, come già fatto nelle campagne di prova precedenti. L'elica di diametro pari a 1,39 m, per ogni portata d'acqua totale testata in questa sede, risulta avere un grado di vuoto sperimentale maggiore o confrontabile con quanto previsto dal modello; per le altre due sezioni di prova si ha invece un grado di vuoto sperimentale maggiore di quello previsto dal modello. Solo nelle condizioni di portata totale W1 il grado di vuoto sperimentale per l'elica di diametro pari a 0,64 m risulta maggiore delle previsioni della formulazione di Lockhart.

In Figura 275 sono riportati i risultati ottenuti.

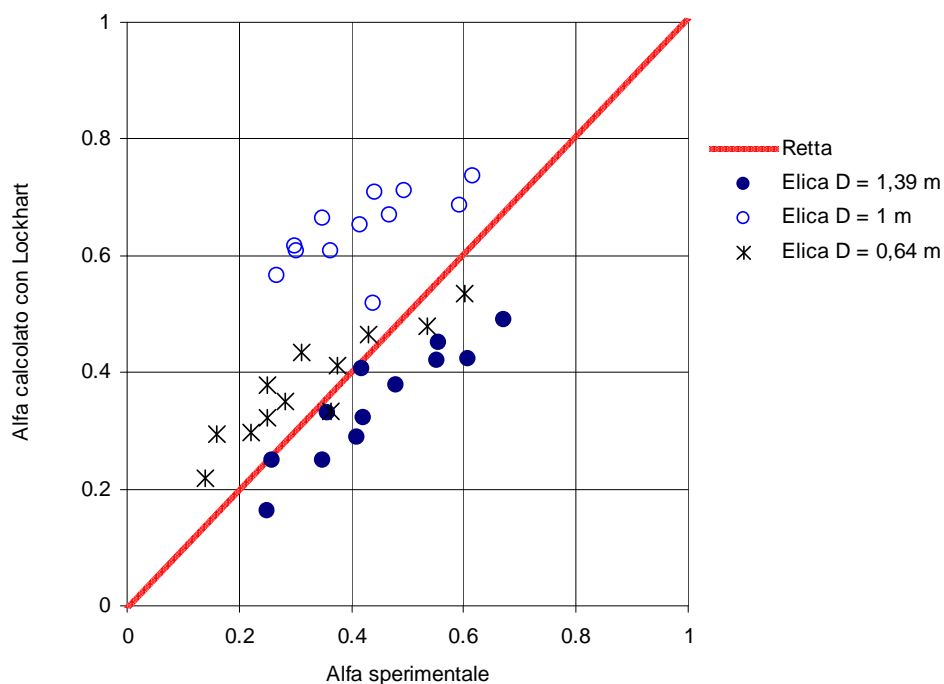


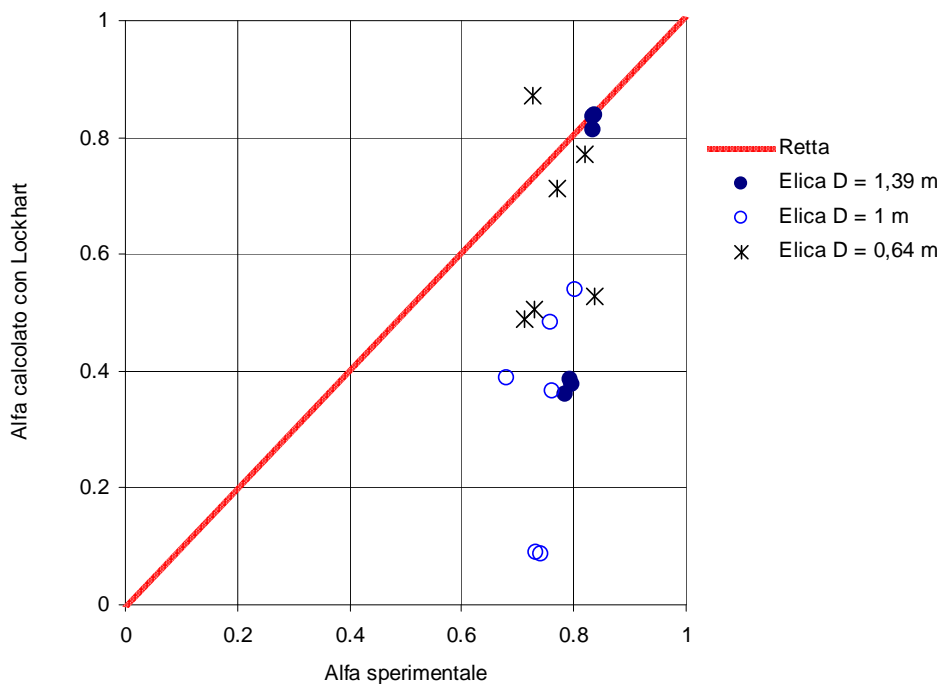
Figura 275: Confronto globale grado di vuoto sperimentale e grado di vuoto calcolato con modello Lockhart – Martinelli. Circuito B Prova II Caso 1.

• **Caso 2: Portate W5 e W6**

Per il Caso 2 il confronto tra il grado di vuoto sperimentale con il grado di vuoto teorico calcolato con la formulazione di Lockhart è solo indicativo essendo il grado di vuoto fortemente dipendente dall'instabilità fluidodinamica della portata nel canale considerato; come già riportato precedentemente sono state effettuate più chiusure rapide delle valvole d'intercettazione e relative pesate del liquido rimasto intrappolato nelle sezioni di prova, in modo da ottenere un valore medio del grado di vuoto per ogni condizione di prova testata.

Per quasi tutte le condizioni di prova il grado di vuoto sperimentale risulta essere maggiore del grado di vuoto teorico calcolato con il modello di Lockhart per tutte e tre le eliche.

In Figura 276 sono riportati i risultati ottenuti.



**Figura 276: Confronto globale grado di vuoto sperimentale e grado di vuoto calcolato con modello Lockhart – Martinelli. Circuito B Prova II Caso 2.**

### 7.3.8 *Flow pattern. Circuito B prove II.*

L'osservazione dei *flow pattern* durante lo svolgimento delle prove è stata fatta, anche in questo caso, utilizzando una videocamera ad alta definizione Panasonic AG-DVC30.

Si sono confrontate le osservazioni sperimentali con le previsioni dei *flow pattern* ricavate attraverso l'utilizzo della mappa di Baker, della mappa di Hewitt - Roberts e della mappa di Taitel - Dukler.

- **Caso 1: Portate W1, W2, W3 e W4**

Si riportano nei diagrammi successivi le previsioni dei *flow pattern* utilizzando le tre mappe considerate in questa analisi

- ***Mappa di Baker***

Secondo le previsioni della mappa di Baker, riportate da Figura 276 a Figura 280, si può instaurare solo un tipo di *flow pattern*: *slug*.

Si riportano i risultati ottenuti con la mappa di Baker per le portate d'acqua testate.

- ***Mappa di Hewitt - Roberts***

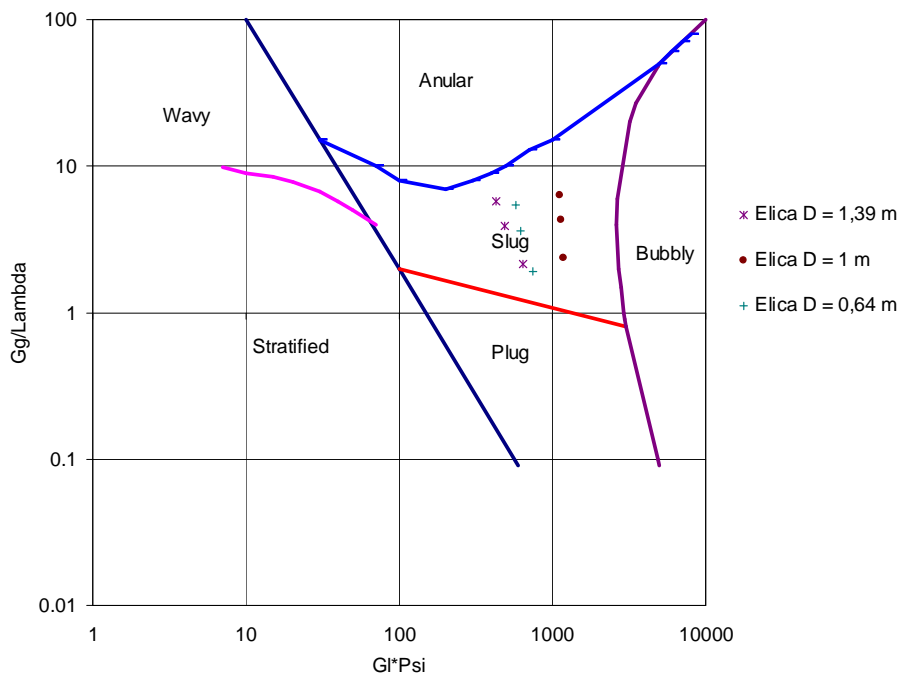
Le previsioni di questa mappa per le portate prese in esame indicano come tipo di *flow pattern* per tutte le prove lo *slug*; solo per l'elica di diametro 1,39 m nel caso di portata totale W1 e portata d'aria 0,86 g/s si prevede un *flow pattern* di tipo *churn*.

Le previsioni sono riportate da Figura 281 a Figura 284.

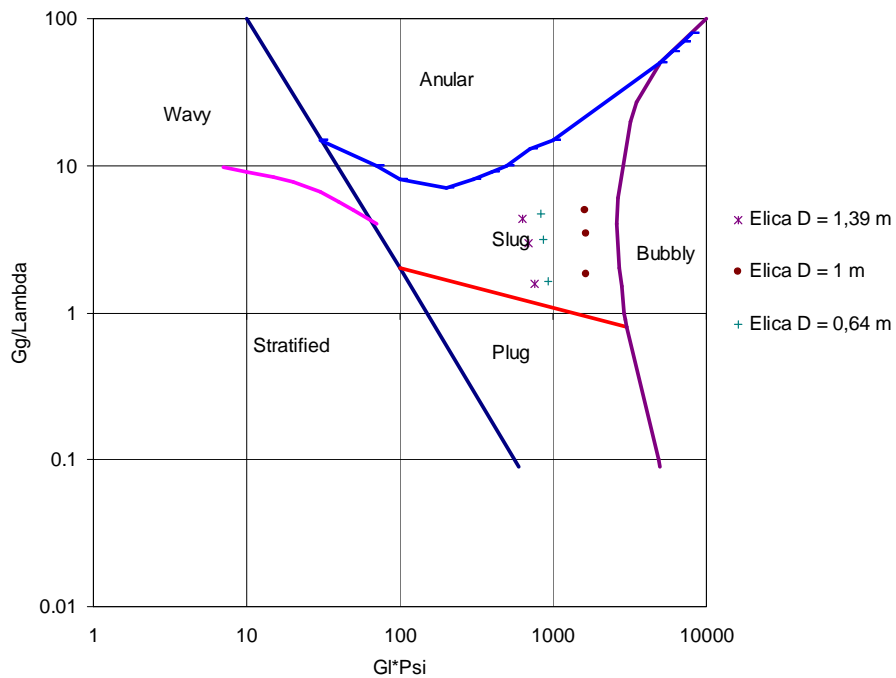
- ***Mappa di Taitel - Dukler***

Le previsioni della mappa di Taitel - Dukler sono riportate in Tabella 71, in Tabella 72 e in Tabella 73, nelle quali sono messi a confronto anche i risultati ottenuti con le previsioni delle mappe di Baker e di Hewitt - Roberts e le osservazioni sperimentali.

In questo caso i *flow pattern* instauratisi risultano essere previsti piuttosto accuratamente da tutte le mappe prese in esame.

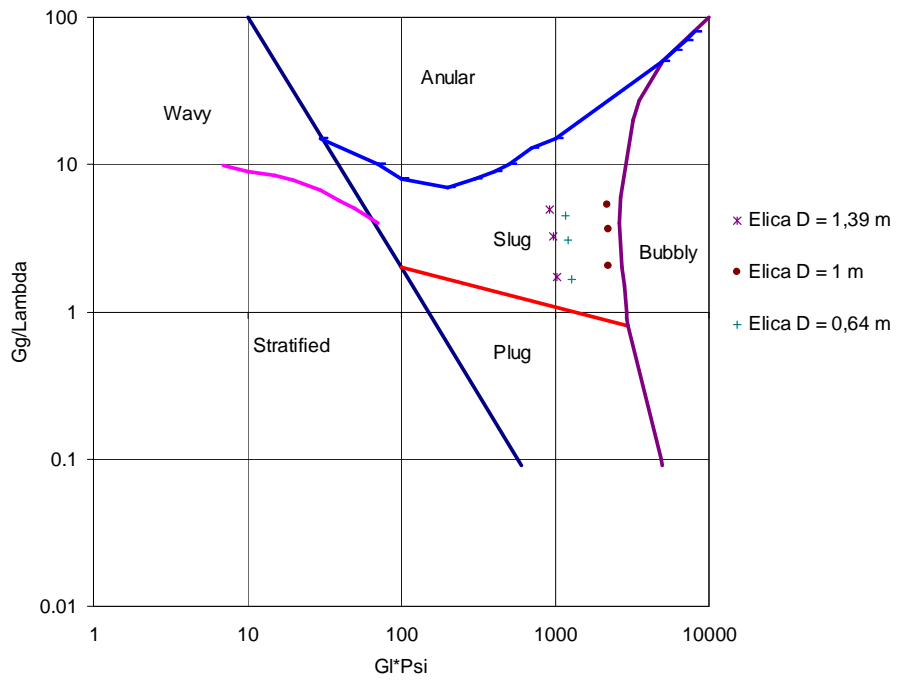


**Figura 277: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per portata W1. Circuito B Prova II Caso 1.**

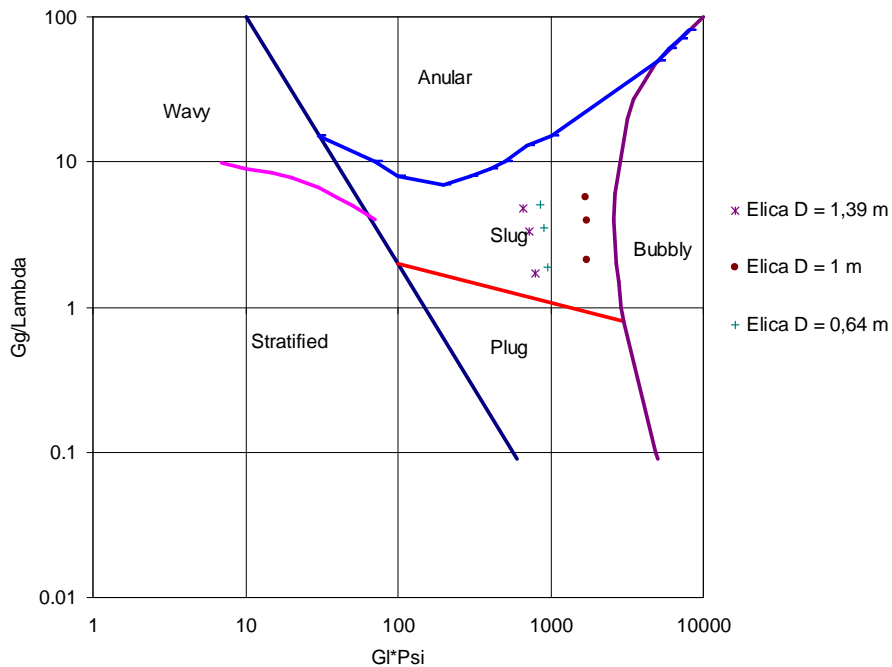


**Figura 278: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per portata W2. Circuito B Prova II Caso 1.**





**Figura 279: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per portata W3. Circuito B Prova II Caso 1.**



**Figura 280: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per portata W4. Circuito B Prova II Caso 1.**

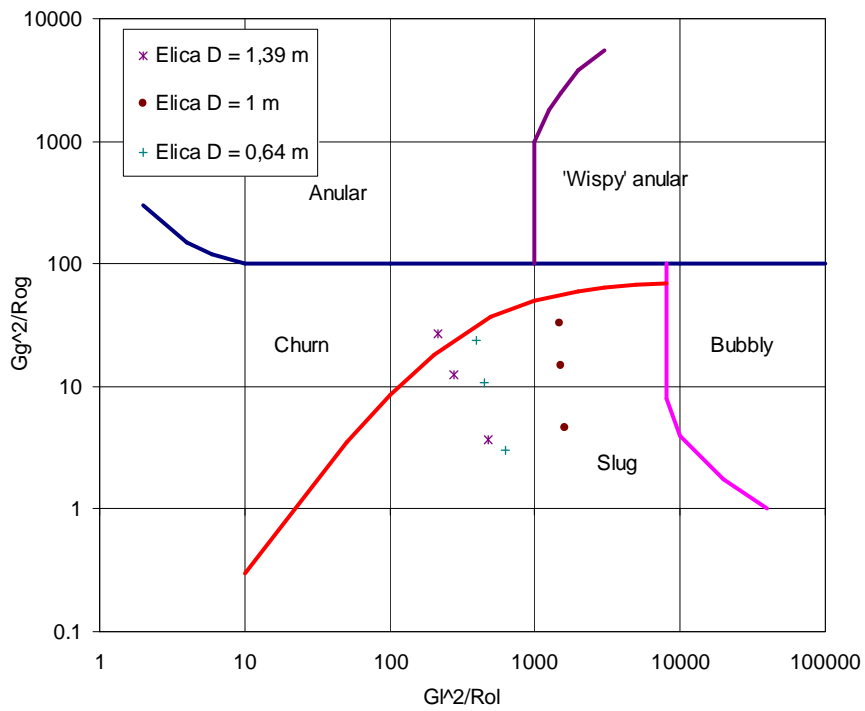


Figura 281: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per portata W1. Circuito B Prova II Caso 1.

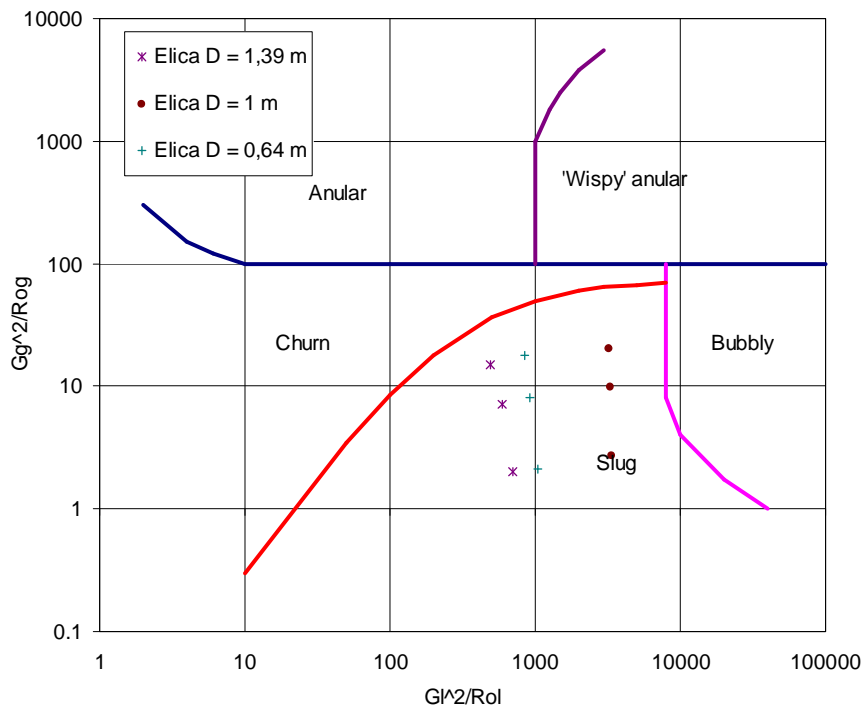


Figura 282: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per portata W2. Circuito B Prova II Caso 1.

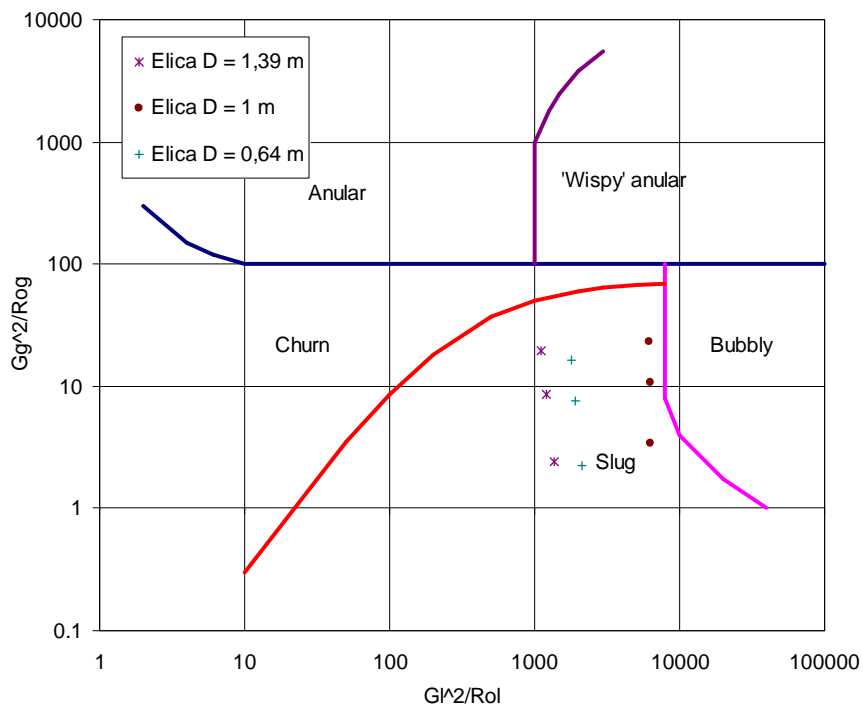


Figura 283: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per portata W3. Circuito B Prova II Caso 1.

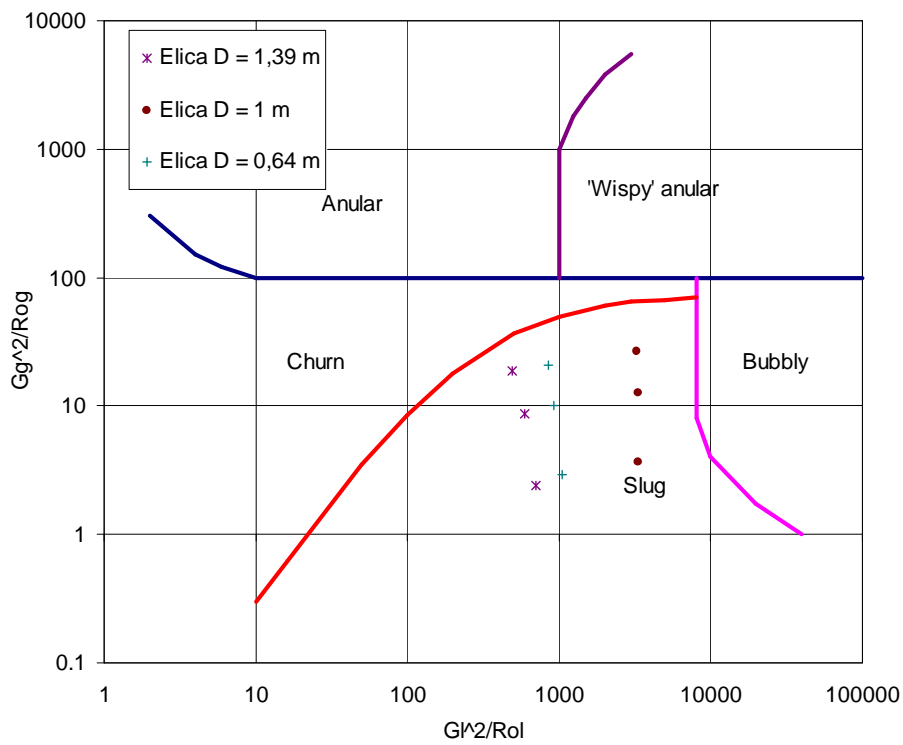


Figura 284: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per portata W4. Circuito B Prova II Caso 1.

| Portata totale | Portata d'aria nell'elica [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| W1             | 0,31                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
|                | 0,58                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
|                | 0,86                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug – Plug                |
| W2             | 0,28                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug – Plug                |
|                | 0,55                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
|                | 0,81                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
| W3             | 0,29                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,56                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,85                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
| W4             | 0,3                             | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,58                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug – Plug                |

**Tabella 71: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali per portata. Elica D = 0,64 m Circuito B Prova II Caso 1.**

| Portata totale | Portata d'aria nell'elica [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| W1             | 0,31                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
|                | 0,58                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
|                | 0,86                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug – Plug                |
| W2             | 0,28                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,55                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
|                | 0,81                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
| W3             | 0,29                            | Slug                    | Slug           | Bubble – Slug         | Slug                       |
|                | 0,56                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,85                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
| W4             | 0,3                             | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,58                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug – Plug                |

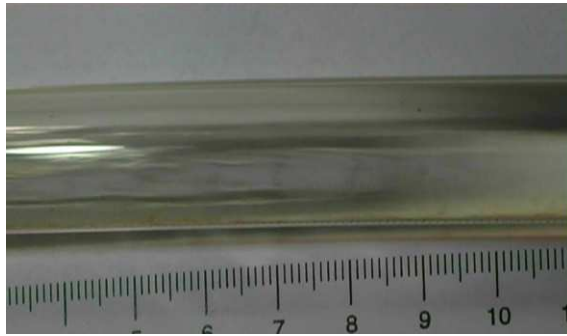
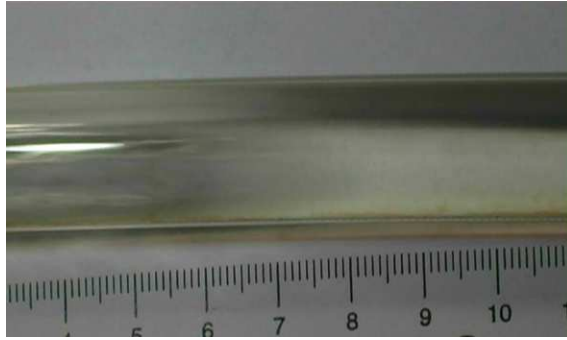
**Tabella 72: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali per portata. Elica D = 1 m Circuito B Prova II Caso 1.**

| Portata totale | Portata d'aria nell'elica [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| W1             | 0,31                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
|                | 0,58                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
|                | 0,86                            | Churn                   | Slug           | Slug – Plug           | Slug – Plug                |
| W2             | 0,28                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug – Plug                |
|                | 0,55                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug – Plug                |
|                | 0,81                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug                       |
| W3             | 0,29                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,56                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,85                            | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
| W4             | 0,3                             | Slug                    | Slug           | Bubble                | Slug                       |
|                | 0,58                            | Slug                    | Slug           | Slug – Plug           | Slug – Plug                |

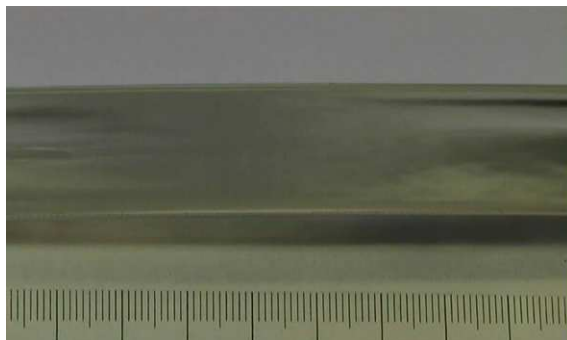
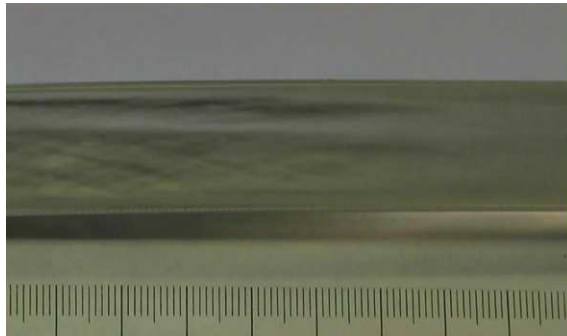
**Tabella 73: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali per portata. Elica D = 1,39 m  
Circuito B Prova II Caso 1.**

Anche per le prove di tipo II Caso 1, come per le prove di tipo I, le visualizzazioni dei *flow pattern* sono poco nitide essendo la velocità della miscela elevata per tutte le condizioni testate e poiché la fase gassosa percorre l'elica più velocemente della fase liquida. La bassa qualità delle immagini non ha creato difficoltà nell'identificazione dei tipi di *flow pattern* che si sono riscontrati in questo tipo di prove.

Non pare utile, come per le prove di tipo I, dedicare un'appendice alla raccolta delle immagini dei *flow pattern*. In Figura 285, Figura 286 e Figura 287 si riportano alcuni esempi di immagini dei *flow patterns* relativi a questa tipologia di prove.



**Figura 285:**  $W_{\text{aria}} = 0,25 \text{ g/s}$ ,  $\Delta z \sim 1,35 \text{ m}$ ; Portata totale  $W1$ ; elica  $D = 0,64 \text{ m}$ . Prove tipo II Caso 1 Circuito B.



**Figura 286:**  $W_{\text{aria}} = 0,25 \text{ g/s}$ ,  $\Delta z \sim 1,25 \text{ m}$ ; Portata totale  $W1$ ; elica  $D = 1 \text{ m}$ . Prove tipo II Caso 1 Circuito B.



**Figura 287:  $W_{aria} = 0,25$  g/s,  $\Delta z \sim 1,25$  m; Portata totale  $W1$ ; elica  $D = 1,39$  m. Prove tipo II Caso 1 Circuito B.**

- **Caso 2: Portate W5 e W6**

Si riportano nei diagrammi successivi le previsioni dei *flow pattern* utilizzando le note mappe prese in esame in questa ricerca; per il calcolo dei coefficienti delle mappe si è utilizzata la portata d'acqua media ai rami di alimentazione.

➤ **Mappa di Baker**

Secondo le previsioni di questa mappa, riportate in Figura 288 e in Figura 289, per le portate prese in esame si avrebbe come tipo di *flow pattern* per tutte le prove *anular*, solo per l'elica di diametro 1 m nel caso di portata totale W6 e portata d'aria 1,5 g/s si prevede un *flow pattern* di tipo *slug*.

➤ **Mappa di Hewitt - Roberts**

Secondo le previsioni di questa mappa, per le portate prese in esame, si avrebbe come tipo di *flow pattern*, per tutte le prove, *anular*; fanno eccezioni due punti dell'elica di diametro 1,39 m (per la portata totale W5 e portata d'aria 1,52 g/s e per la portata totale W6 e portata d'aria 1,5 g/s) per i quali si prevede un *flow pattern* di tipo *churn*. In Figura 290 e in Figura 291 sono riportate le previsioni della mappa di Hewitt – Roberts.

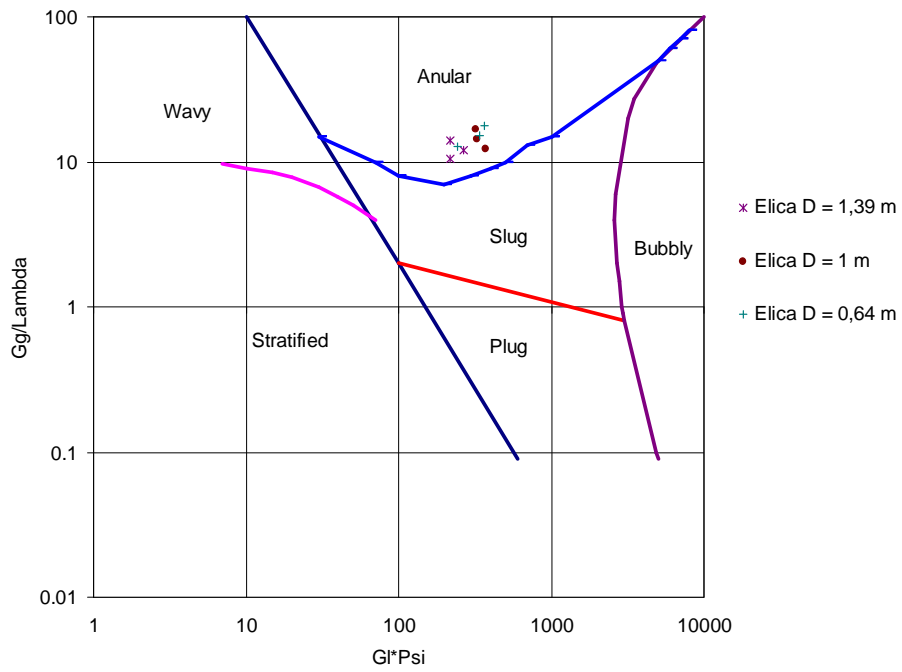
➤ **Mappa di Taitel - Dukler**

Le previsioni della mappa di Taitel - Dukler sono riportate, come per i casi precedentemente trattati, in tabelle comparative in cui sono messi a confronto anche i risultati ottenuti con le previsioni delle mappe di Baker e di Hewitt - Roberts e le osservazioni sperimentali.

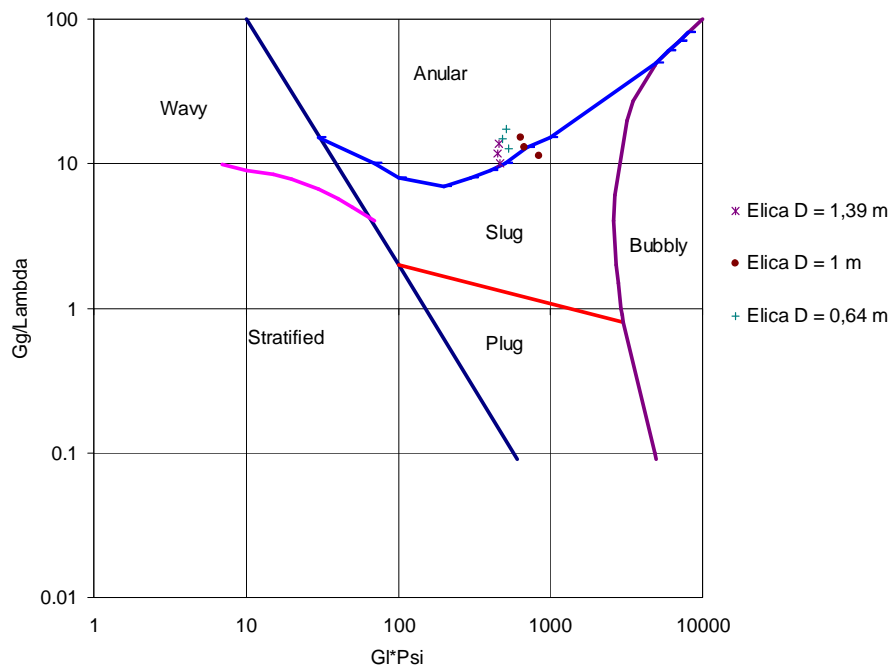
Le tre mappe danno una previsione simile e molto attendibile del *flow pattern* instauratosi durante questa tipologia di prove.

Anche per le prove di tipo II Caso 2 si sono ottenute delle registrazioni dei *flow patterns* di scarsa definizione, ciò tuttavia non ha creato difficoltà nella loro identificazione, ma rende superflua un'appendice dedicata alla raccolta delle immagini.

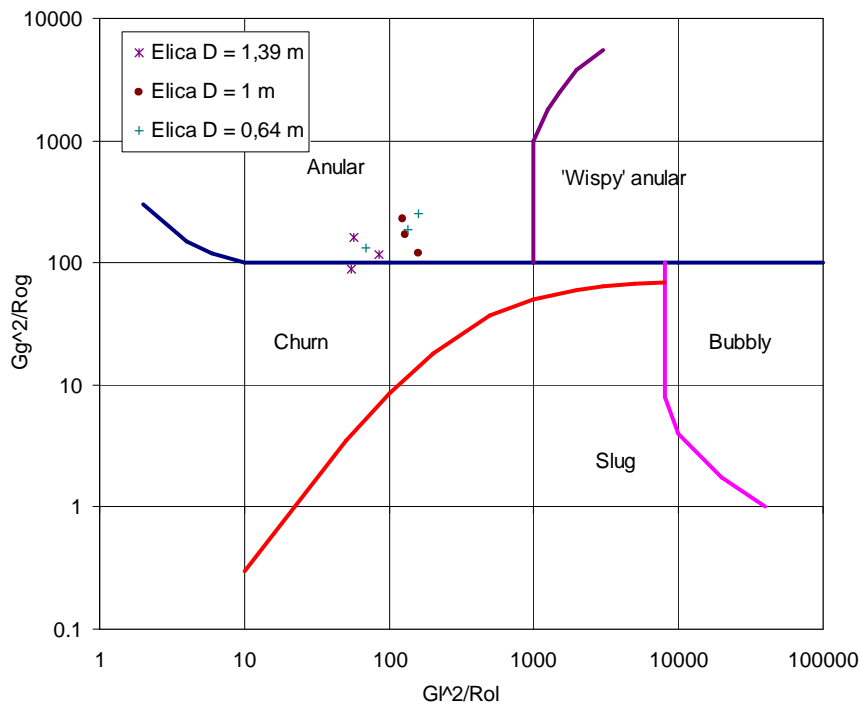




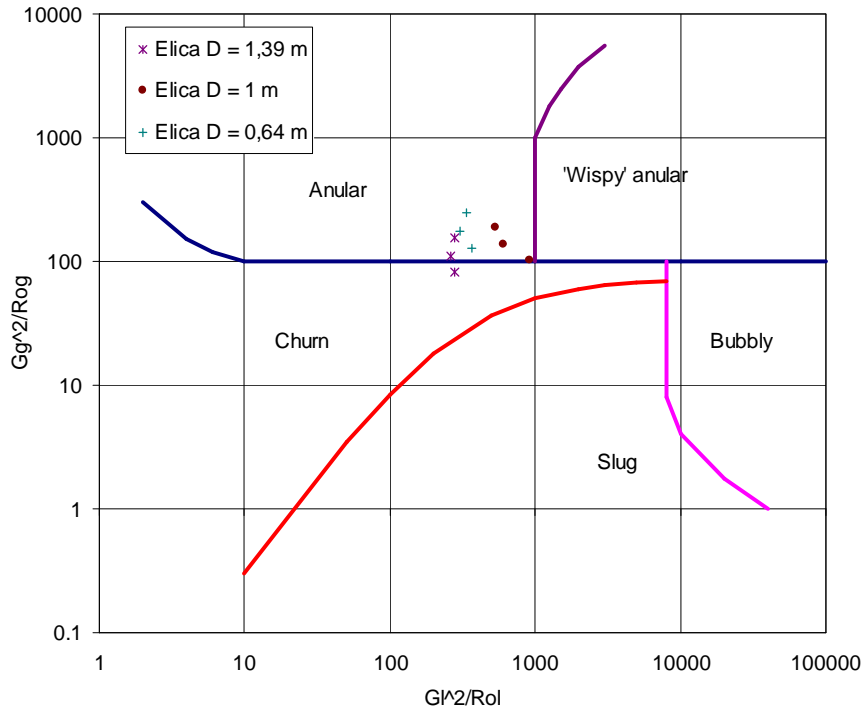
**Figura 288: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per portata W5. Circuito B Prova II Caso 2.**



**Figura 289: Mappa di Baker con inseriti i punti sperimentali per portata W6. Circuito B Prova II Caso 2.**



**Figura 290: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per portata W5. Circuito B Prova II Caso 2.**



**Figura 291: Mappa di Hewitt-Roberts con inseriti i punti sperimentali per portata W6. Circuito B Prova II Caso 2.**

| Portata totale | Portata d'aria nell'elica [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| W5             | 1,52                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
|                | 1,8                             | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
|                | 2,11                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
| W6             | 1,5                             | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
|                | 1,75                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
|                | 2,07                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |

**Tabella 74: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali per portata. Elica D = 0,64 m Circuito B Prova II Caso 2.**

| Portata totale | Portata d'aria nell'elica [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| W5             | 1,52                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
|                | 1,8                             | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
|                | 2,11                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
| W6             | 1,5                             | Anular                  | Slug           | Anular                | Anular                     |
|                | 1,75                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
|                | 2,07                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |

**Tabella 75: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali per portata. Elica D = 1 m Circuito B Prova II Caso 2.**

| Portata totale | Portata d'aria nell'elica [g/s] | Mappa di Hewitt-Roberts | Mappa di Baker | Mappa di Taitel-Duker | Osservazioni sperimentali. |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| W5             | 1,52                            | Anular                  | Churn          | Anular                | Anular                     |
|                | 1,8                             | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
|                | 2,11                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
| W6             | 1,5                             | Anular                  | Churn          | Anular                | Anular                     |
|                | 1,75                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |
|                | 2,07                            | Anular                  | Anular         | Anular                | Anular                     |

**Tabella 76: Confronto previsioni mappe e osservazioni sperimentali per portata. Elica D = 1,39 m Circuito B Prova II Caso 2.**

## 8 Instabilità fluidodinamiche.

Parte delle campagne sperimentali effettuate in questa ricerca sono state improntate all'analisi delle instabilità fluidodinamiche nei canali disposti in parallelo.

Si sono analizzate le due tipologie di prove effettuate utilizzando il circuito B, prove I e prove II (Caso 1 e Caso 2), per mettere in luce il fenomeno d'interesse.

Le instabilità di un deflusso possono avere cause differenti:

- Instabilità statiche: caratterizzate dall'incapacità del flusso di ristabilire le condizioni originarie in seguito ad una perturbazione; possono essere viste come successione di stati stazionari e possono essere studiate a partire dalle leggi di conservazione in forma stazionaria.
- Instabilità dinamiche: caratterizzate dall'azione combinata di componenti dinamiche del sistema; per studiarle è necessario conoscere l'evoluzione temporale delle grandezze legate al sistema.

Le instabilità si possono ulteriormente classificare come:

- Instabilità pure: quando sono causate da un unico meccanismo fisico.
- Instabilità composte: quando coesistono più cause.

Infine è possibile ancora distinguere tra fenomeni di instabilità primari e tra fenomeni di instabilità secondari, la cui presenza è legata alla comparsa di altre instabilità.

Nel caso di canali in parallelo si possono riscontrare sia instabilità di tipo statico che di tipo dinamico.

Nei paragrafi successivi si analizzeranno le instabilità riscontrate nelle campagne sperimentali effettuate nell'ambito di questa ricerca.

## 8.1 Instabilità statiche.

Le instabilità statiche causano una variazione della distribuzione di portata d'acqua all'interno dei singoli canali. Iniettando la portata d'aria stabilita dal protocollo di prova nelle eliche, sia per le prove di tipo I che per le prove di tipo II, si è riscontrata un'oscillazione della portata d'acqua in ingresso ai canali.

L'ampiezza dell'oscillazione è legata al rapporto tra la portata d'acqua e la portata d'aria utilizzato nella prova esaminata.

Nei paragrafi successivi si analizzeranno caso per caso i risultati ottenuti.

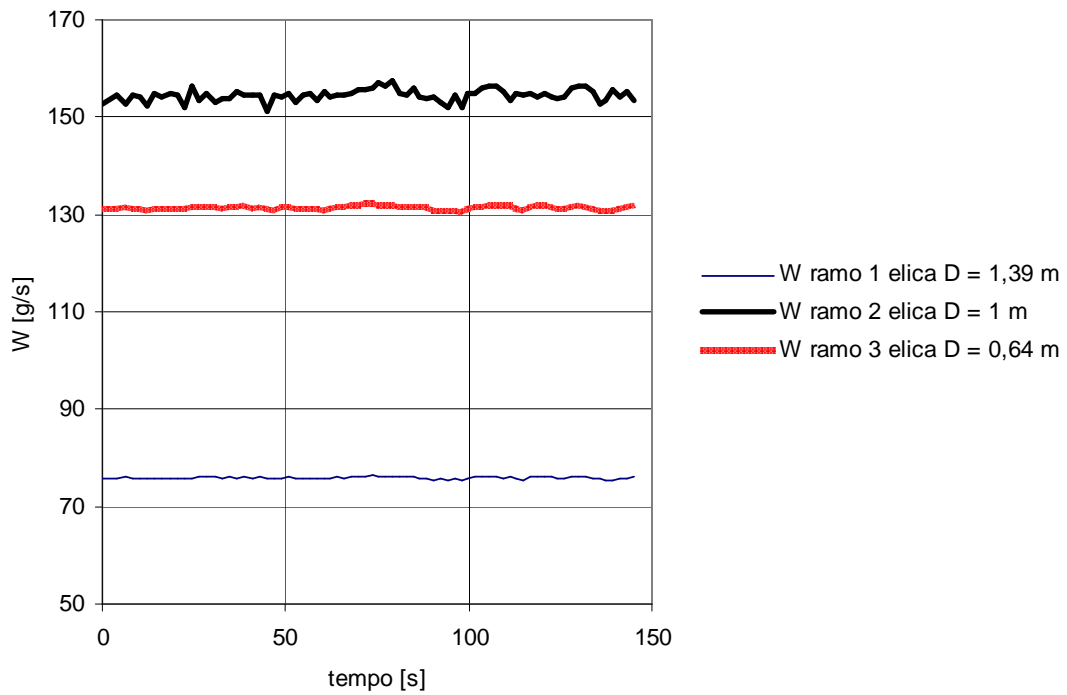
### 8.1.1 Distribuzione delle portate nei canali Prove I.

Come già visto nei capitoli precedenti in queste prove si è imposto il deflusso bifase in una sola elica mantenendo le altre due in monofase.

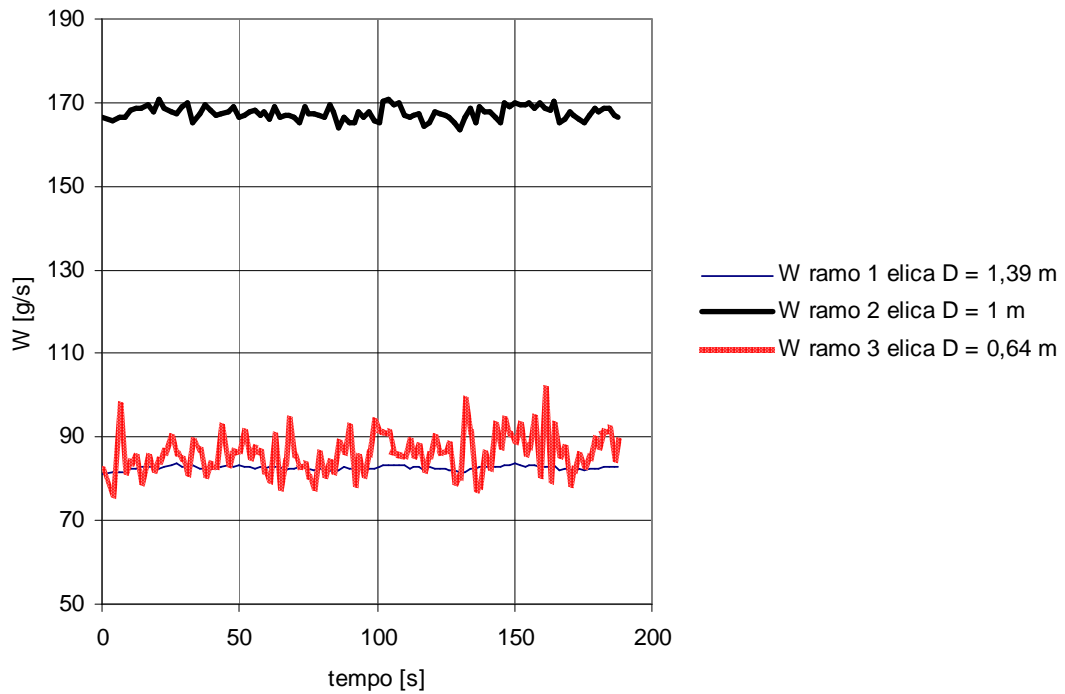
Al diminuire della portata totale d'acqua ed al crescere della portata d'aria le oscillazioni risultano più ampie e con una frequenza maggiore. A questa affermazione fa eccezione il caso che riguarda la portata d'acqua totale W3, la più elevata presa in esame, in questo caso si ottengono forti oscillazioni nel caso in cui si pongano in regime bifase le eliche con diametro 0,64 m e 1 m, mentre questo comportamento non si riscontra se il regime bifase è imposto alla sezione di prova con diametro più elevato. Questo comportamento anomalo può essere imputato ad una difficoltà nel mantenere stabile il deflusso di acqua totale quando si inietta all'interno delle eliche, una portata d'aria nei rami dove si ha la portata d'acqua maggiore. Essendo infatti la W3 la massima portata d'acqua totale che è possibile immettere nel collettore di alimentazione, senza chiudere completamente la valvola di bypass che regola il deflusso di acqua dopo la pompa di alimento, le oscillazioni rilevate in questa campagna sperimentale potrebbero essere imputate ad una instabilità del deflusso della portata totale; questa affermazione è supportata dal fatto che ogni picco (sia verso l'alto che verso il basso) è 'simmetrico' per tutte le portate dei rami.

Si riportano, da Figura 292 a Figura 331, gli andamenti della portata d'acqua nei canali in funzione del tempo per le quattro portate d'acqua totali analizzate e per le diverse portate d'aria imposte nella sezione di prova in regime bifase.

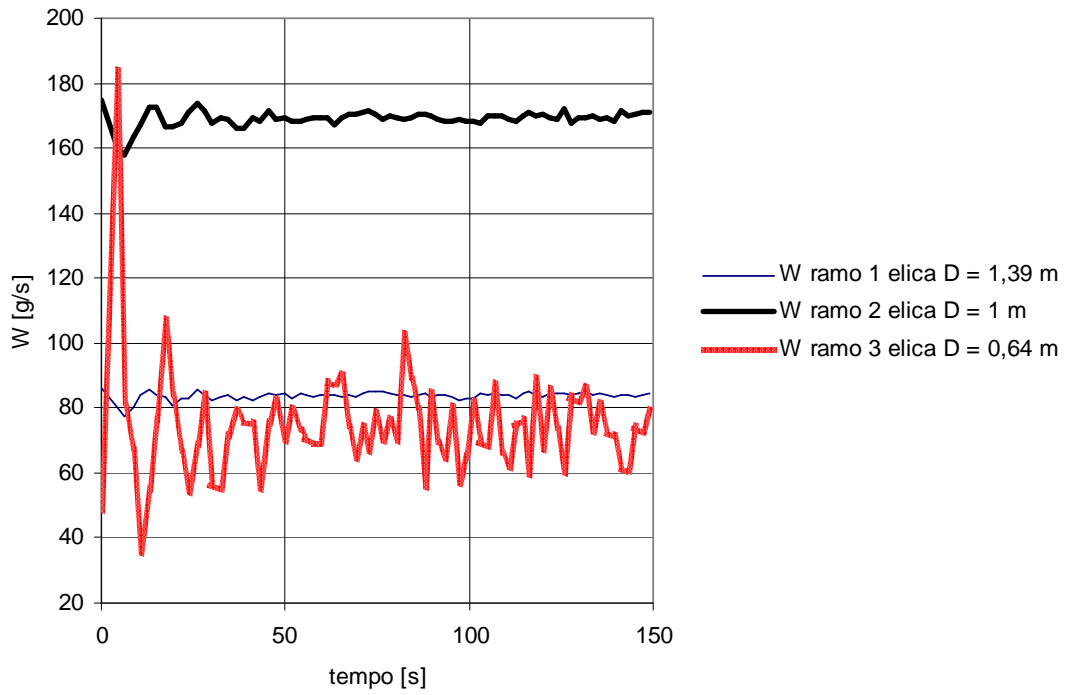
• **Portata W1**



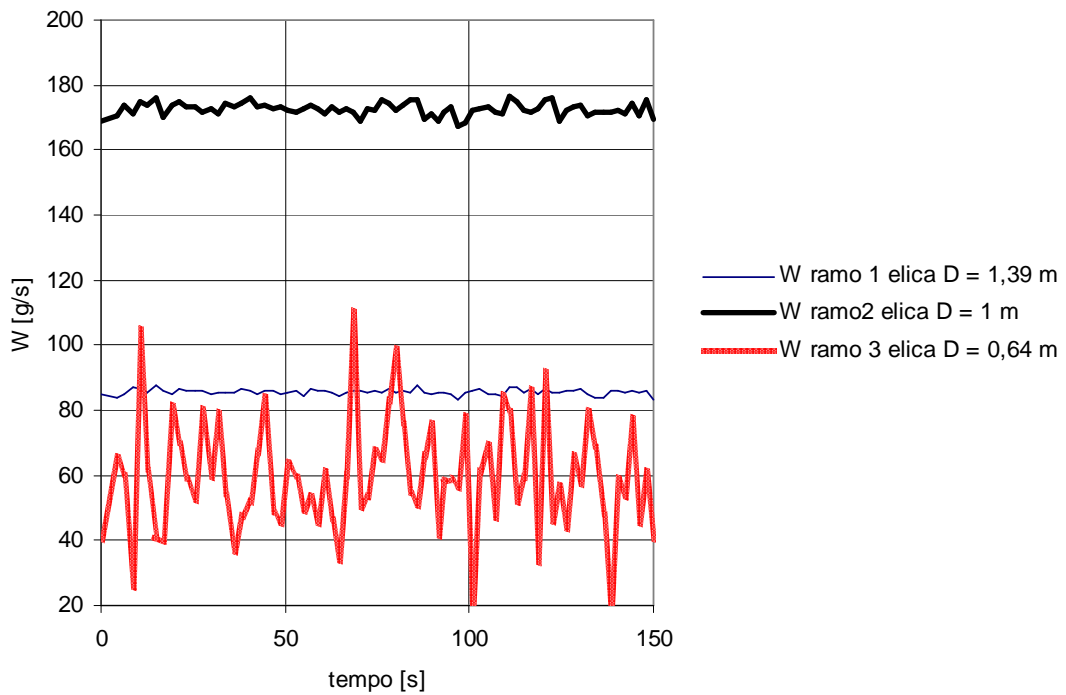
**Figura 292: Andamento della portata d’acqua nei canali caso monofase Prove tipo I (Portata W1).**



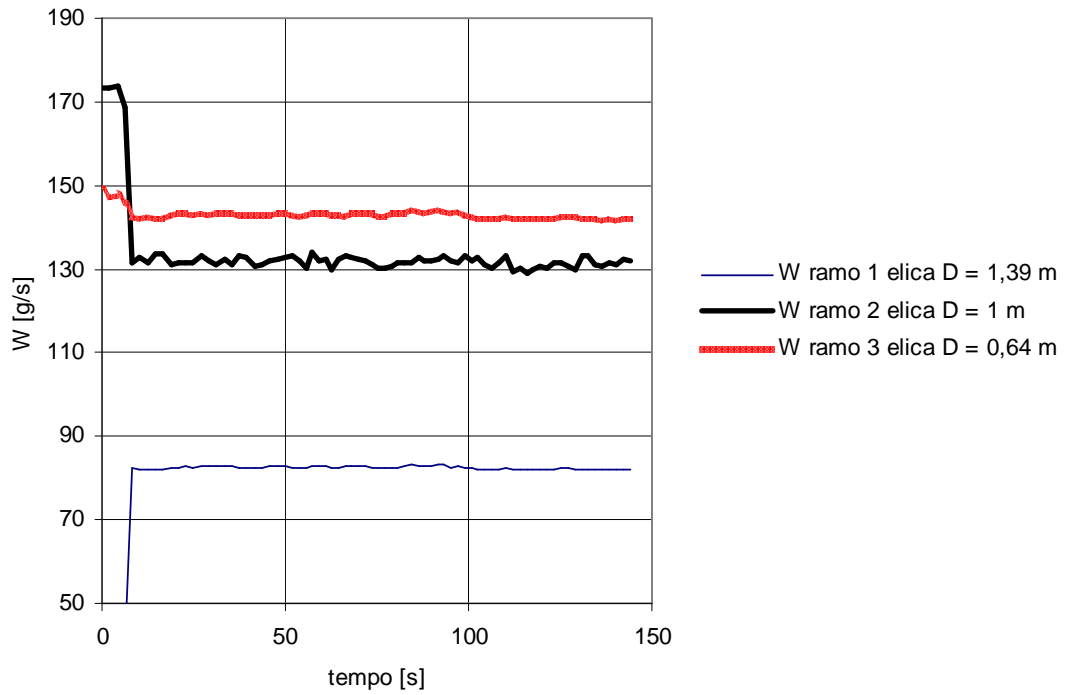
**Figura 293: Andamento della portata d’acqua nei canali  $W$  aria = 100 l/h Elica  $D = 0,64$  m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**



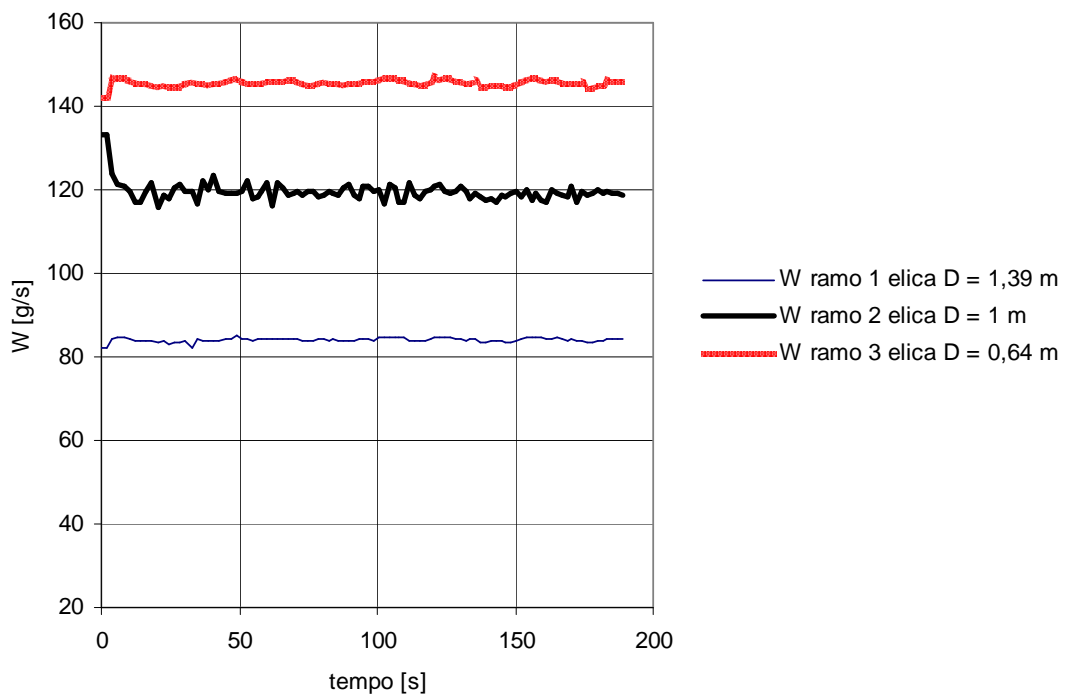
**Figura 294: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 200 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**



**Figura 295: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**

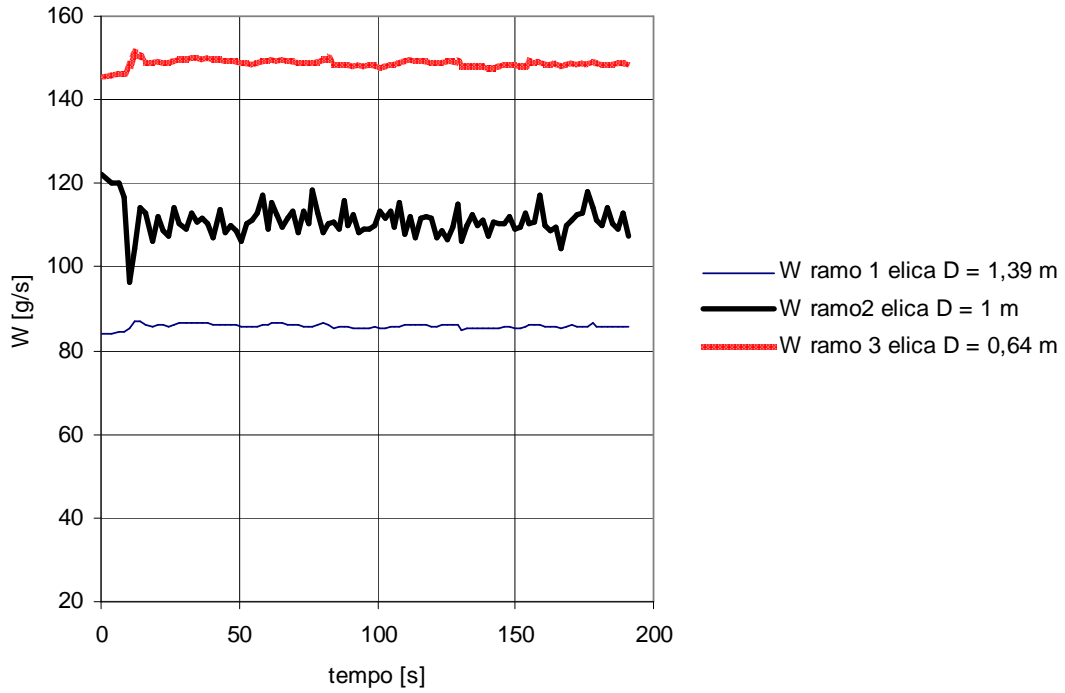


**Figura 296: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W_{\text{aria}} = 100$  l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**

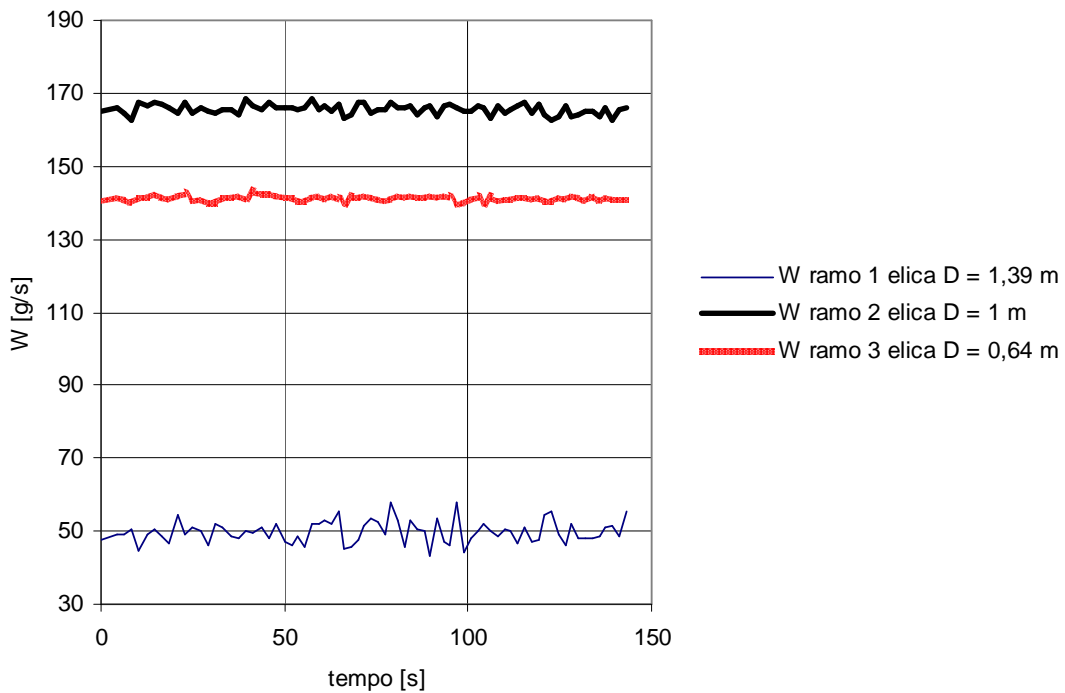


**Figura 297: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W_{\text{aria}} = 200$  l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**

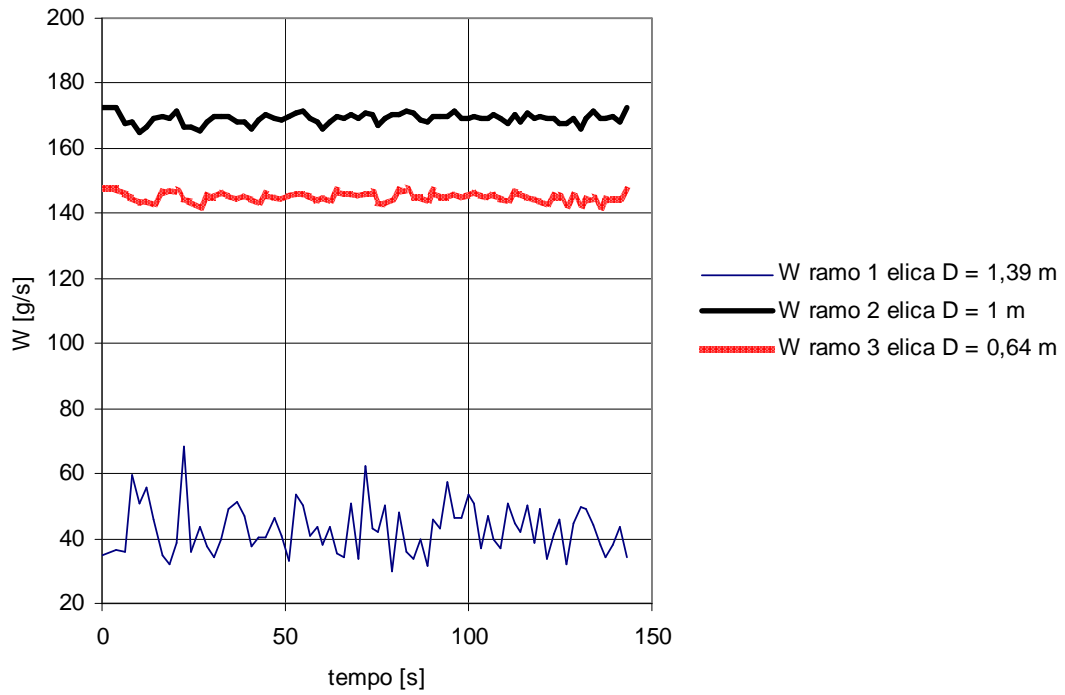




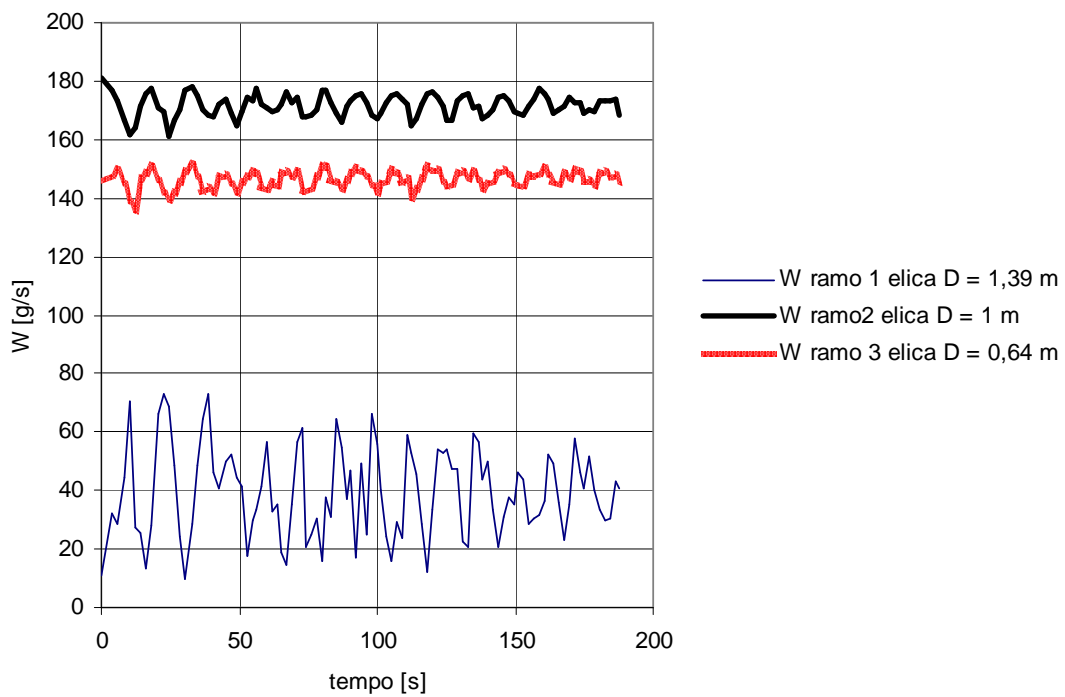
**Figura 298: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**



**Figura 299: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 100 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**

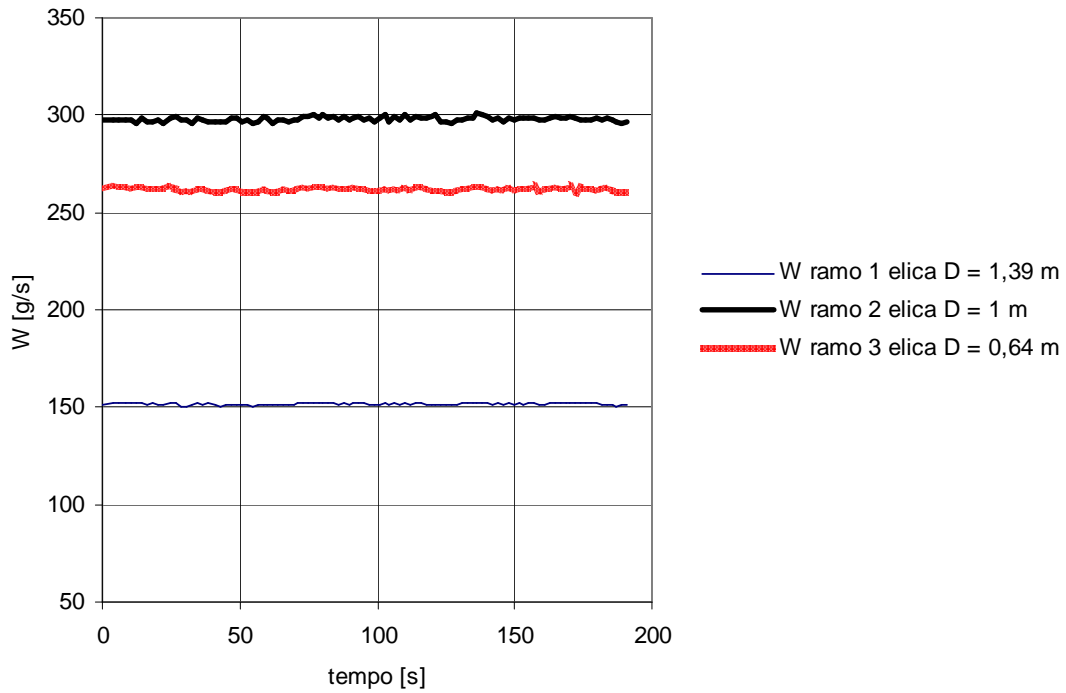


**Figura 300: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W_{\text{aria}} = 200$  l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**

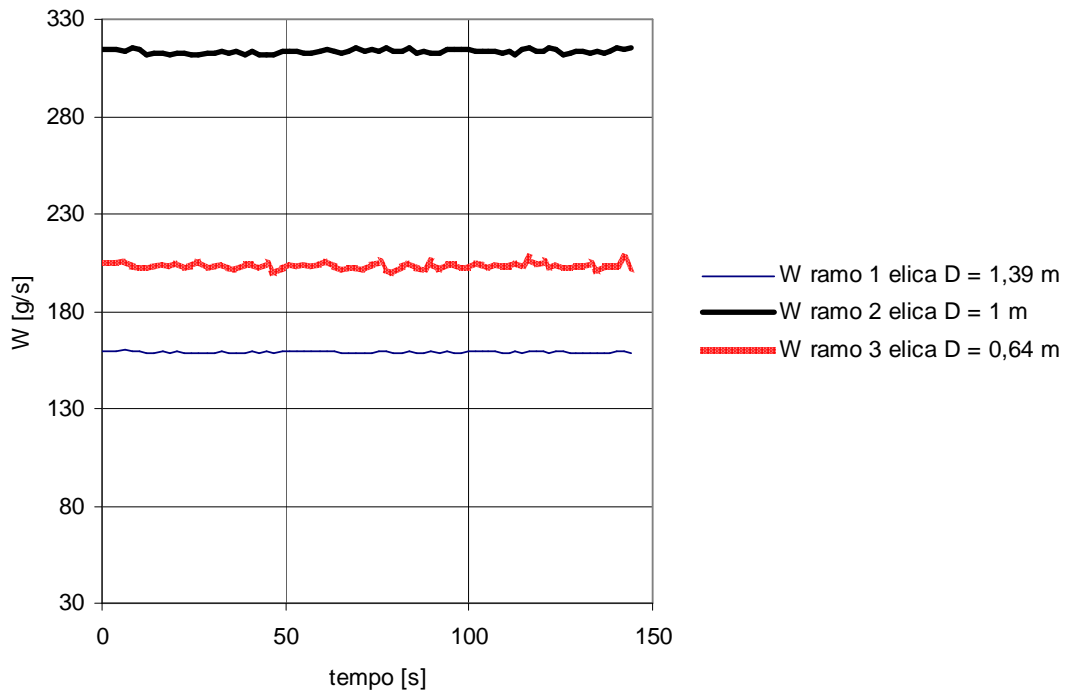


**Figura 301: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W_{\text{aria}} = 300$  l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**

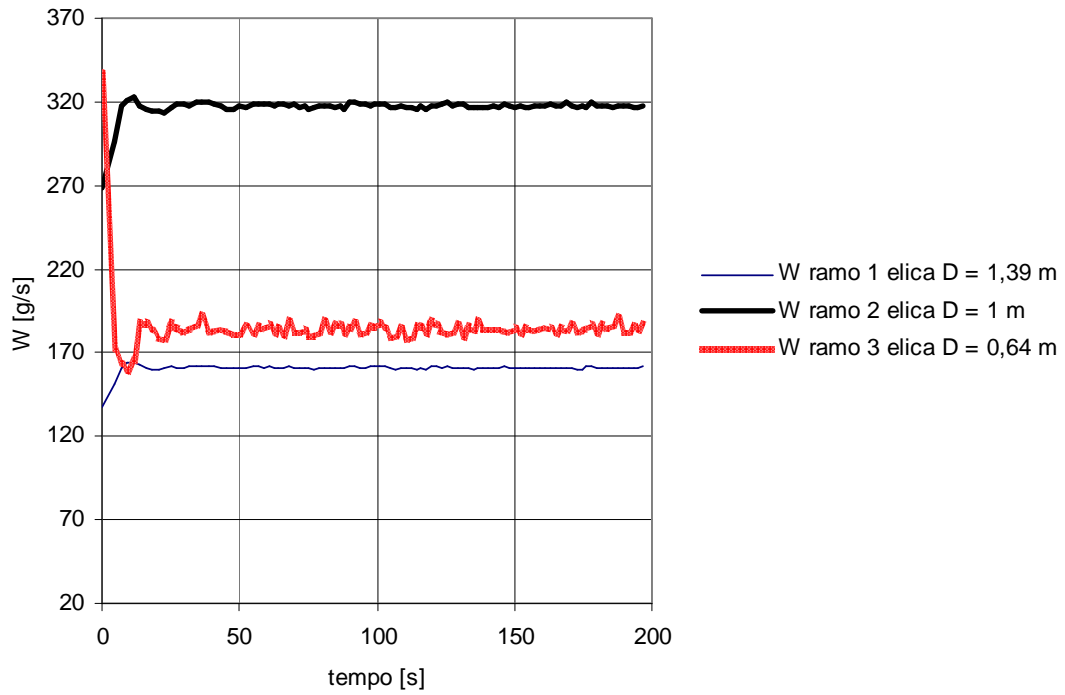
• **Portata W2**



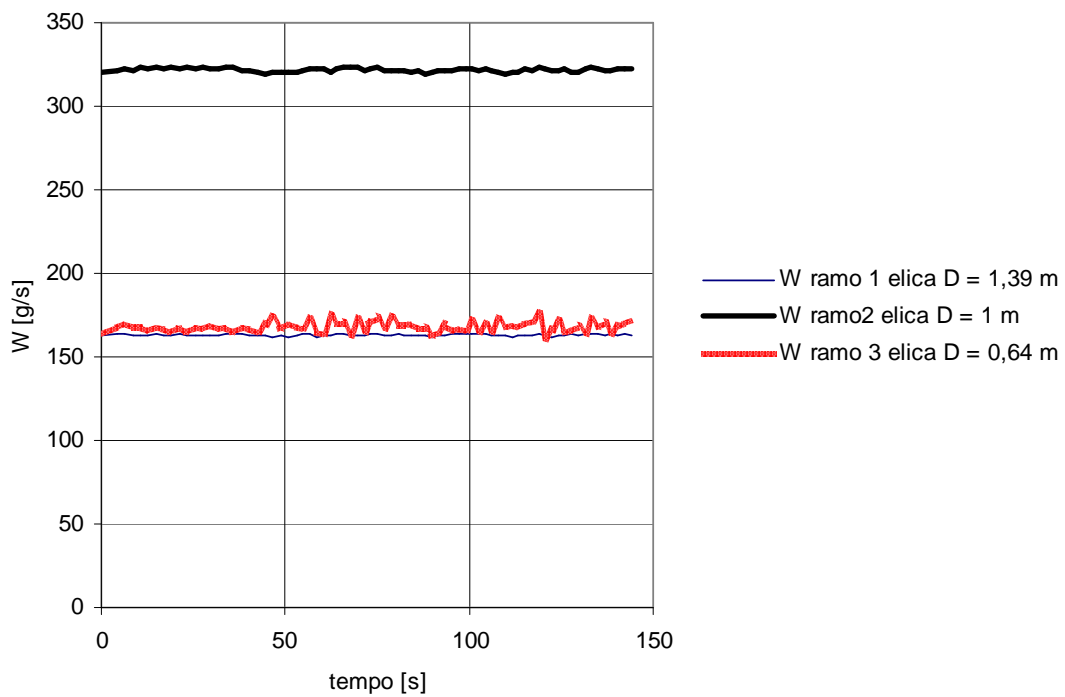
**Figura 302: Andamento della portata d'acqua nei canali caso monofase Prove tipo I (Portata W2).**



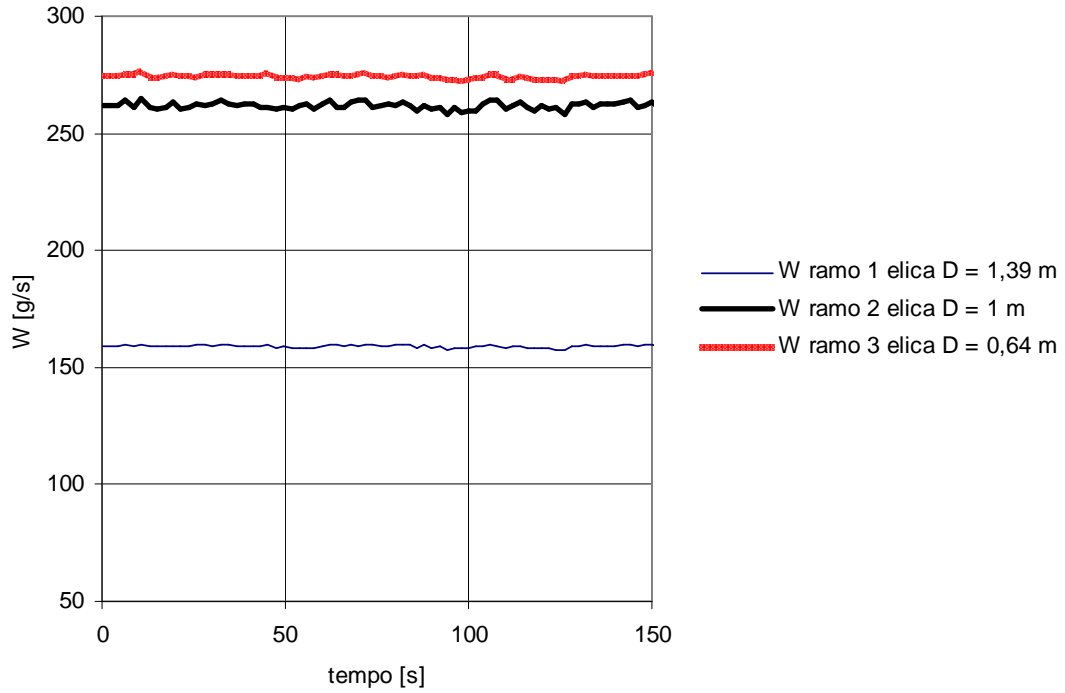
**Figura 303: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 100 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).**



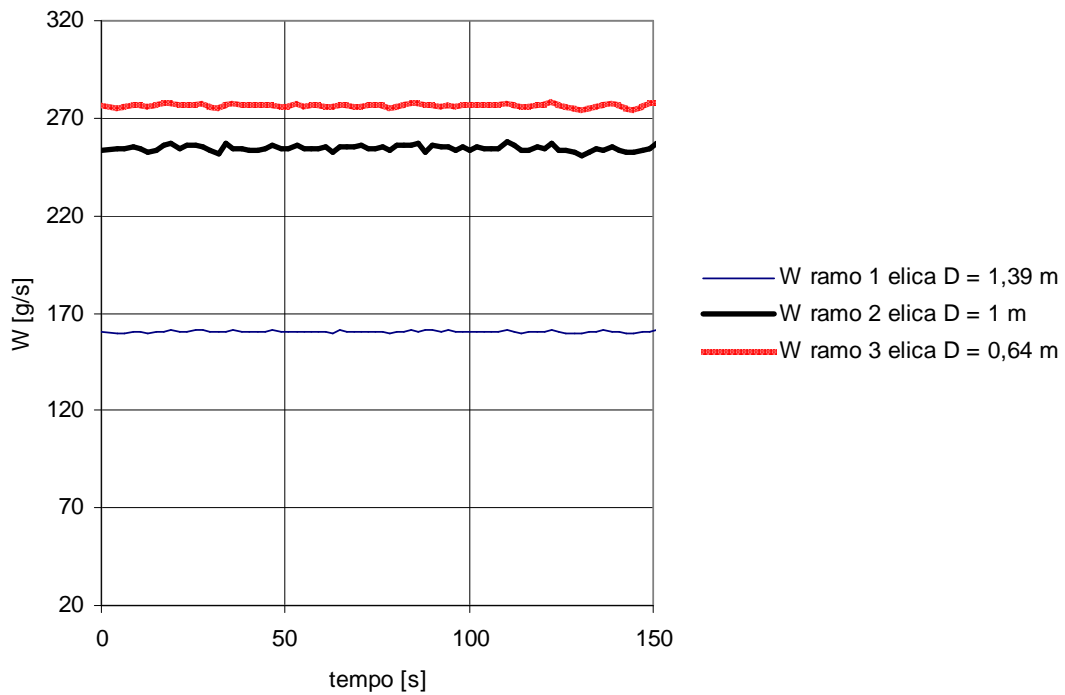
**Figura 304: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 200 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).**



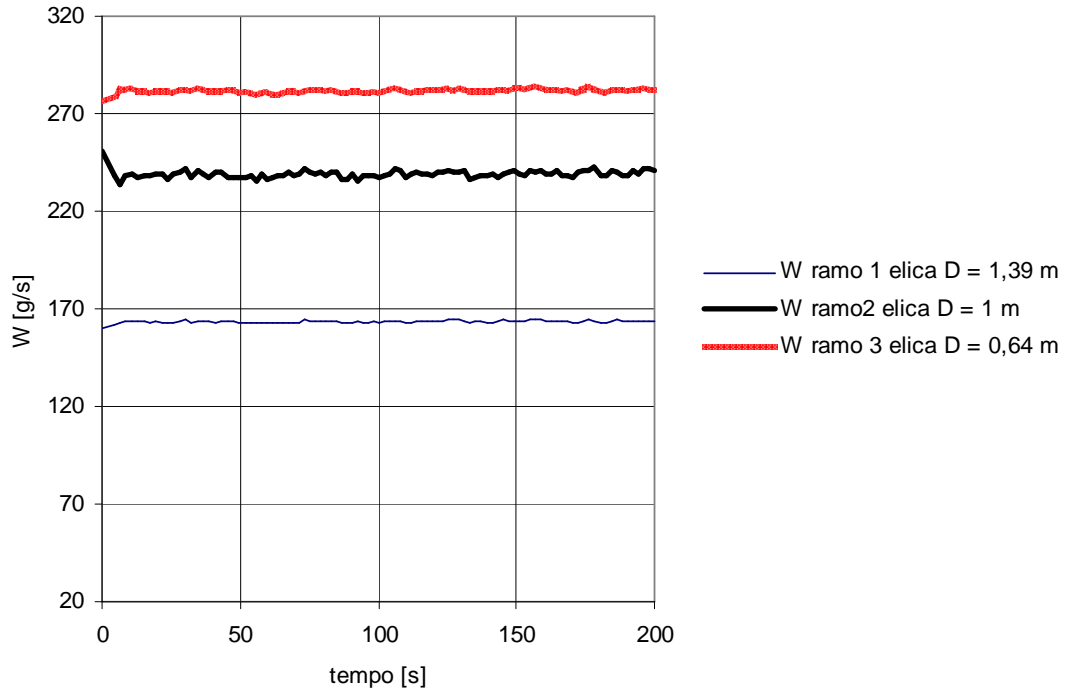
**Figura 305: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).**



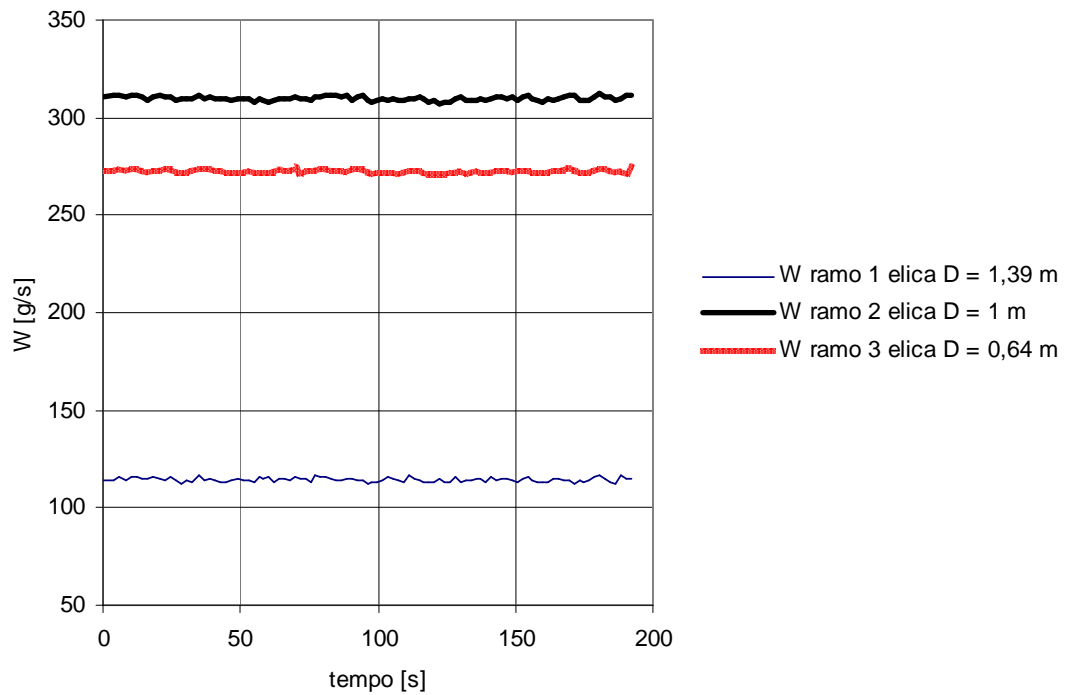
**Figura 306: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 100 l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).**



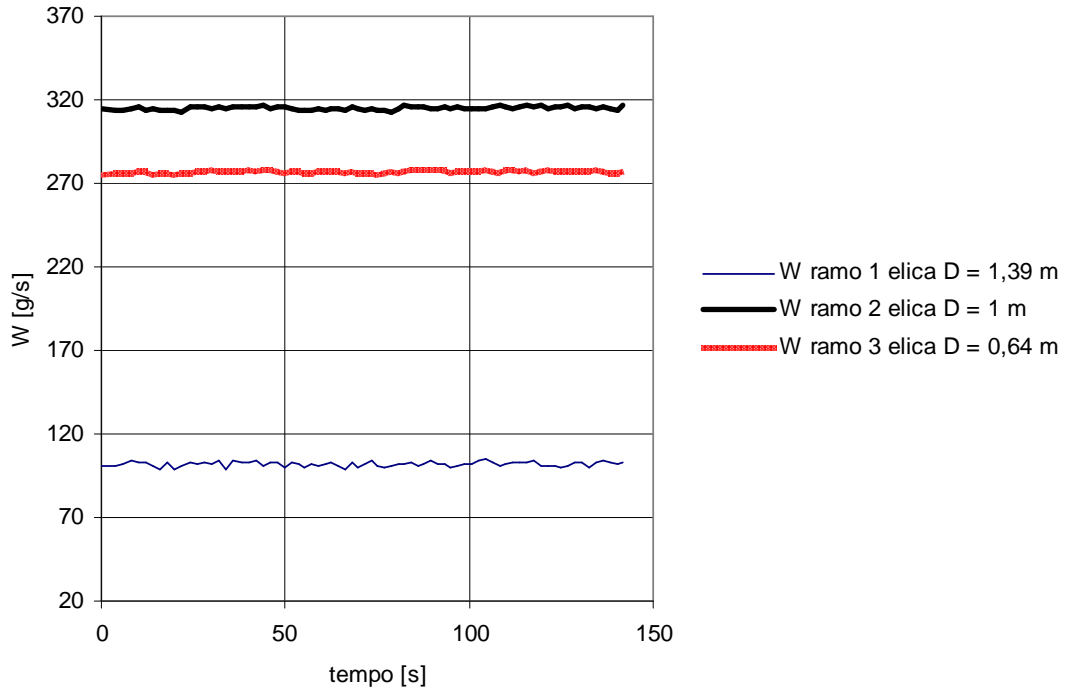
**Figura 307: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 200 l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**



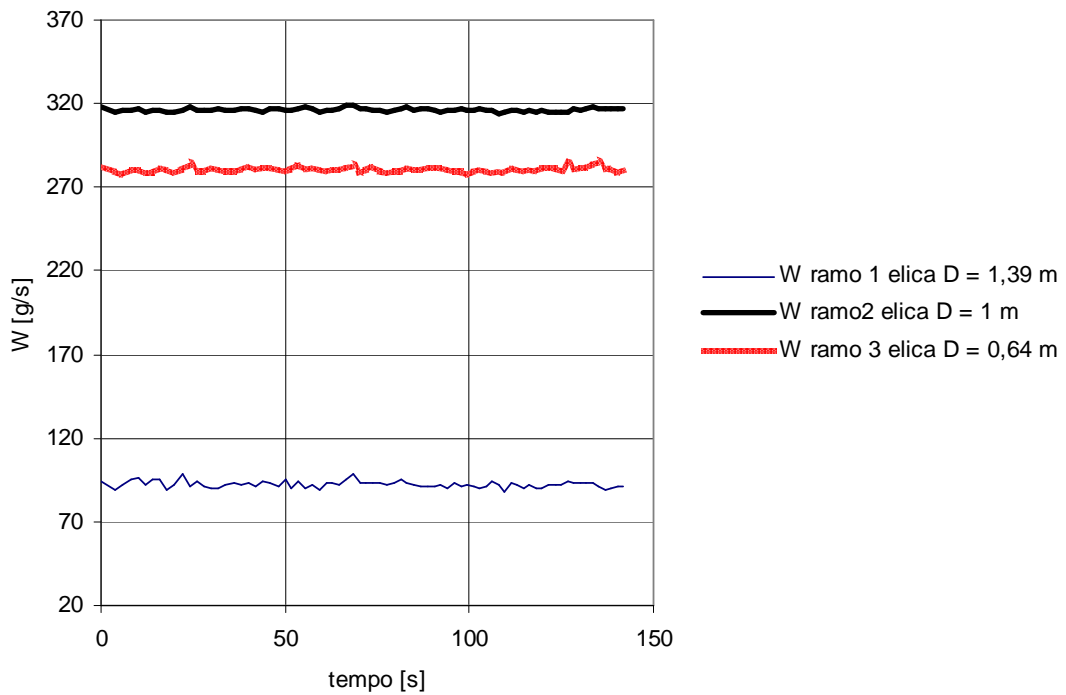
**Figura 308: Andamento della portata d’acqua nei canali  $W_{\text{aria}} = 300$  l/h  
Elica  $D = 1$  m in bifase Prove tipo I (Portata  $W_2$ ).**



**Figura 309: Andamento della portata d’acqua nei canali  $W_{\text{aria}} = 100$  l/h  
Elica  $D = 1,39$  m in bifase Prove tipo I (Portata  $W_2$ ).**

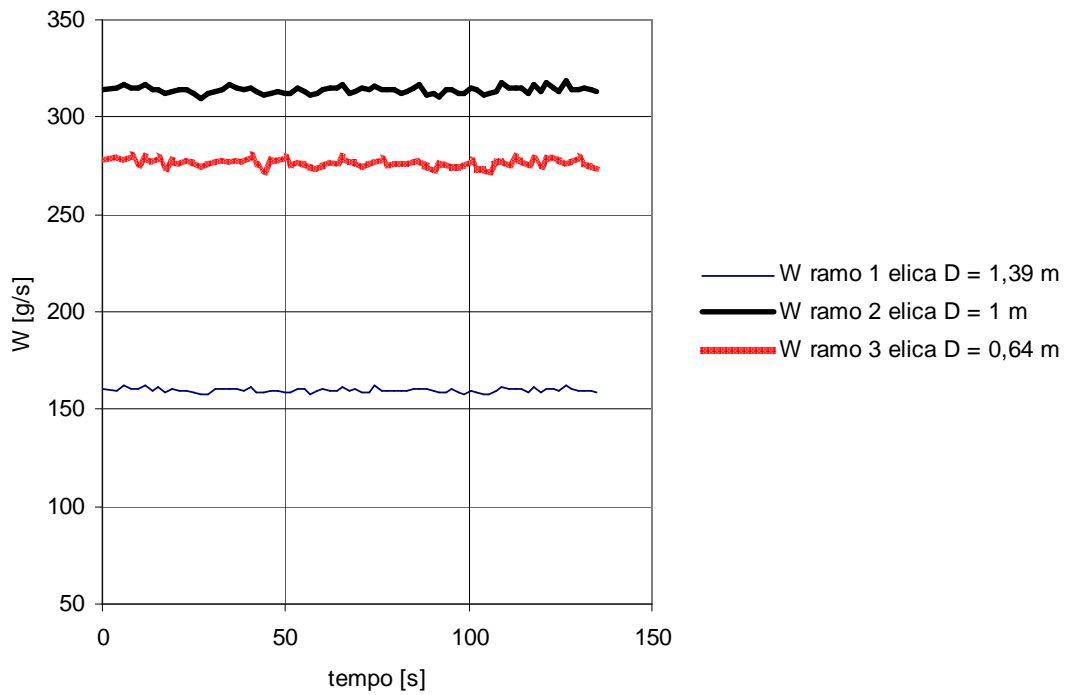


**Figura 310: Andamento della portata d’acqua nei canali  $W_{aria} = 200$  l/h  
Elica  $D = 1,39$  m in bifase Prove tipo I (Portata  $W_2$ ).**

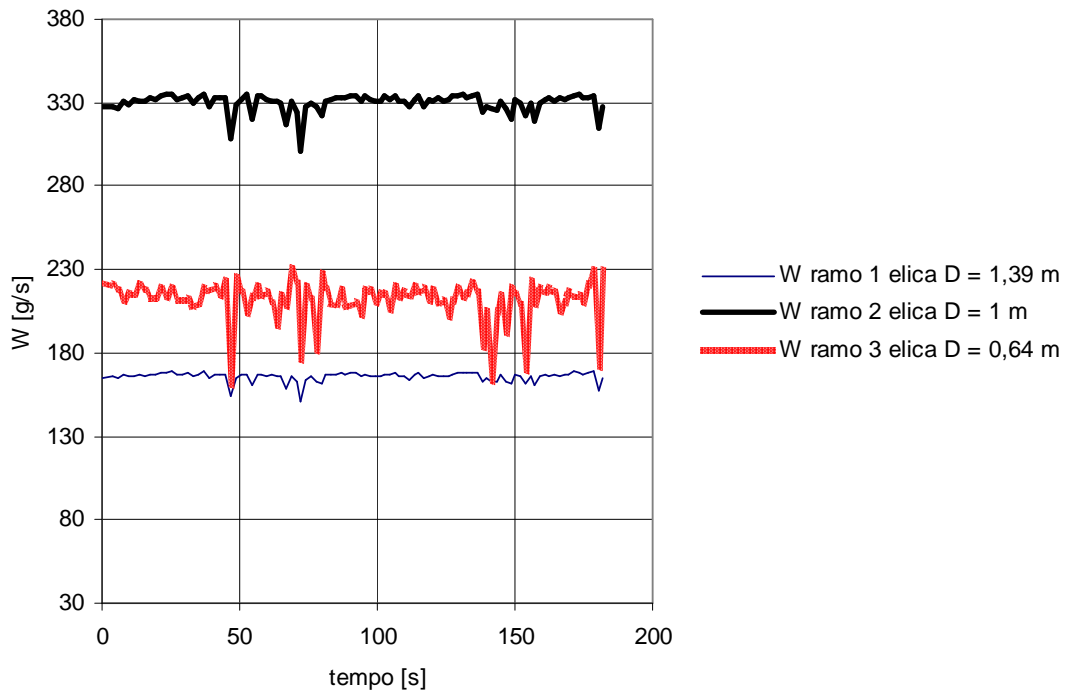


**Figura 311: Andamento della portata d’acqua nei canali  $W_{aria} = 300$  l/h  
Elica  $D = 1,39$  m in bifase Prove tipo I (Portata  $W_2$ ).**

• **Portata W3**

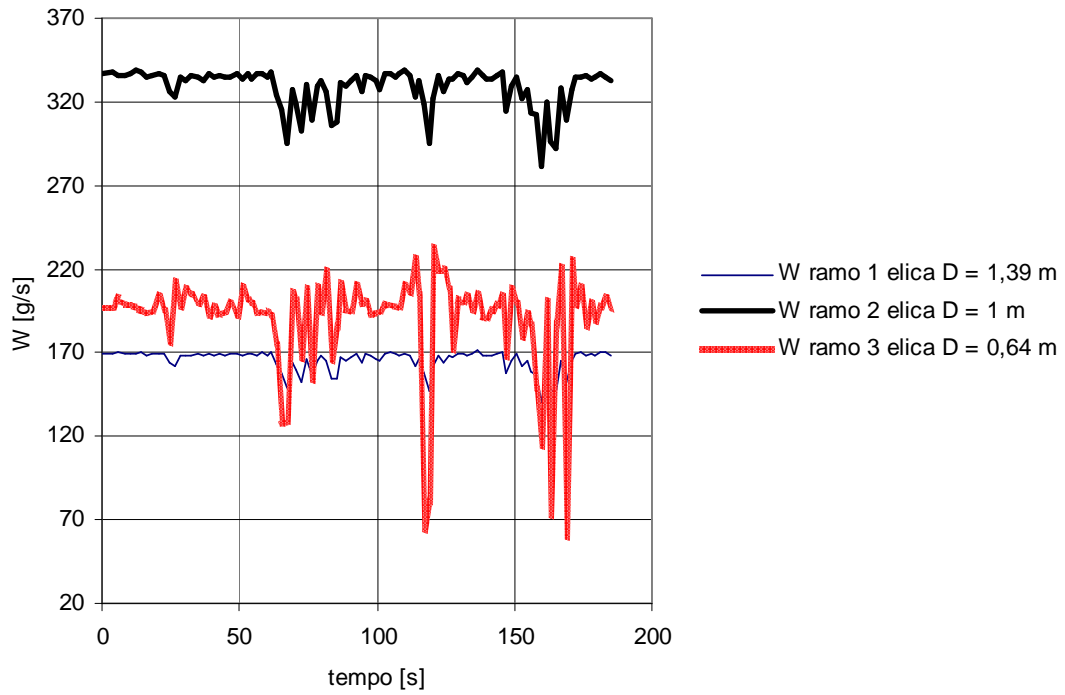


**Figura 312: Andamento della portata d'acqua nei canali caso monofase Prove tipo I (Portata W3).**

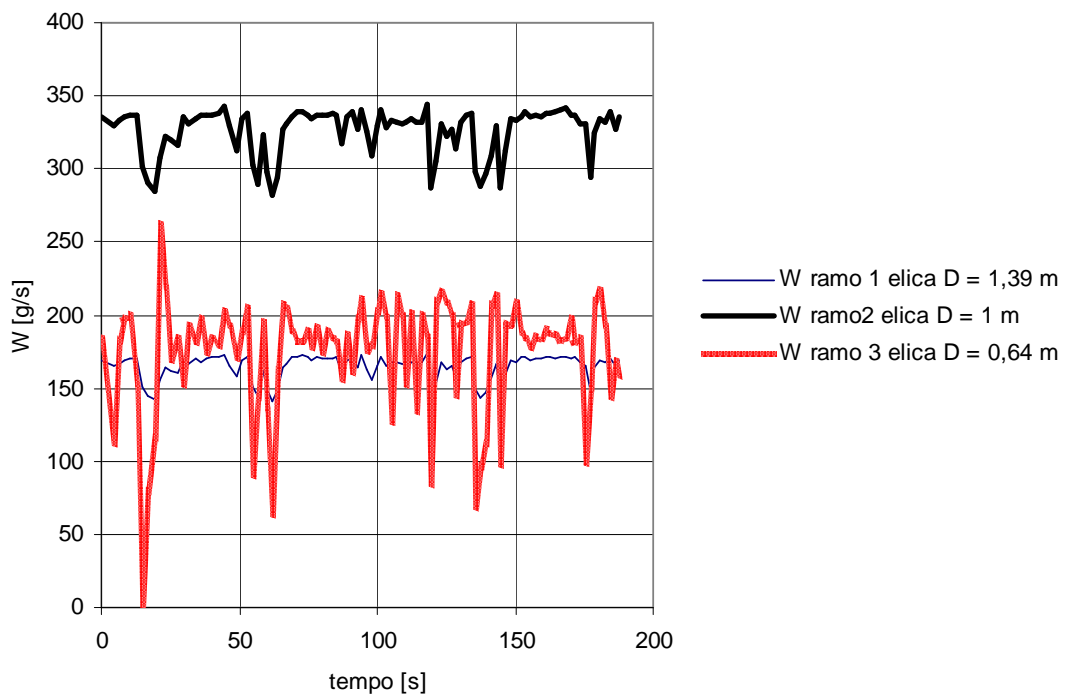


**Figura 313: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W$  aria = 100 l/h Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**

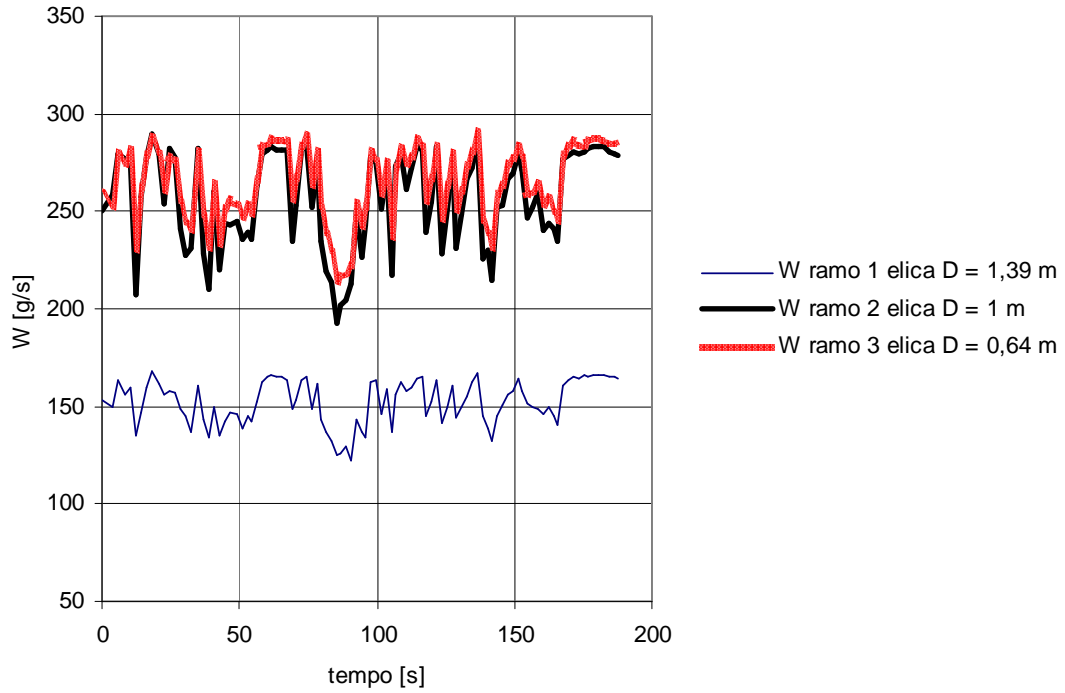




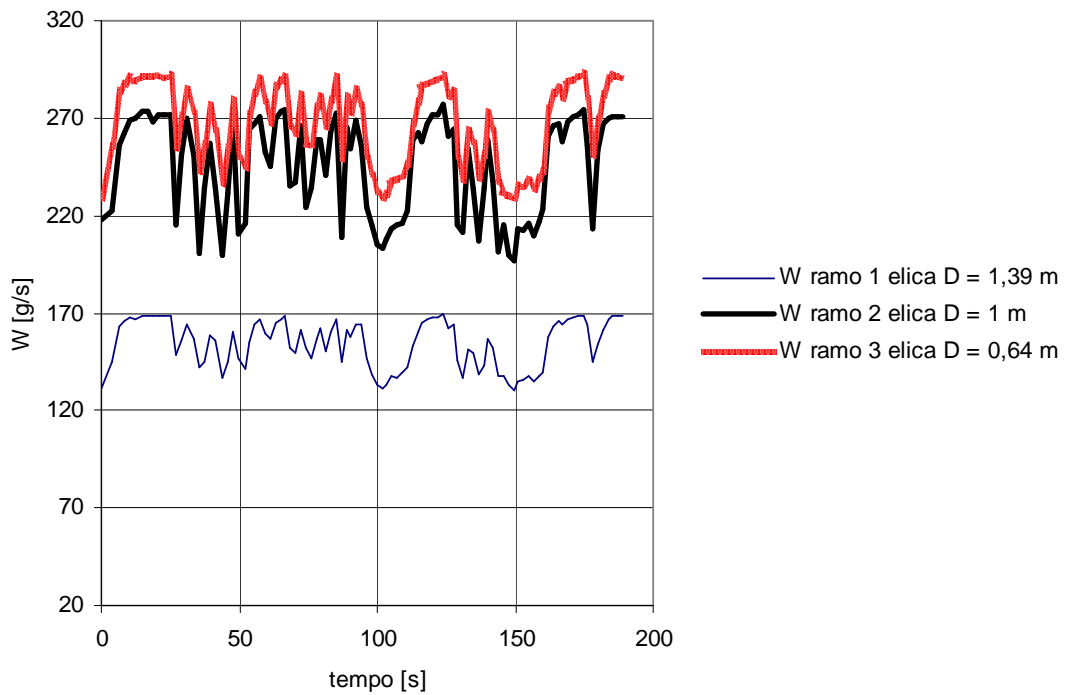
**Figura 314: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W_{\text{aria}} = 200$  l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**



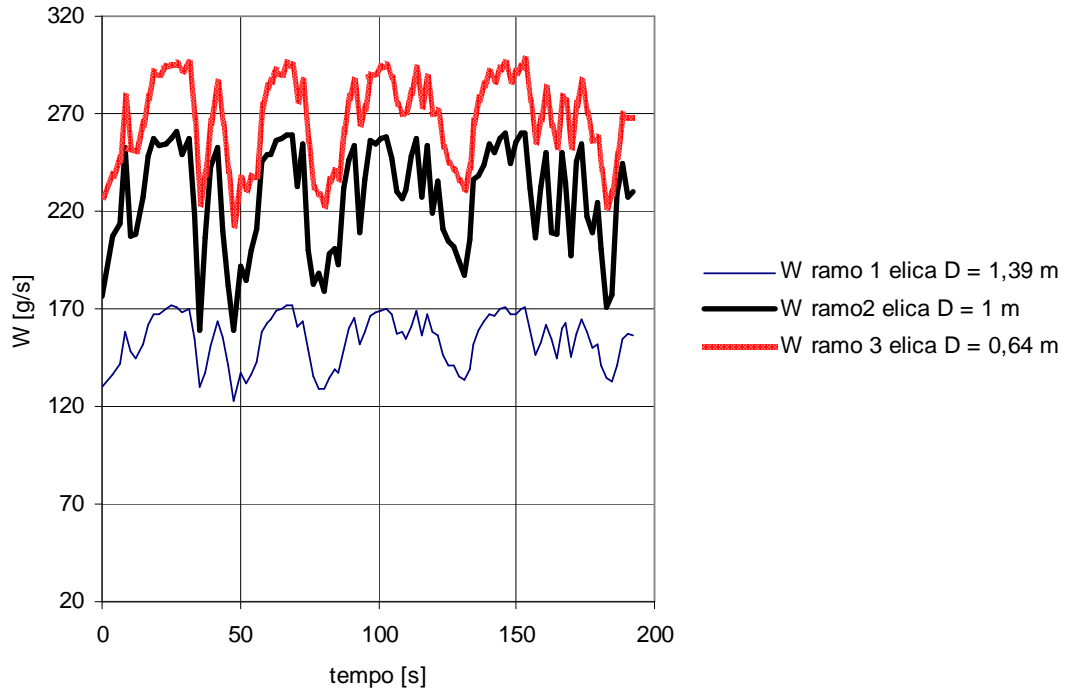
**Figura 315: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W_{\text{aria}} = 300$  l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**



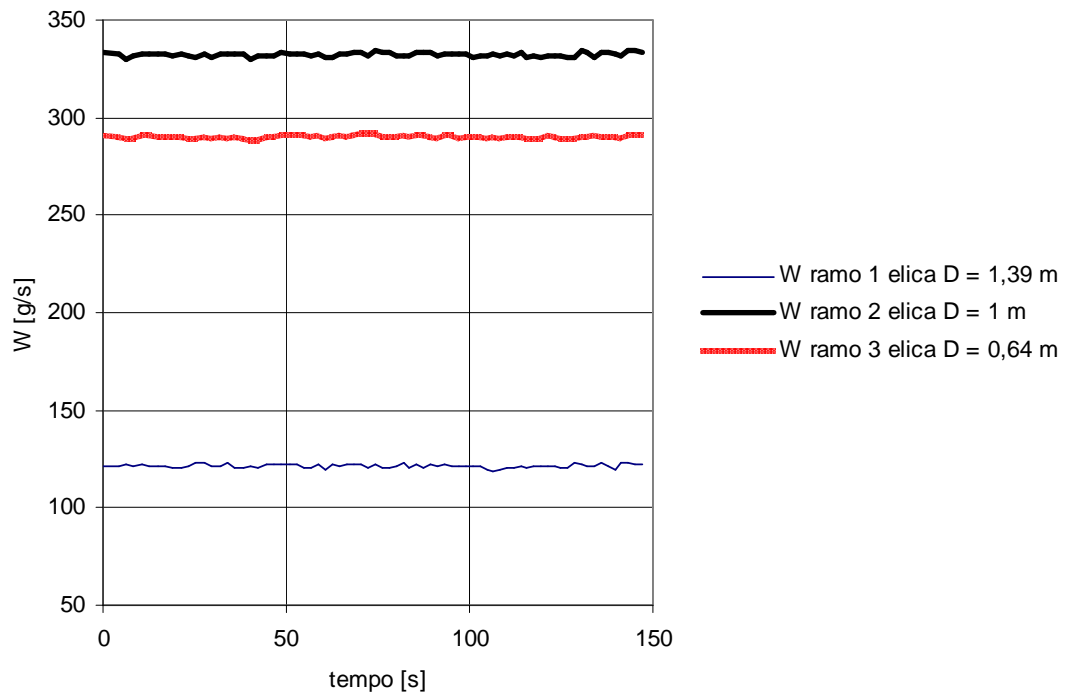
**Figura 316: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W_{\text{aria}} = 100$  l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**



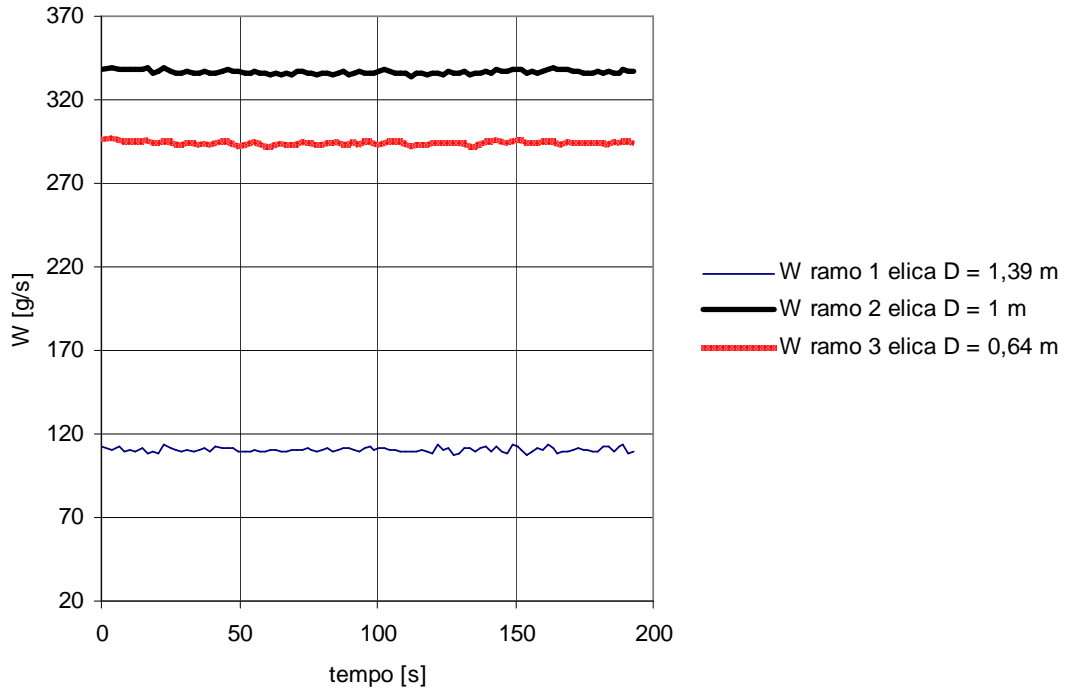
**Figura 317: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W_{\text{aria}} = 200$  l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**



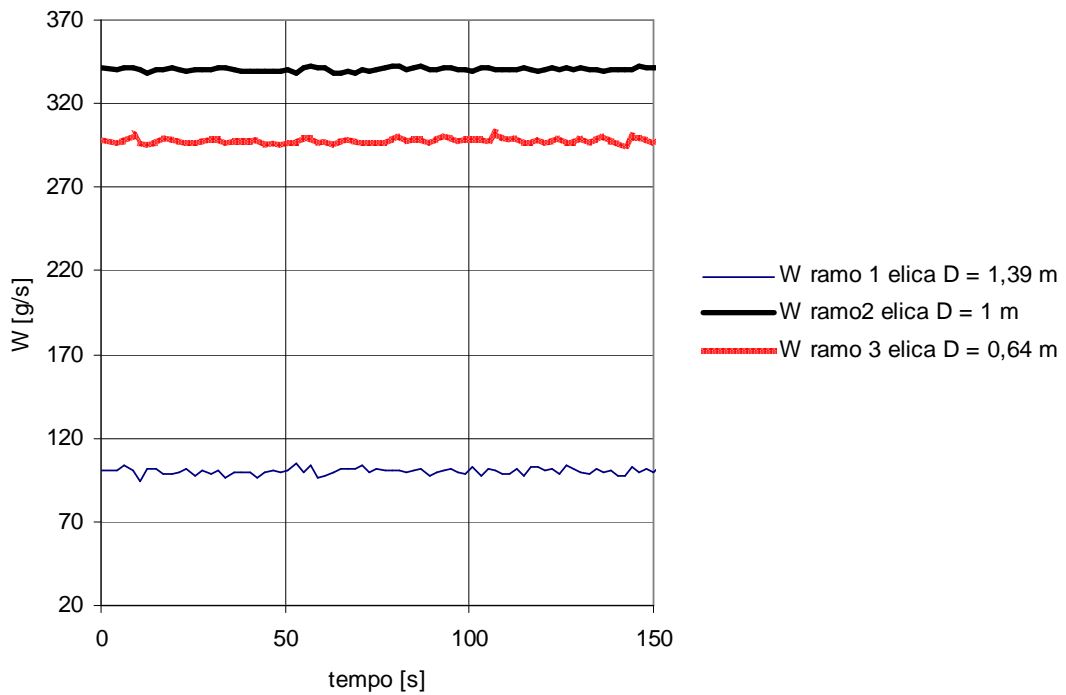
**Figura 318: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**



**Figura 319: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 100 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**

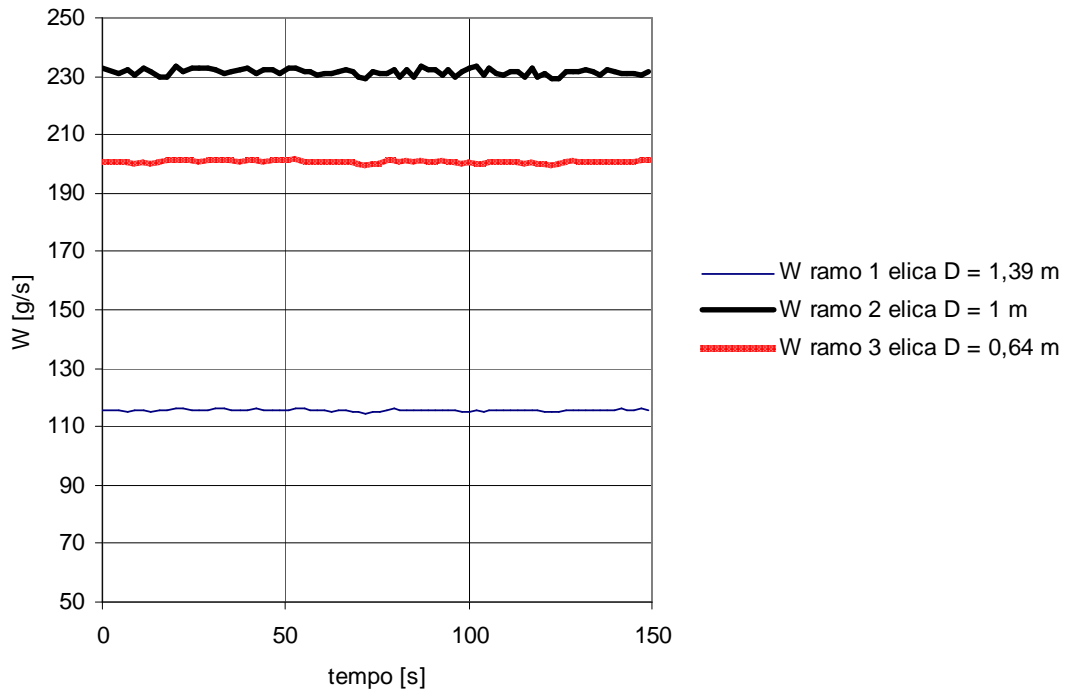


**Figura 320: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 200 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**

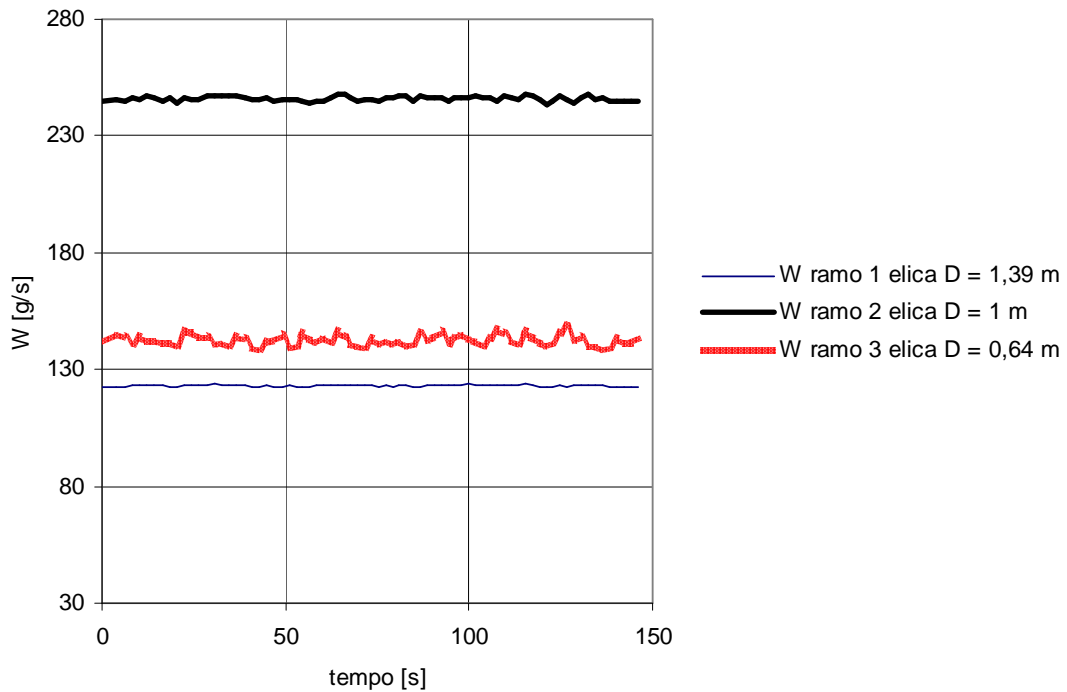


**Figura 321: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**

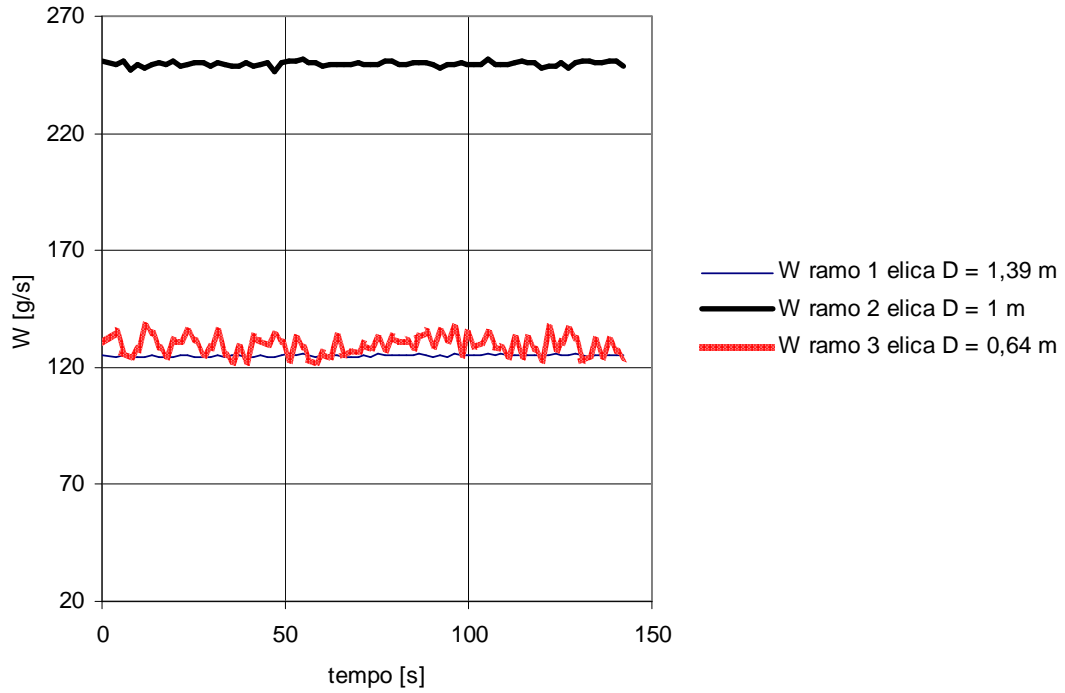
• **Portata W4**



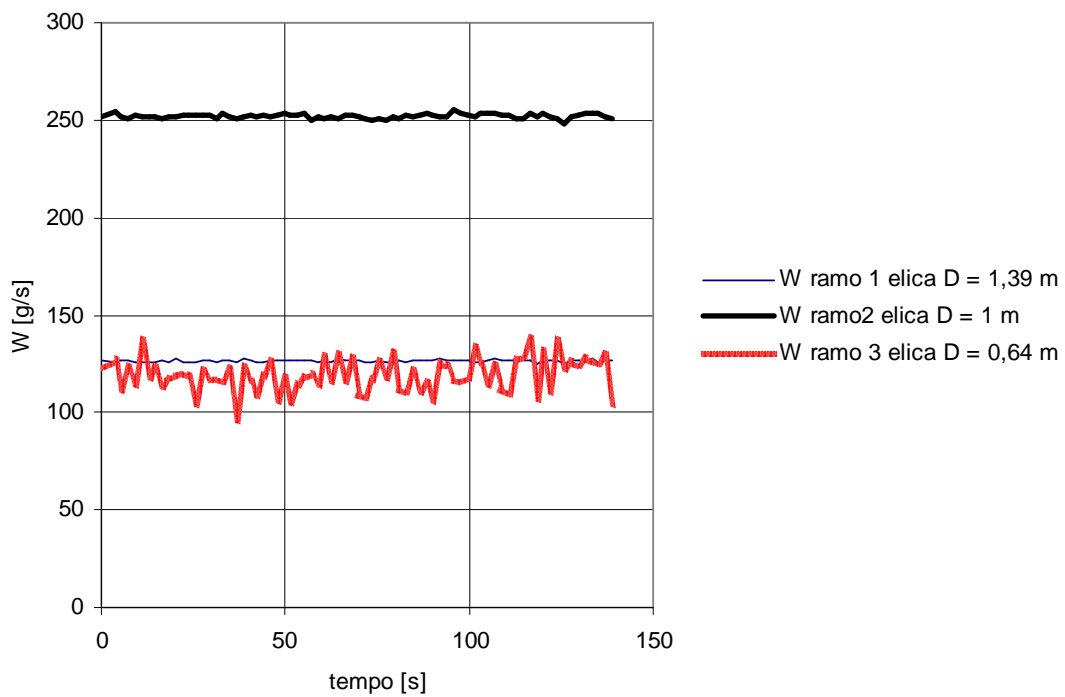
**Figura 322: Andamento della portata d'acqua nei canali caso monofase Prove tipo I (Portata W4).**



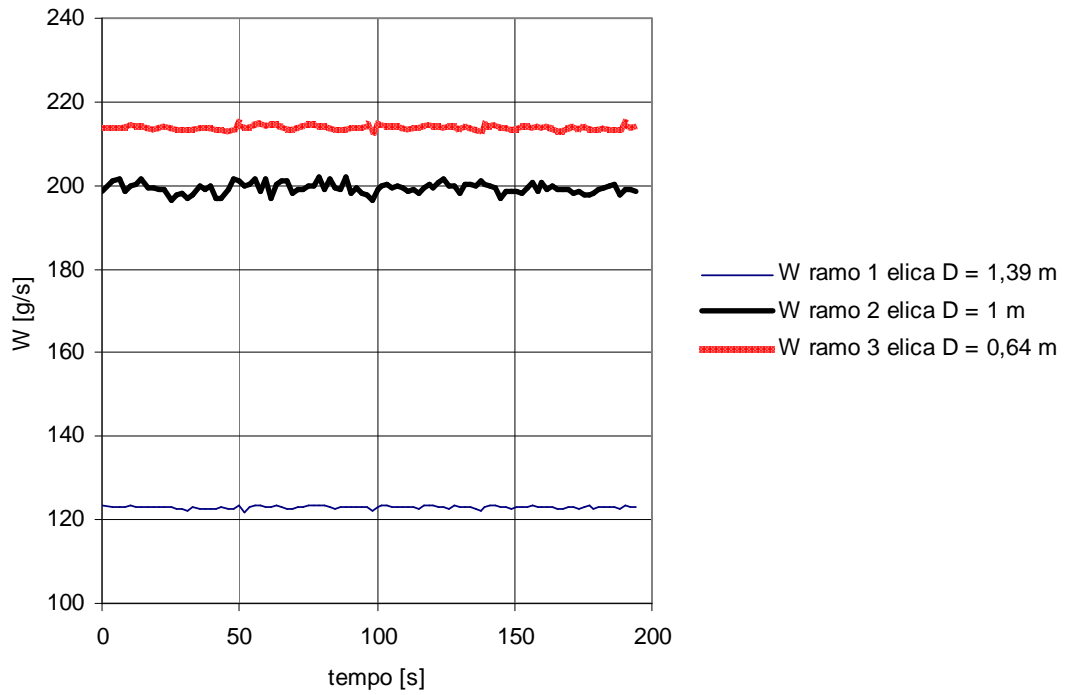
**Figura 323: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 100 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**



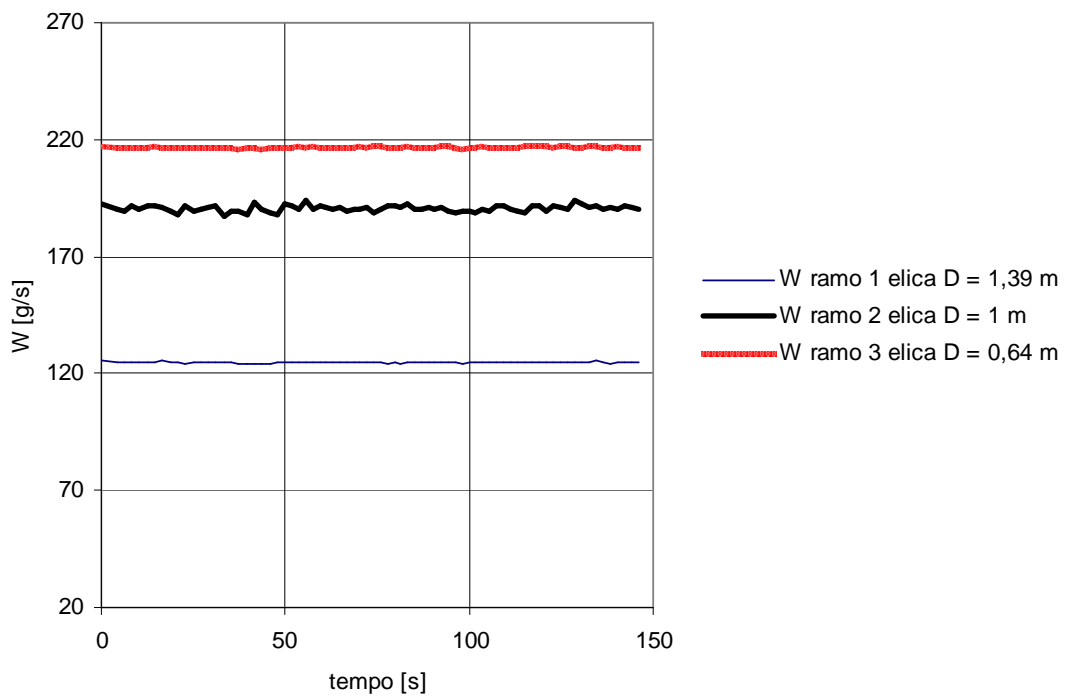
**Figura 324: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 200 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**



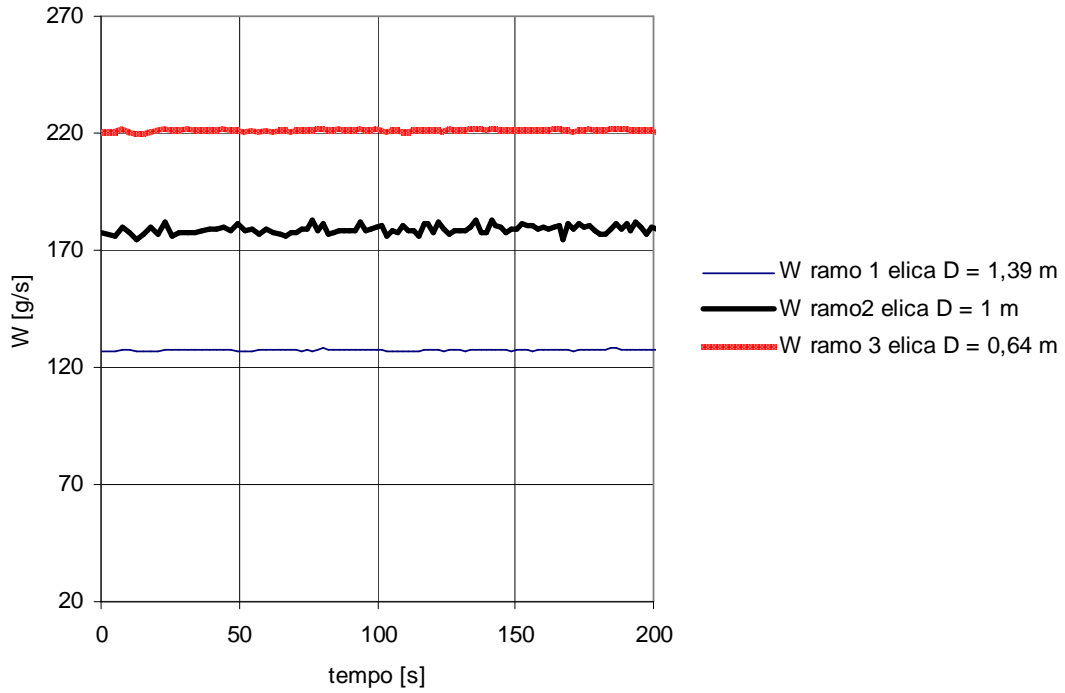
**Figura 325: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**



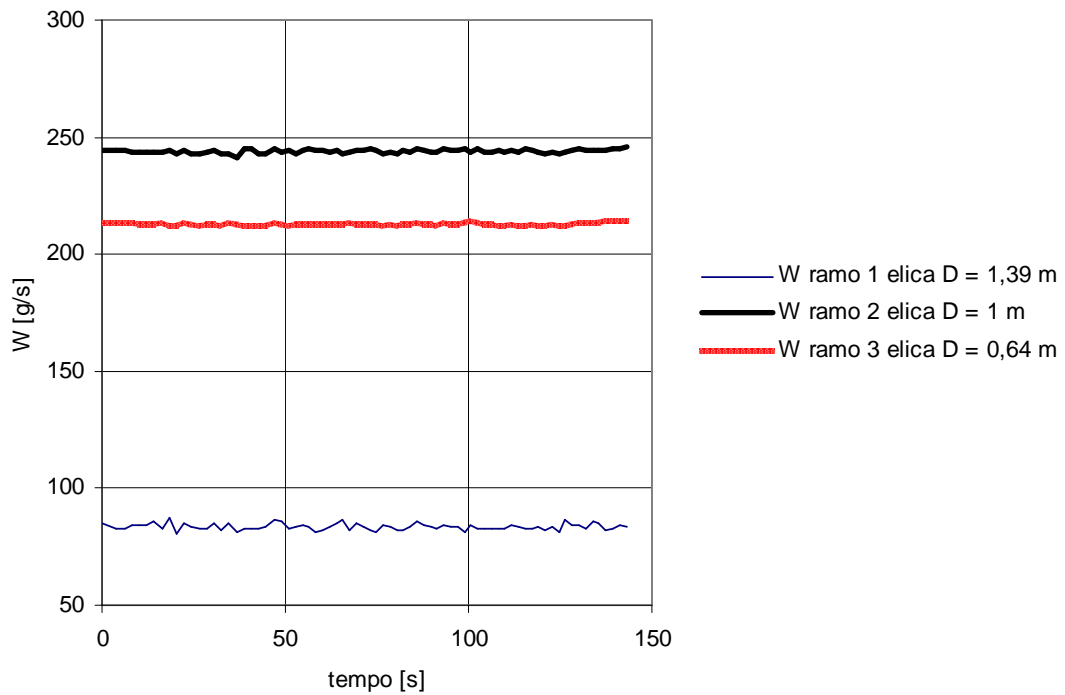
**Figura 326: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 100 l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**



**Figura 327: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 200 l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**

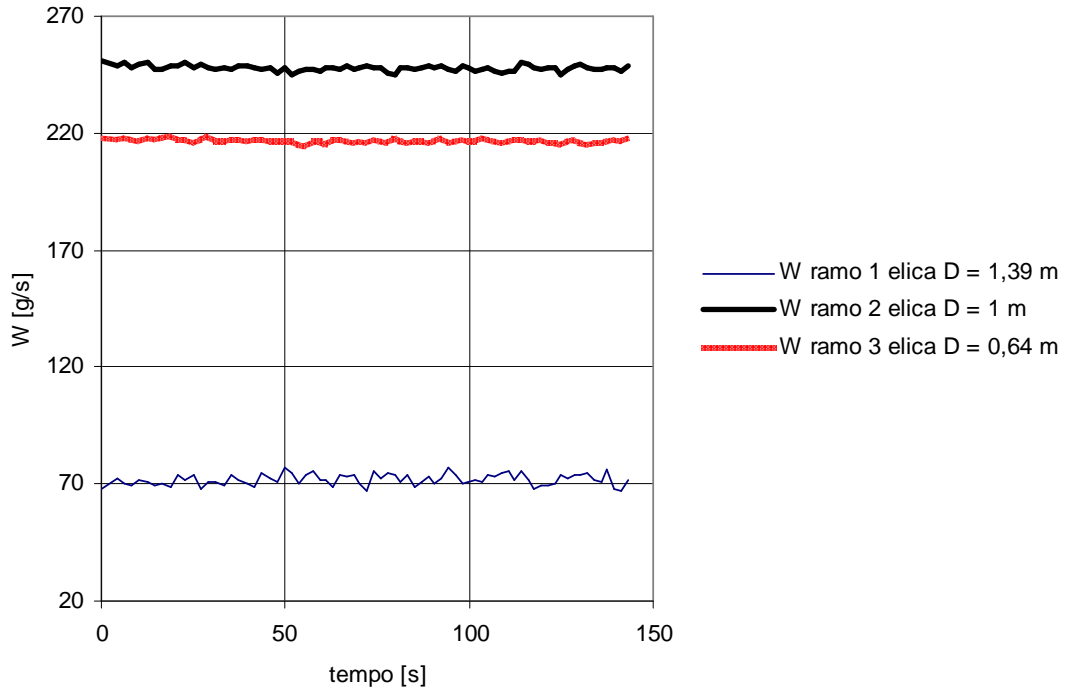


**Figura 328: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**

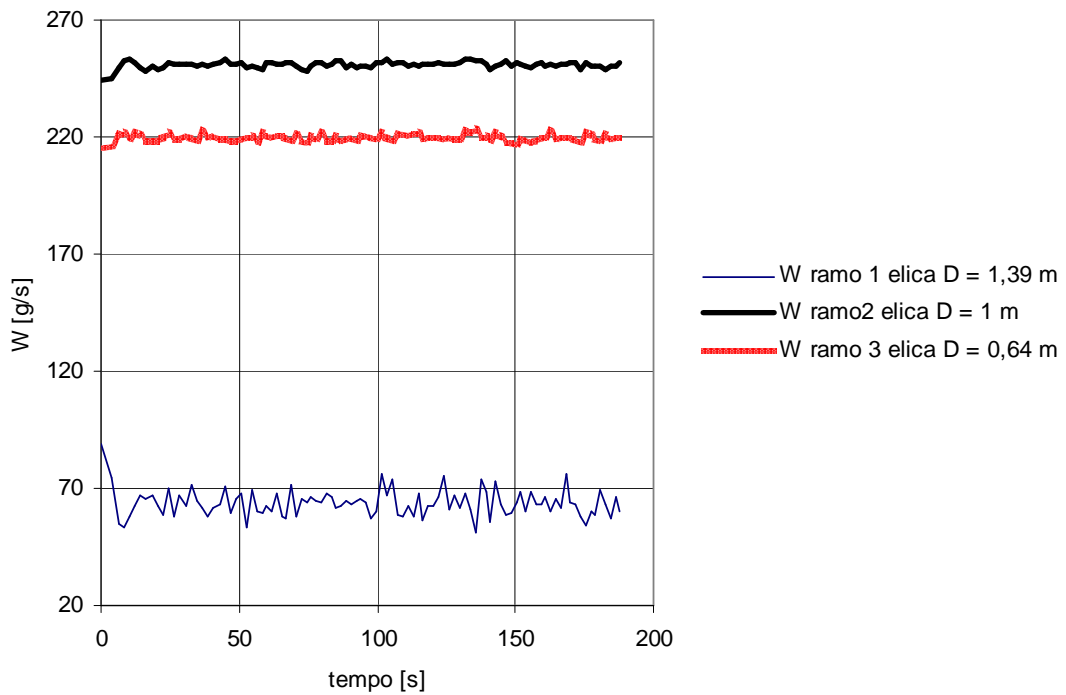


**Figura 329: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 100 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**





**Figura 330: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 200 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**



**Figura 331: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**

### 8.1.2 Distribuzione delle portate nei canali Prove II Caso 1.

Come già detto in precedenza per questa tipologia di prove si è imposto un deflusso bifase nelle tre eliche contemporaneamente.

Anche in questo caso si riportano, da Figura 332 a Figura 347, gli andamenti della portata d'acqua nei canali in funzione del tempo per le quattro portate d'acqua totali analizzate e per le diverse portate d'aria imposte nelle sezioni di prova.

- **Portata W1**

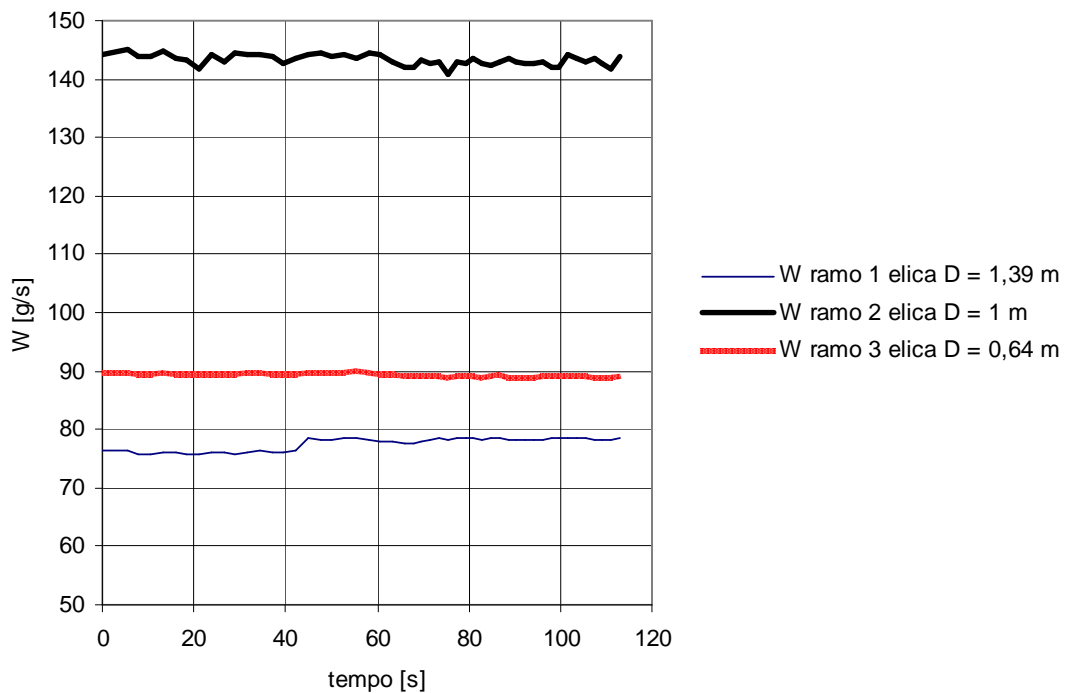
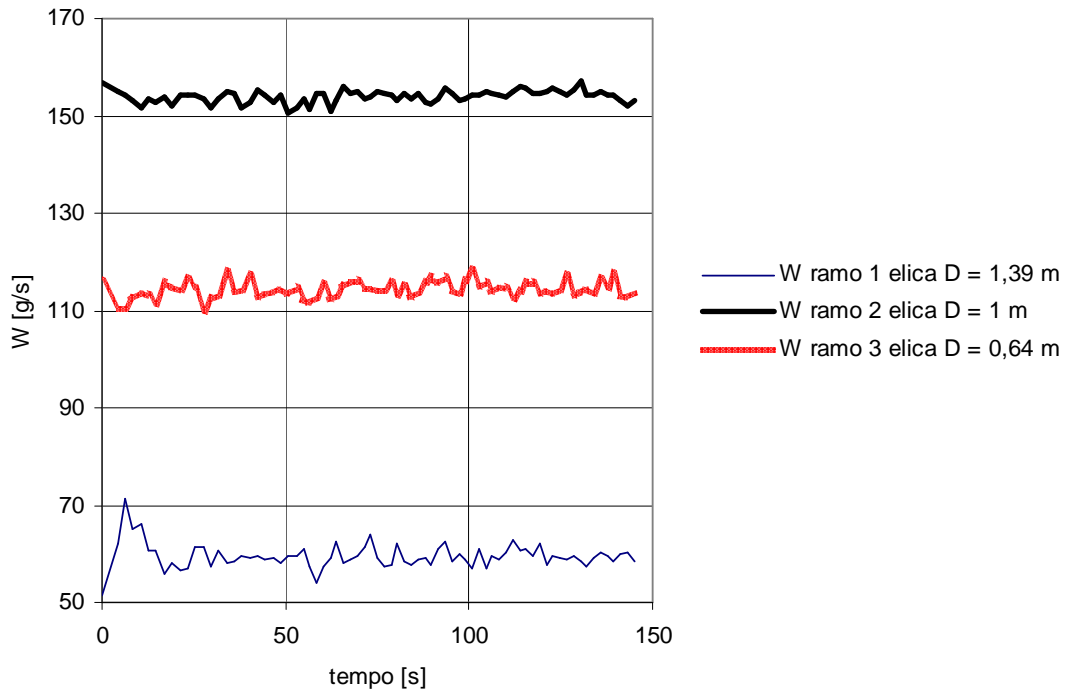
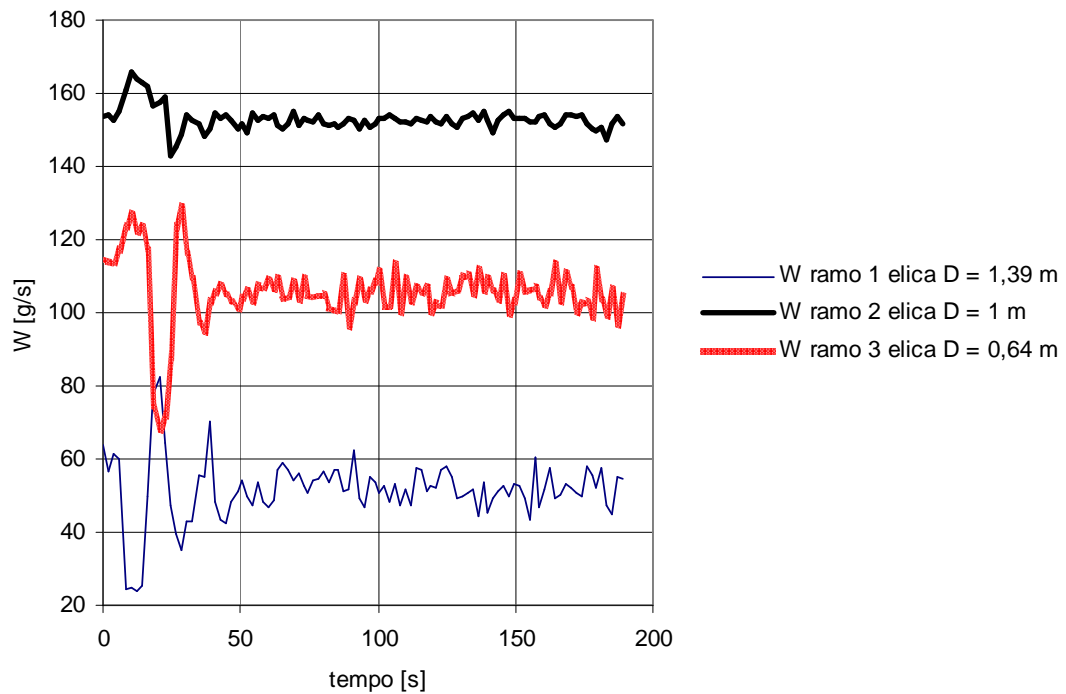


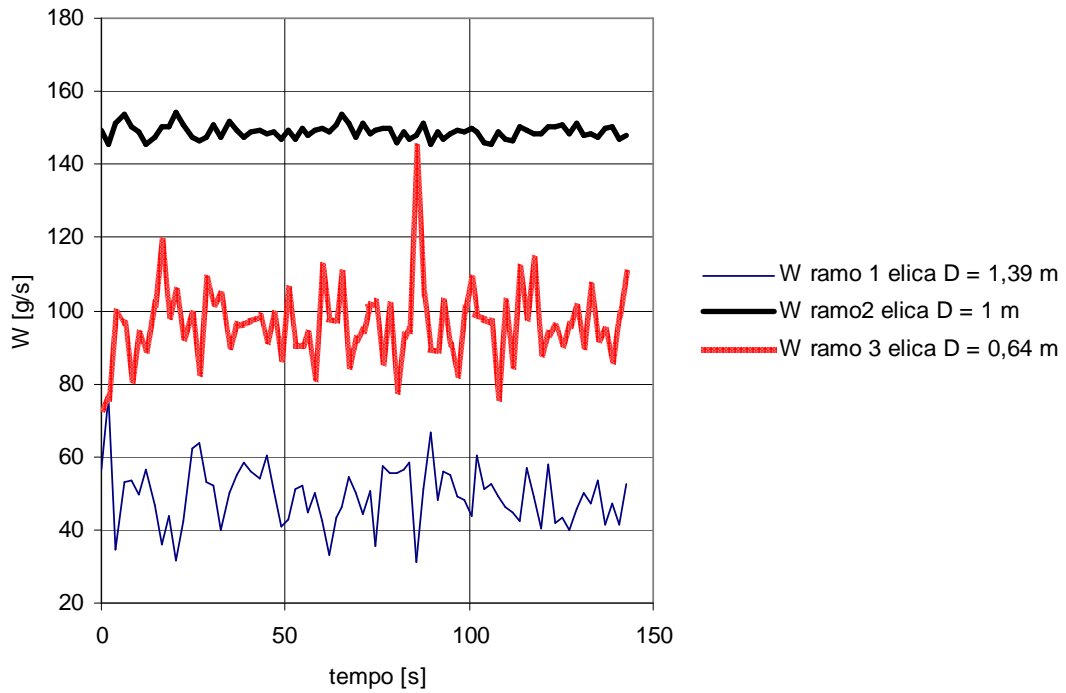
Figura 332: Andamento portata d'acqua canali caso monofase Prove tipo II Caso 1 (PortataW1).



**Figura 333: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W$  aria = 100 l/h Prove tipo II (Portata W1).**

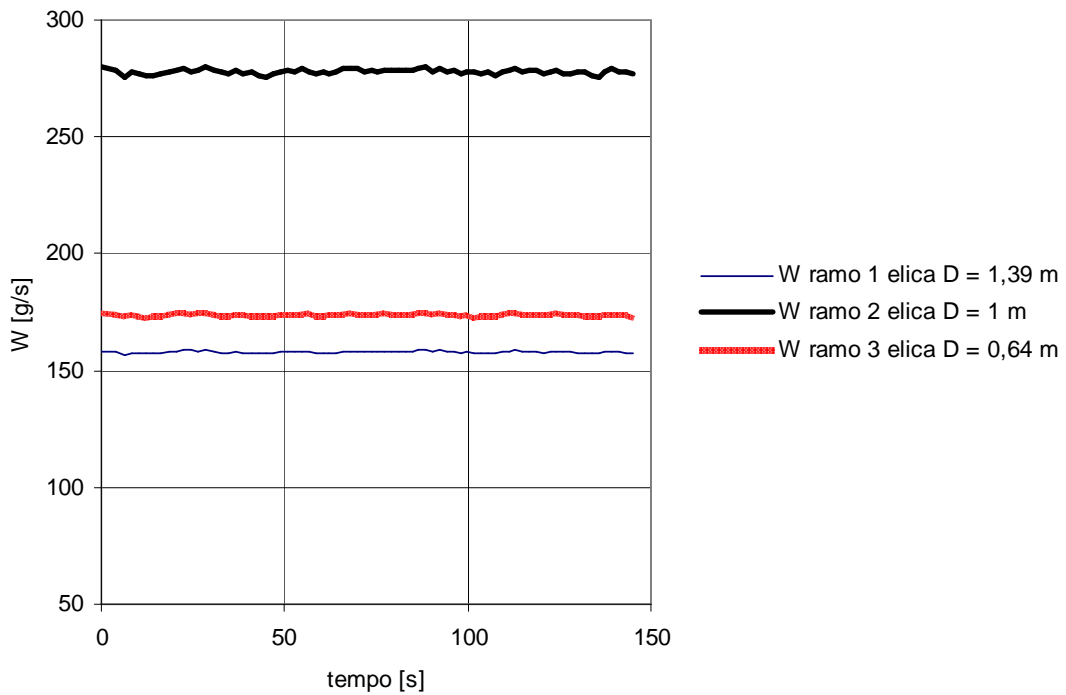


**Figura 334: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W$  aria = 200 l/h Prove tipo II (Portata W1).**

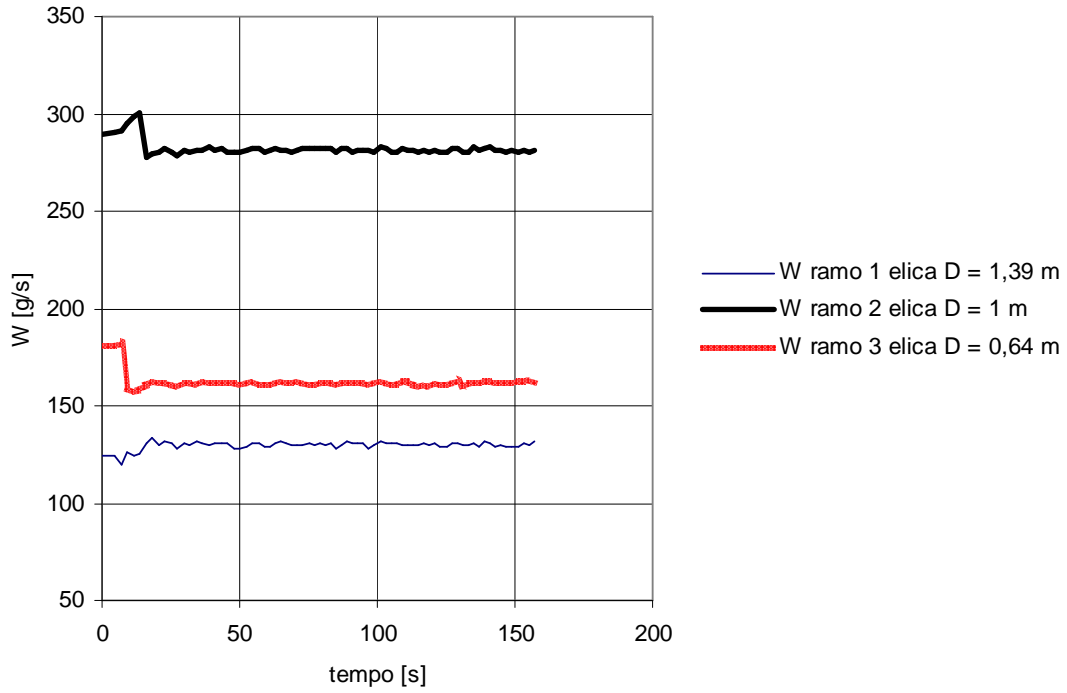


**Figura 335: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h Prove tipo II (Portata W1).**

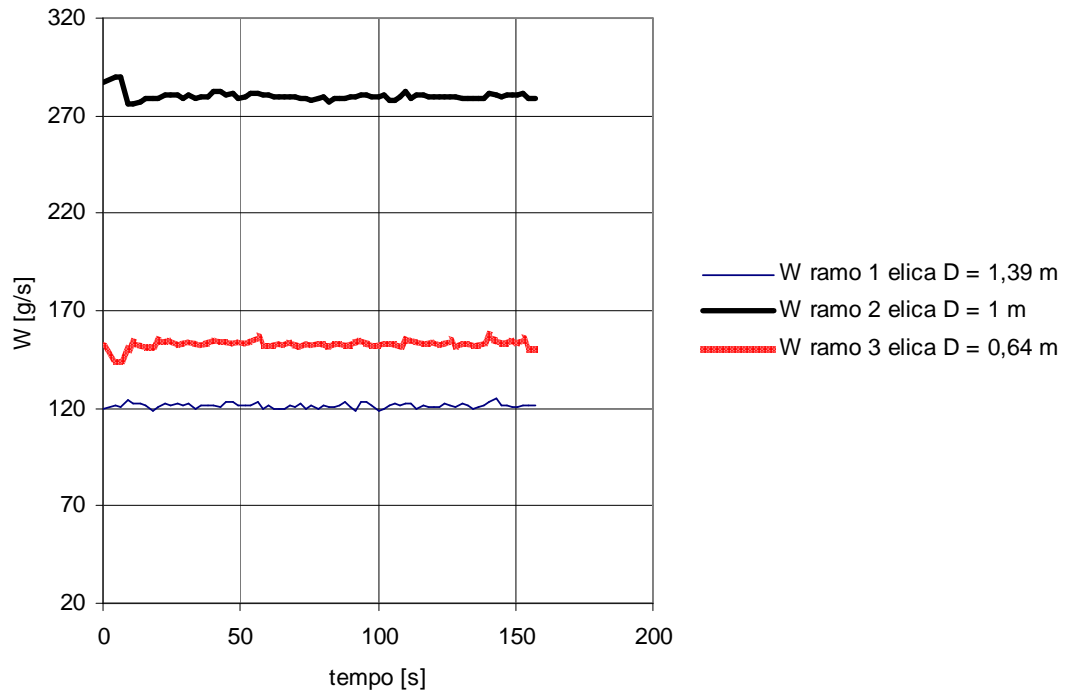
- **Portata W2**



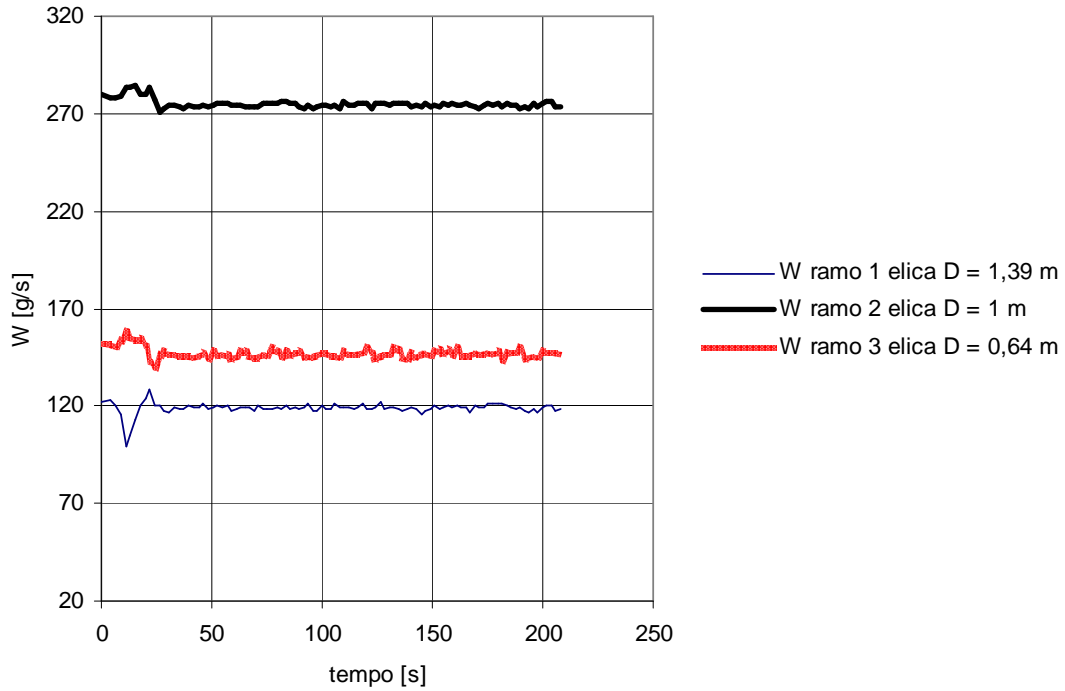
**Figura 336: Andamento portata d'acqua canali caso monofase Prove tipo II Caso A (Portata W2).**



**Figura 337: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W_{aria} = 100$  l/h Prove tipo II (Portata  $W_2$ ).**

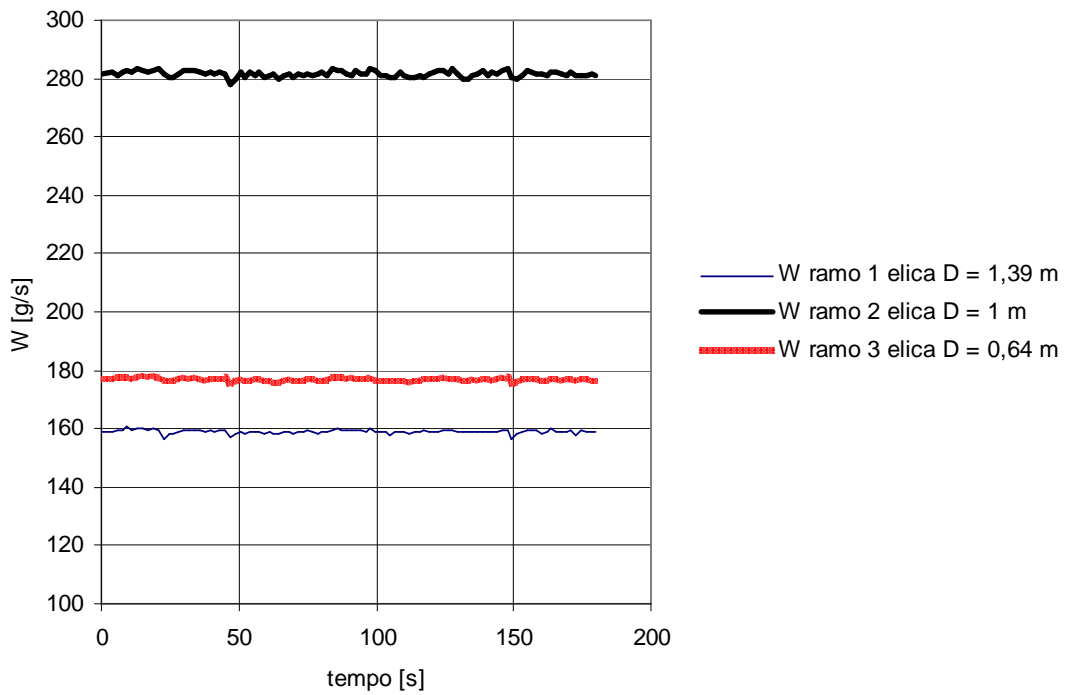


**Figura 338: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W_{aria} = 200$  l/h Prove tipo II (Portata  $W_2$ ).**

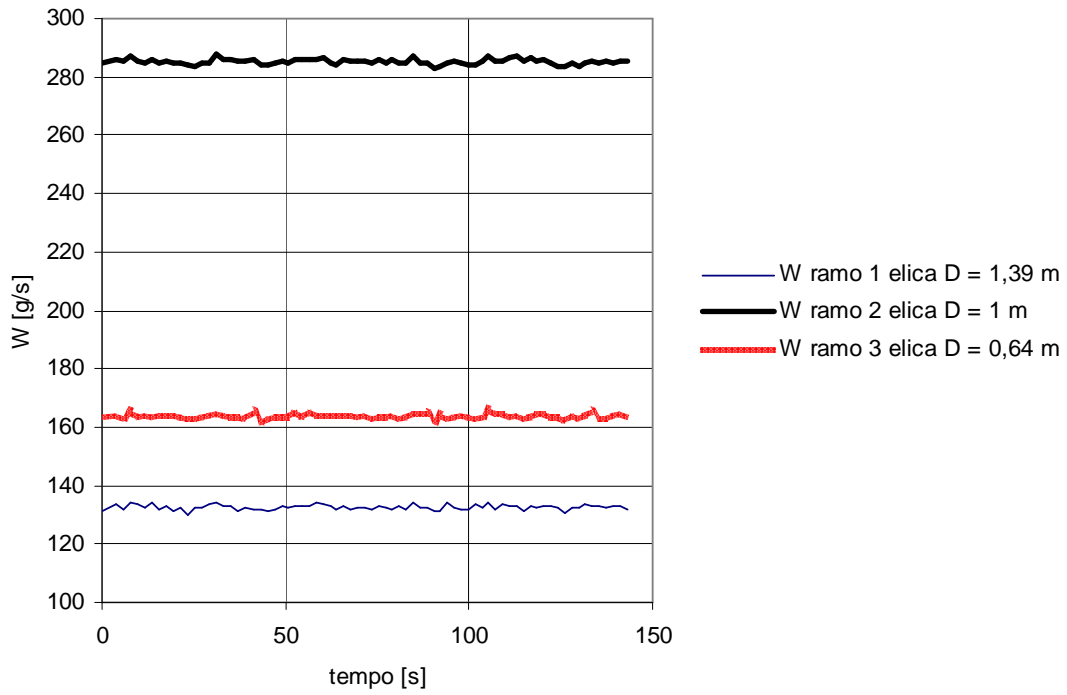


**Figura 339: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h Prove tipo II (Portata W2).**

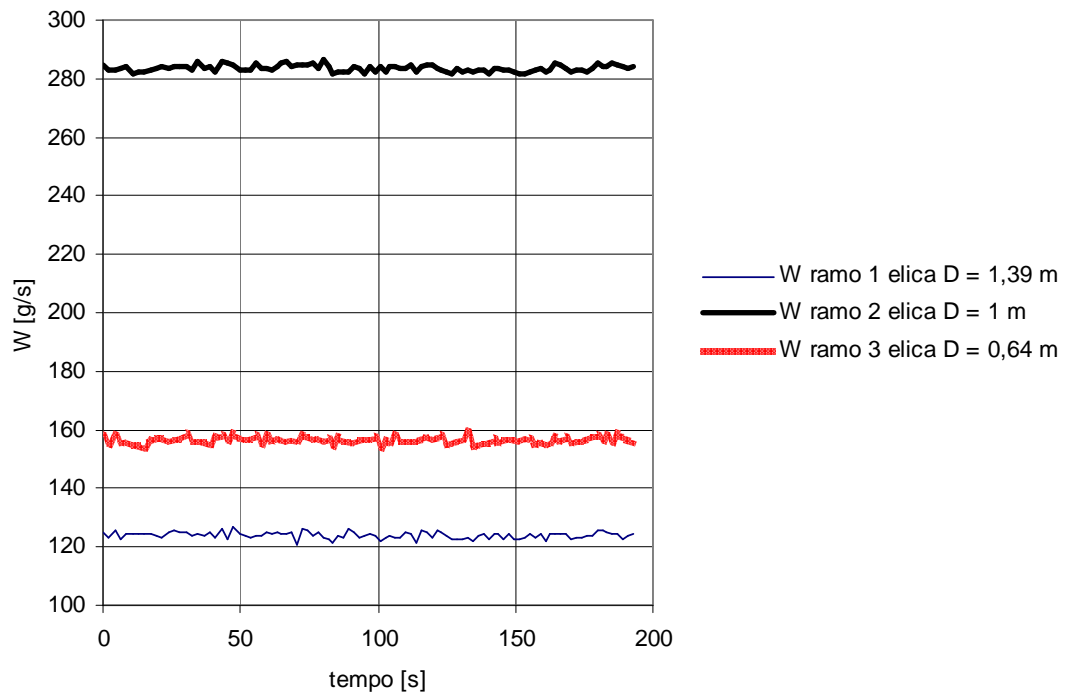
- Portata W3**



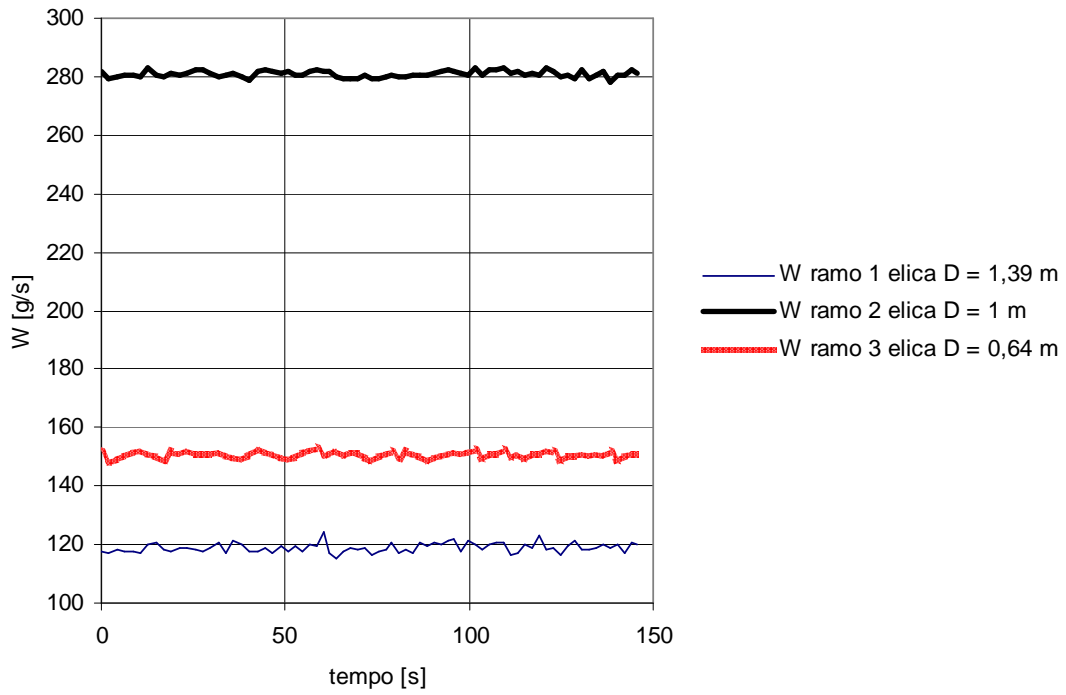
**Figura 340: Andamento portata d'acqua canali caso monofase Prove tipo II Caso A (Portata W3).**



**Figura 341: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 100 l/h Prove tipo II (Portata W3).**

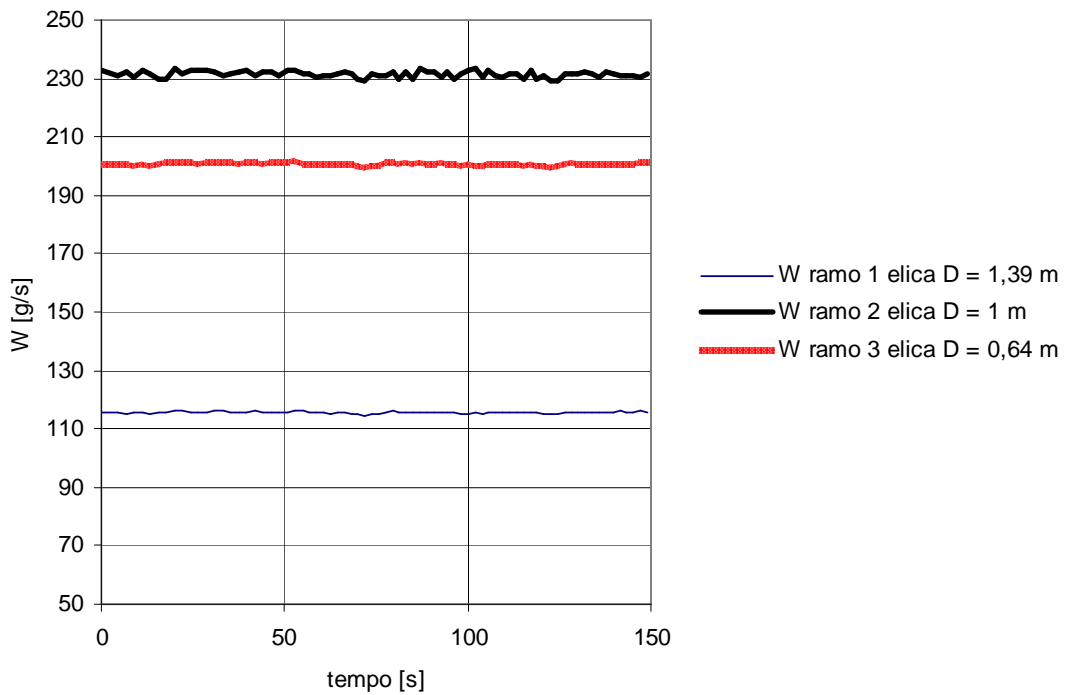


**Figura 342: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 200 l/h Prove tipo II (Portata W3).**



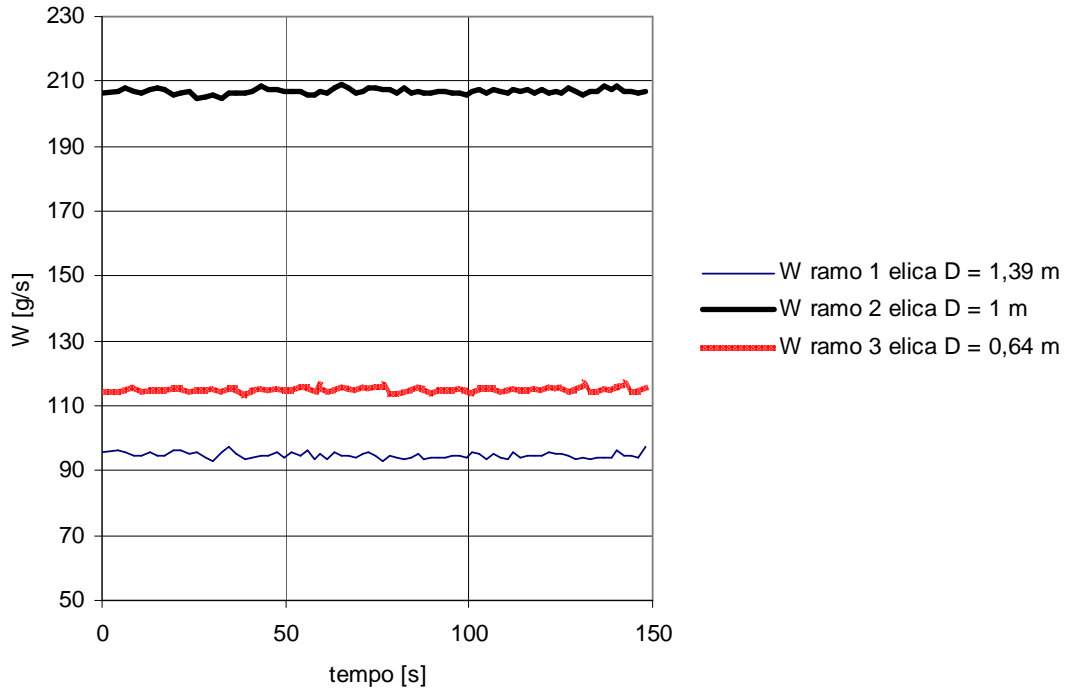
**Figura 343: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W$  aria = 300 l/h Prove tipo II (Portata W3).**

- **Portata W4**

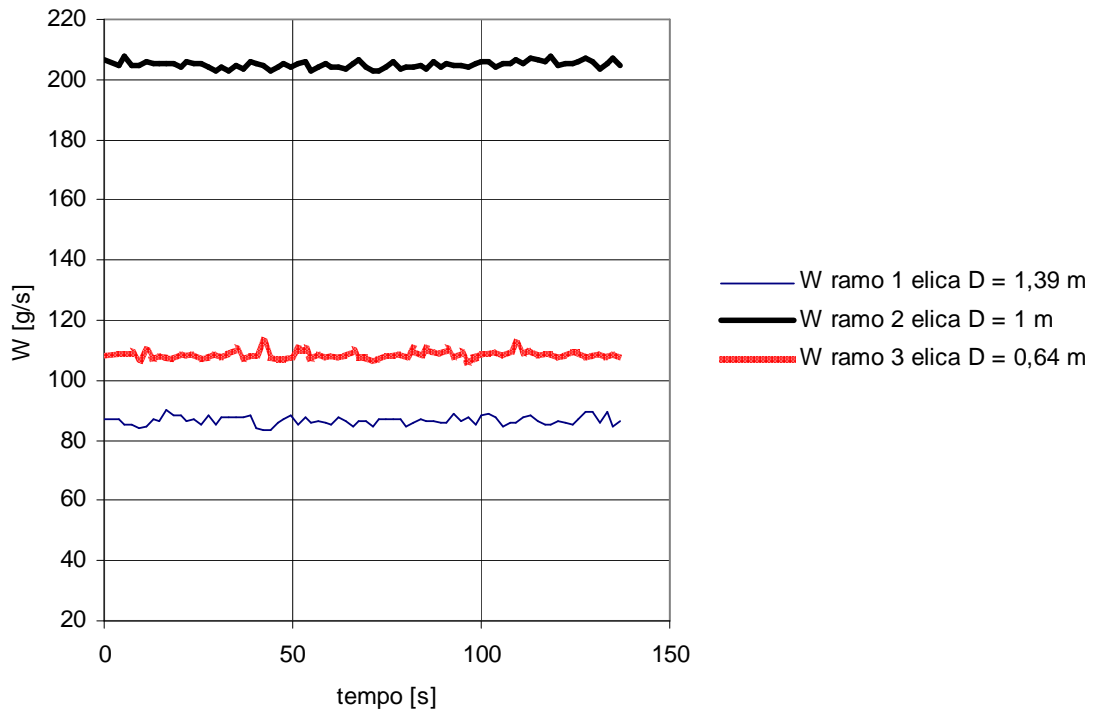


**Figura 344: Andamento portata d'acqua canali caso monofase Prove tipo II Caso A (Portata W4).**

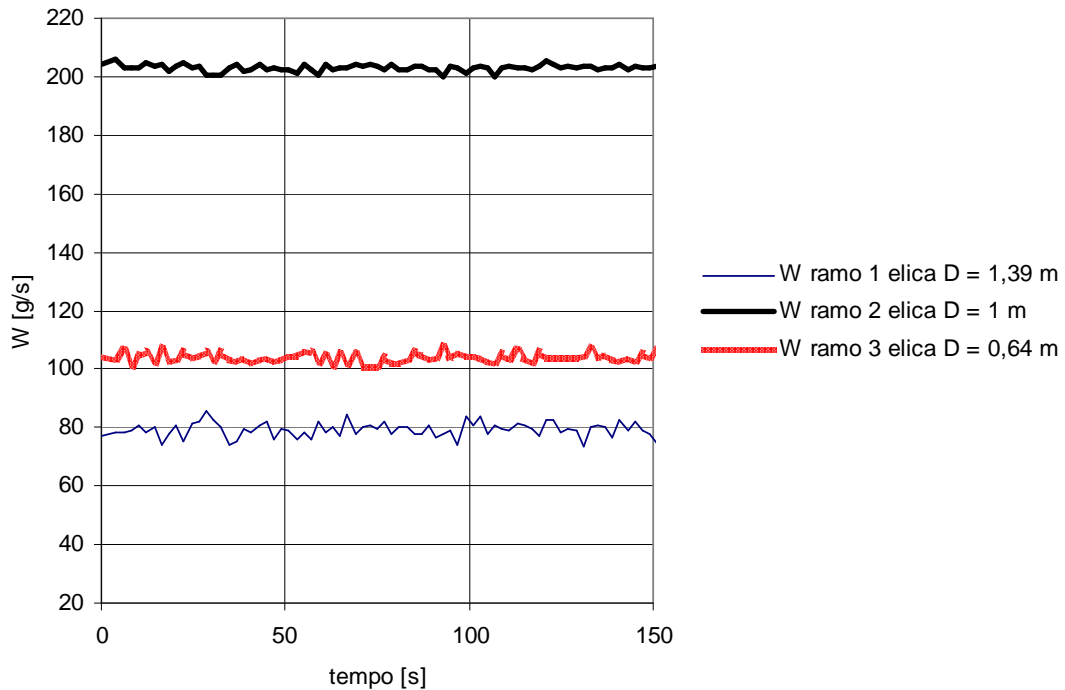




**Figura 345: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 100 l/h Prove tipo II (Portata W4).**



**Figura 346: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 200 l/h Prove tipo II (Portata W4).**



**Figura 347: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 300 l/h  
Prove tipo II (Portata W4).**

Nonostante le instabilità della portata nei canali sia facilmente rilevabile dall'analisi dei precedenti diagrammi è possibile utilizzare una portata d'acqua media nei canali, come è stato effettuato nelle analisi riportate nei capitoli precedenti.

Si è rilevato che al diminuire della portata totale d'acqua e al crescere della portata d'aria le oscillazioni sono più ampie e hanno frequenza maggiore.

Per una visualizzazione complessiva del fenomeno al crescere della portata d'aria si riportano i diagrammi riassuntivi delle prove effettuate da Figura 348 a Figura 351.

• Diagrammi riassuntivi

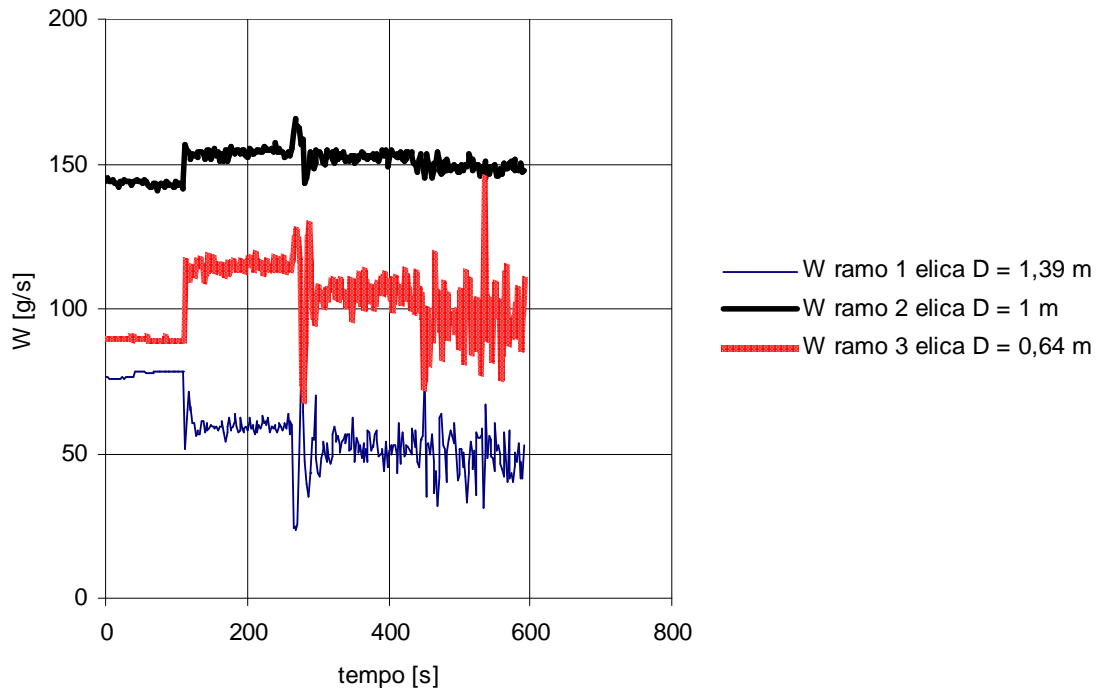


Figura 348: Andamento della portata d'acqua nei canali al variare della portata d'aria  
 Prove tipo II Caso 1 (Portata W1).

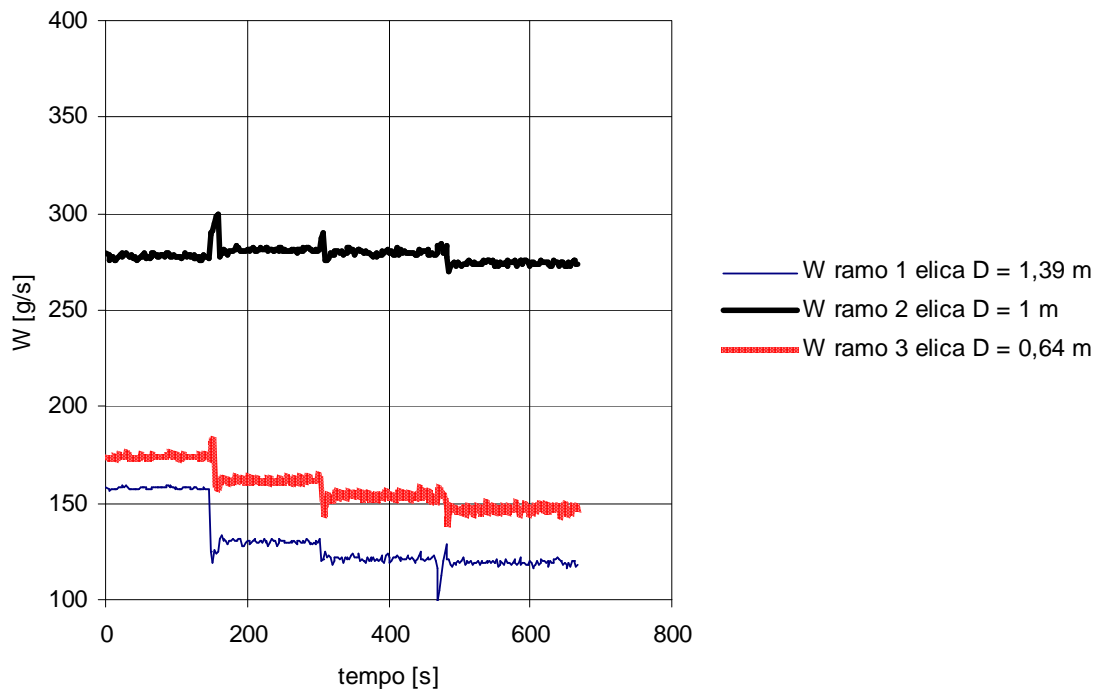
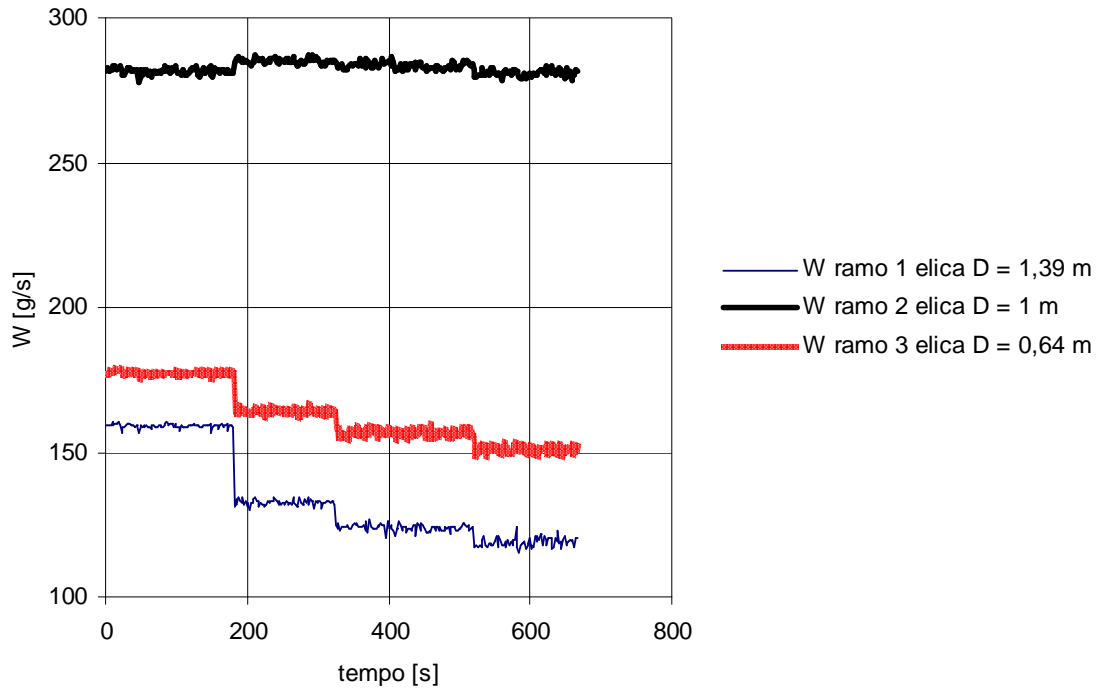
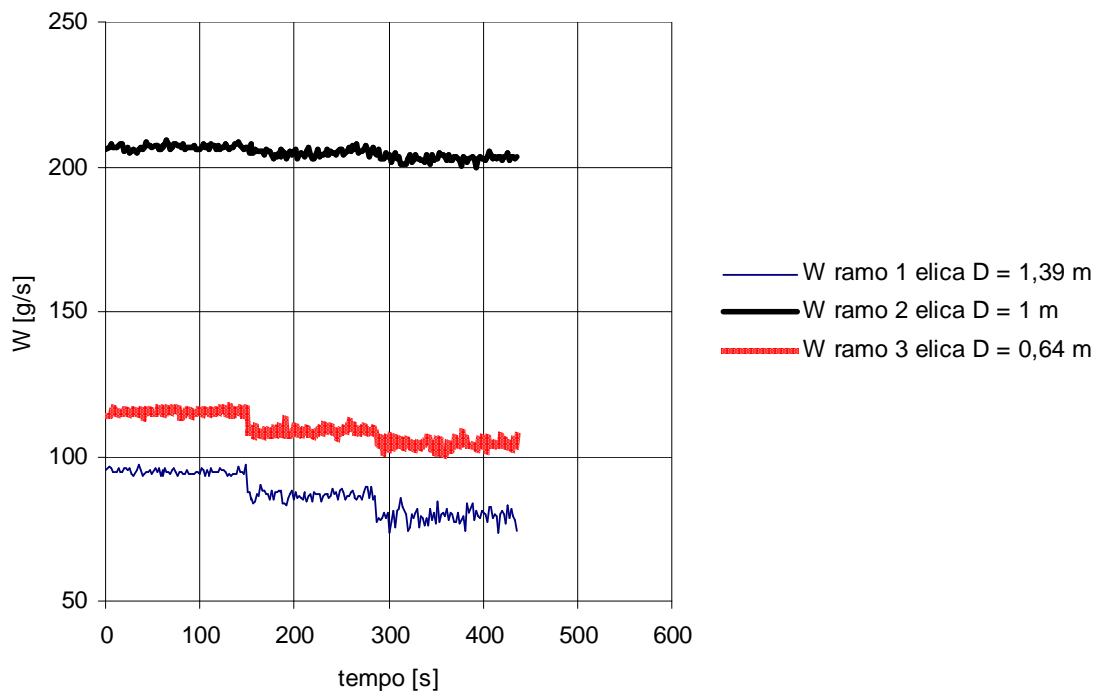


Figura 349: Andamento della portata d'acqua nei canali al variare della portata d'aria  
 Prove tipo II Caso 1 (Portata W2).



**Figura 350: Andamento della portata d'acqua nei canali al variare della portata d'aria  
Prove tipo II Caso 1 (Portata W3).**



**Figura 351: Andamento della portata d'acqua nei canali al variare della portata d'aria  
Prove tipo II Caso 1 (Portata W4).**

### 8.1.3 Distribuzione delle portate nei canali Prove II Caso 2.

Anche per questa campagna di prove si è imposto il deflusso bifase nelle tre eliche contemporaneamente; le portate d'acqua totali utilizzate sono molto piccole rispetto a quelle utilizzate nelle prove di tipo I e nelle prove di tipo II nel Caso 1 mentre le portate d'aria imposte sono state elevate.

In Figura 352, in Figura 353 ed in Figura 354 si riportano gli andamenti della portata d'acqua nei canali in funzione del tempo per le due portate d'acqua totali analizzate e per le portate d'aria imposte nelle tre sezioni di prova.

- **Portata W5**

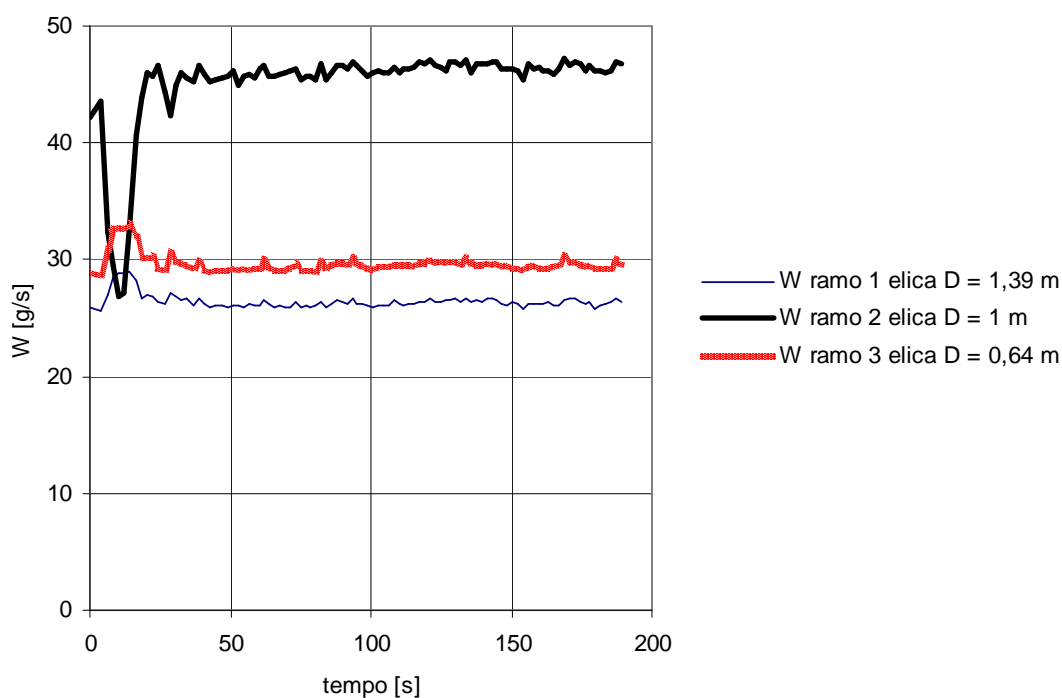
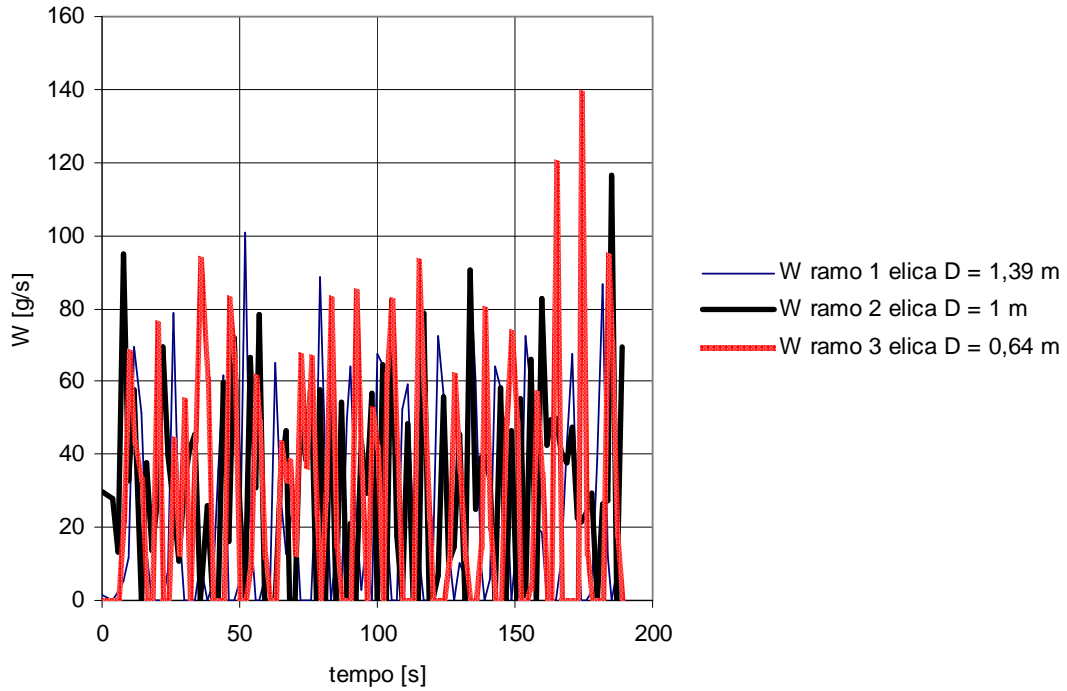
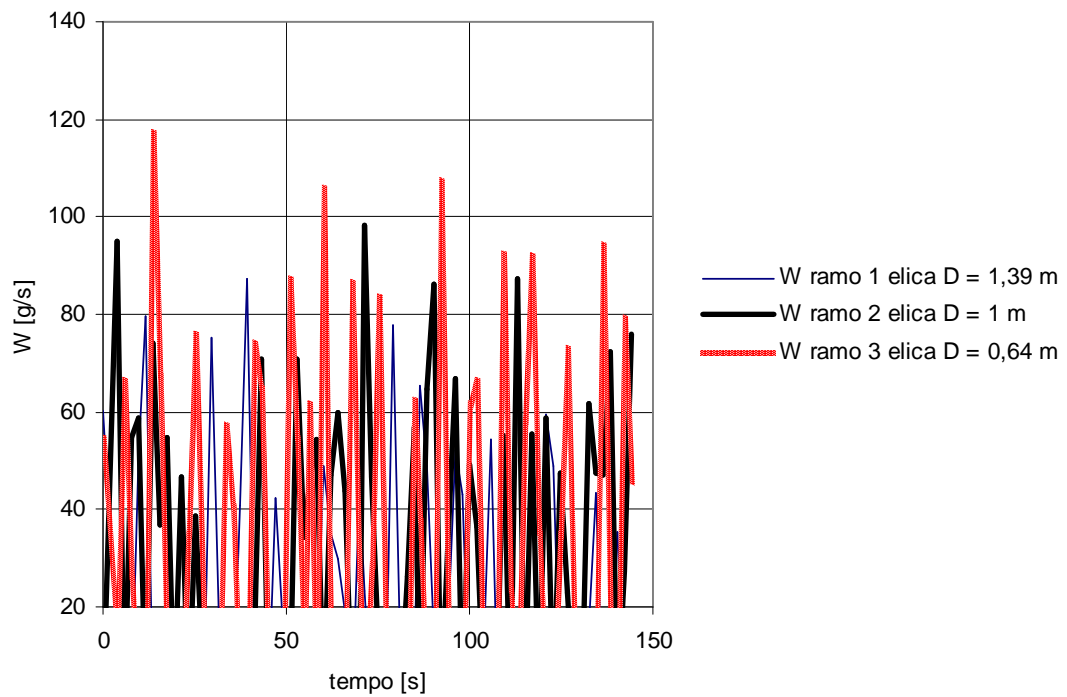


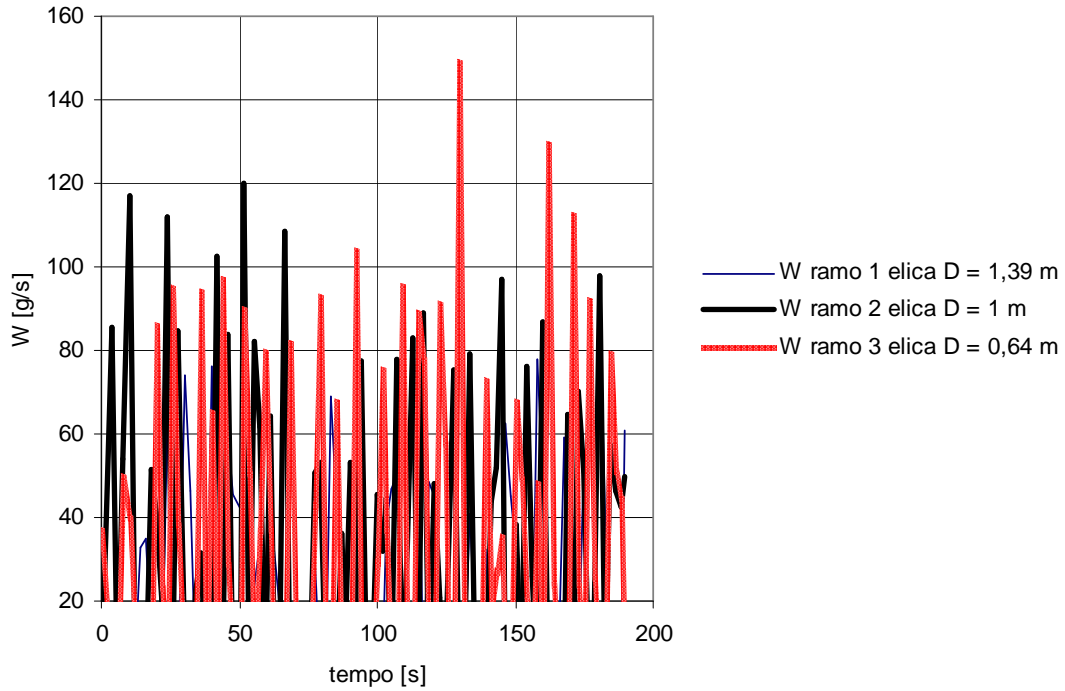
Figura 352: Andamento portata d'acqua canali caso monofase Prove tipo II Caso 2 (PortataW5).



**Figura 353: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 500 l/h  
Prove tipo II Caso 2 (Portata W5).**

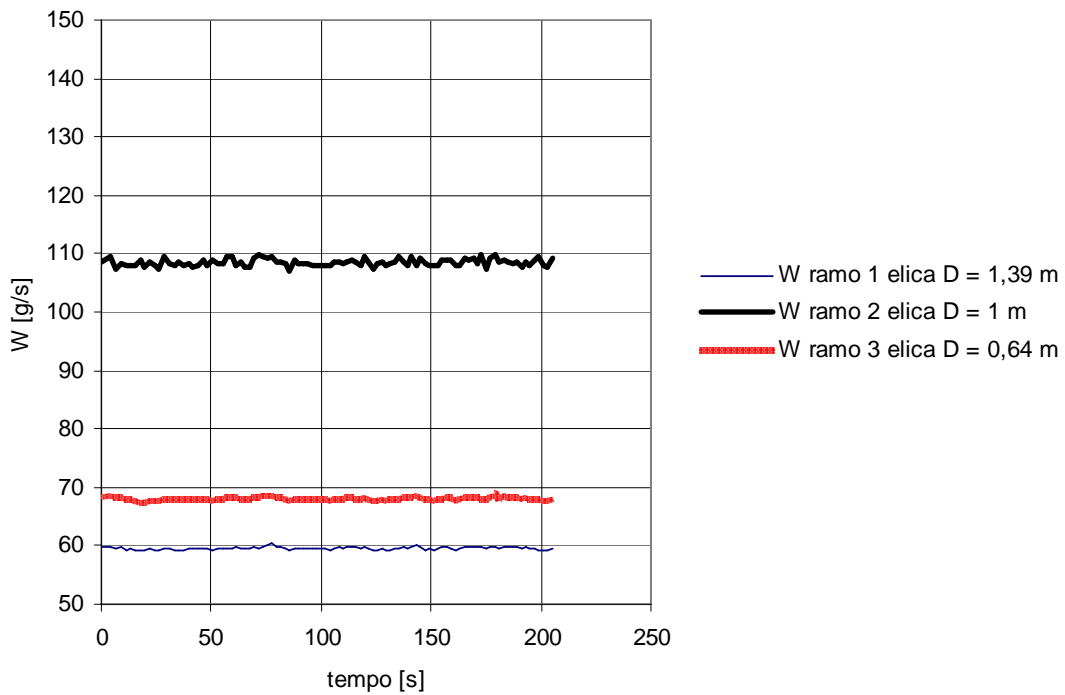


**Figura 354: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 600 l/h  
Prove tipo II Caso 2 (Portata W5).**

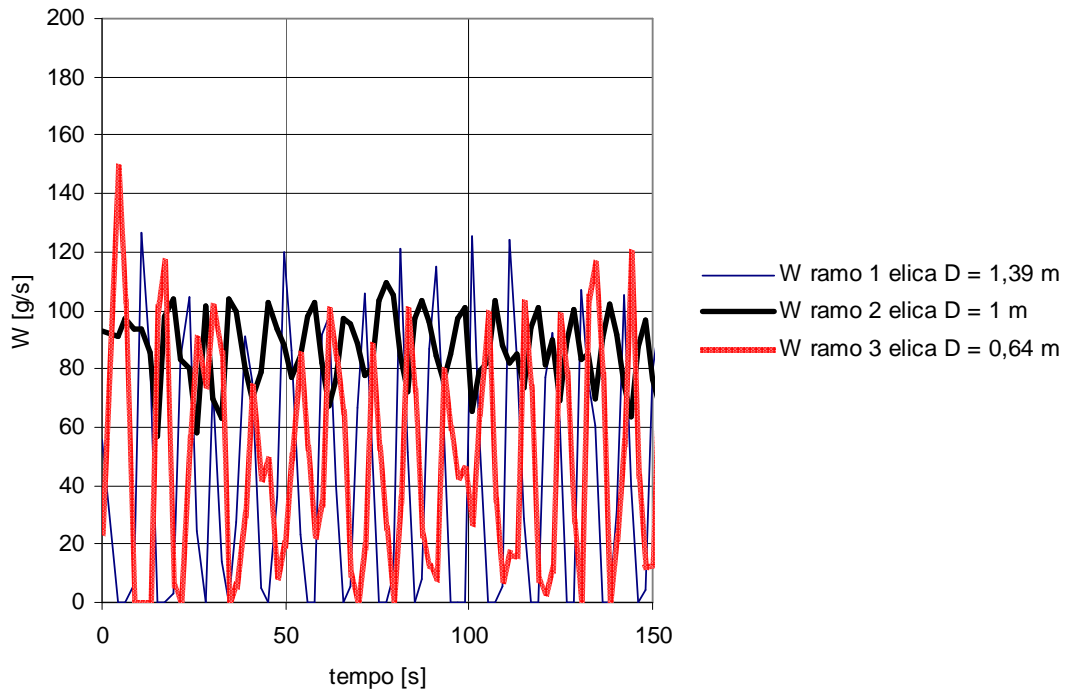


**Figura 355: Andamento della portata d'acqua nei canali  $W$  aria = 700 l/h Prove tipo II Caso 2 (Portata W5).**

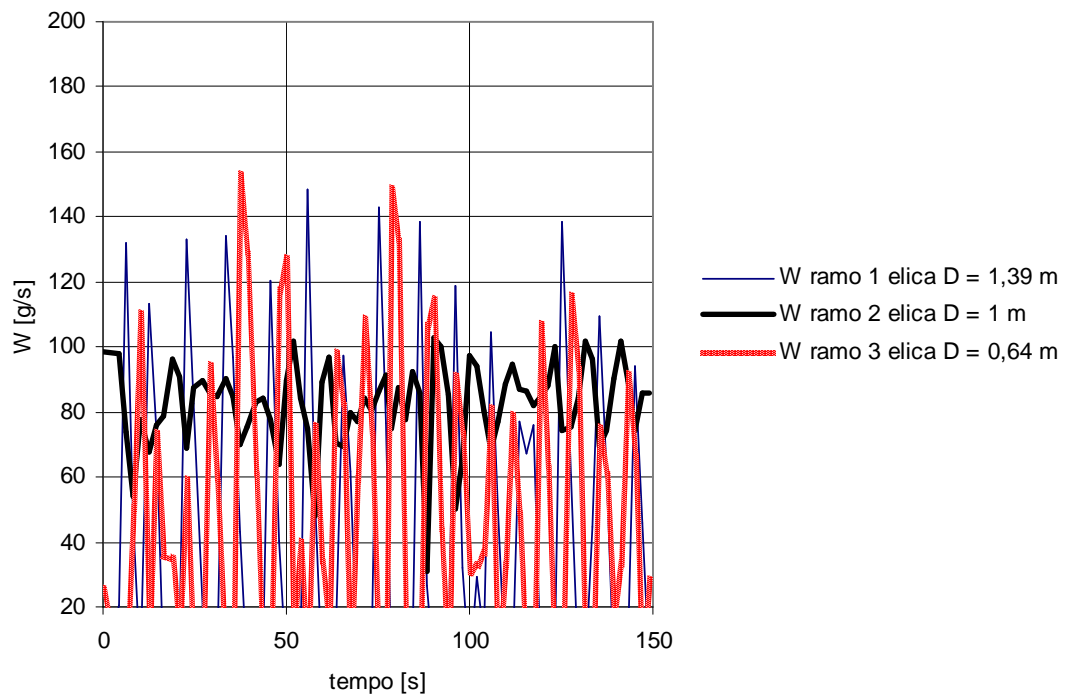
- **Portata W6**



**Figura 356: Andamento portata d'acqua canali caso monofase Prove tipo II Caso 2 (Portata W6).**

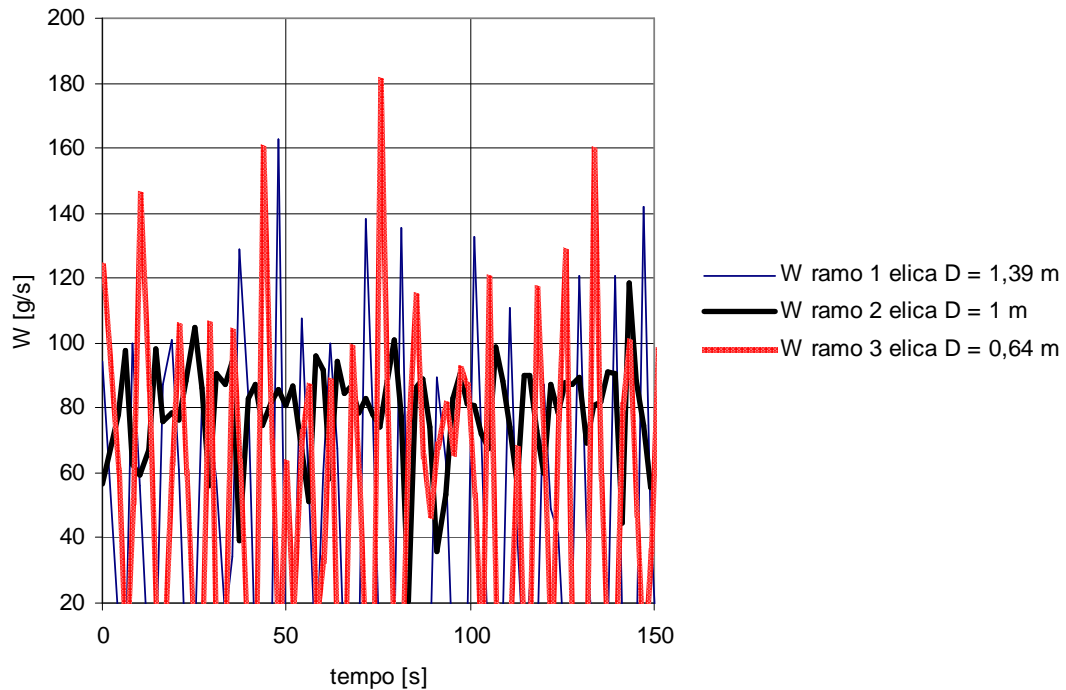


**Figura 357: Andamento della portata d’acqua nei canali W aria = 500 l/h  
Prove tipo II Caso 2 (Portata W6).**



**Figura 358: Andamento della portata d’acqua nei canali W aria = 600 l/h  
Prove tipo II Caso 2 (Portata W6).**





**Figura 359: Andamento della portata d'acqua nei canali W aria = 700 l/h  
Prove tipo II Caso 2 (Portata W6).**

Dall'analisi dei precedenti diagrammi si può facilmente verificare che per questa tipologia di prove non può essere utilizzata una portata d'acqua media nei rami di alimento, come già anticipato nel Capitolo 7.

Le oscillazioni sono tanto ampie che spesso il valore della portata d'acqua è nullo. Al diminuire della portata totale d'acqua e al crescere della portata d'aria le oscillazioni sono più ampie e hanno frequenza maggiore.

Anche in questo caso per una visualizzazione complessiva del fenomeno al crescere della portata d'aria si riportano, in Figura 360 ed in Figura 361, i diagrammi riassuntivi delle prove effettuate.

• Diagrammi riassuntivi

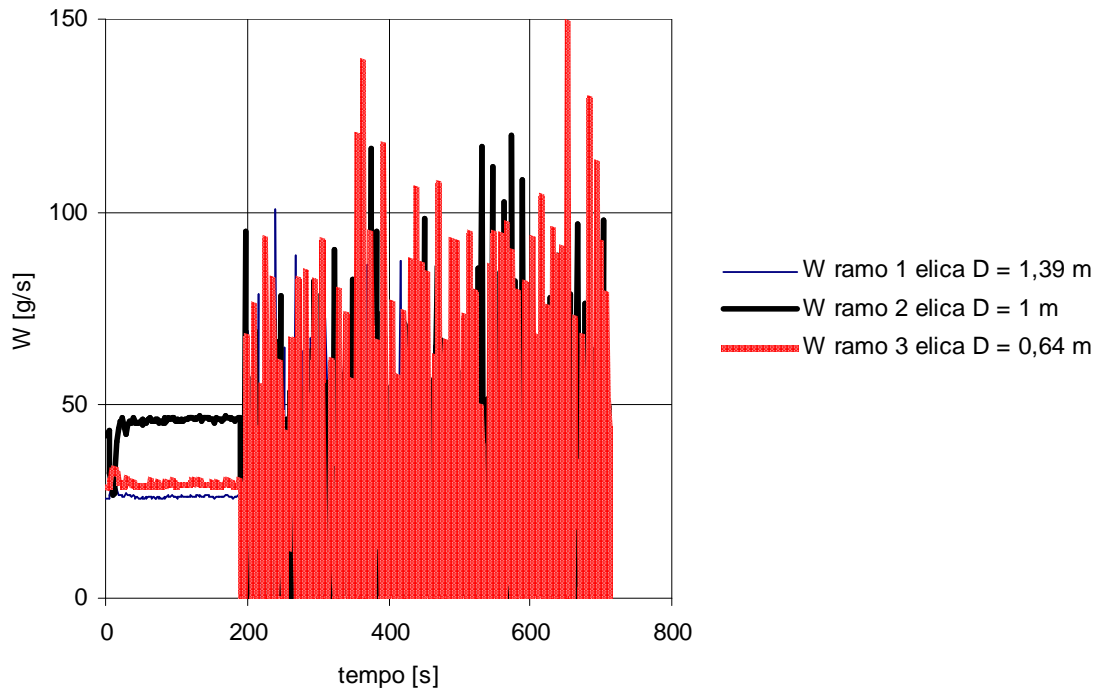


Figura 360: Andamento della portata d'acqua nei canali al variare della portata d'aria  
 Prove tipo II Caso 2 (Portata W5).

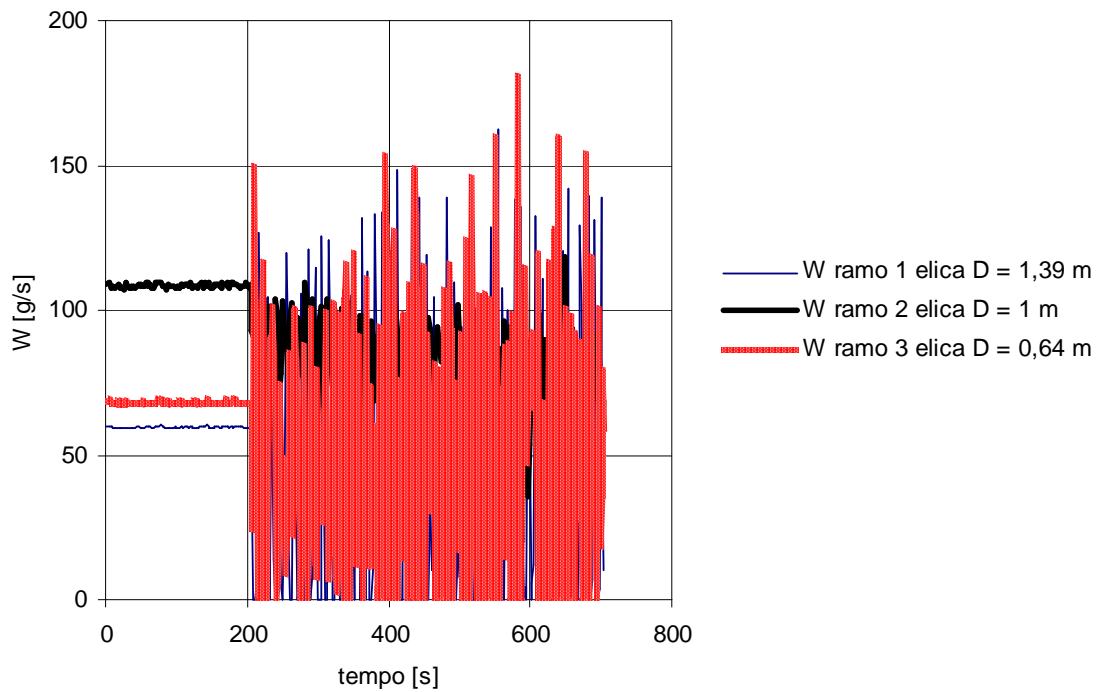


Figura 361: Andamento della portata d'acqua nei canali al variare della portata d'aria  
 Prove tipo II Caso 2 (Portata W6).

## **8.2 Instabilità dinamiche.**

Per quanto concerne le instabilità dinamiche si analizzeranno in questo paragrafo gli andamenti delle cadute di pressione misurate tra ingresso ed uscita delle tre sezioni di prova in funzione del tempo.

Oltre alle cadute di pressione anche il grado di vuoto misurato risulta essere oscillante, ma le sue oscillazioni sono nella maggior parte dei casi così piccole che, a causa dell'errore di misura a cui è affetta questa grandezza, non sono rilevabili. Solamente per le prove di tipo II Caso 2 si è dovuto utilizzare un grado di vuoto medio su una singola serie di misure per poter procedere all'analisi dei dati, come già riportato nel Capitolo 7.

### ***8.2.1 Distribuzione delle cadute di pressione misurate Prove I.***

In questo paragrafo si analizzeranno le cadute di pressione misurate tra ingresso ed uscita delle sezioni di prova nel caso in cui il deflusso bifase sia imposto ad una sola elica alla volta e le altre due restino in deflusso monofase.

Come atteso al crescere della portata d'aria per ogni sezione di prova si hanno oscillazioni delle cadute di pressione misurate più ampie. Maggiore è la portata d'aria più queste oscillazioni si smorzano. Fa eccezione la portata totale W3 nel caso delle eliche di diametro 1 m e 0,64 m, che ha un comportamento anomalo già analizzato nei paragrafi precedenti.

Si riportano da Figura 362 a Figura 401 gli andamenti delle cadute di pressione misurate tra ingresso ed uscita delle sezioni di prova per le quattro portate d'acqua totali prese in esame.

• Portata W1

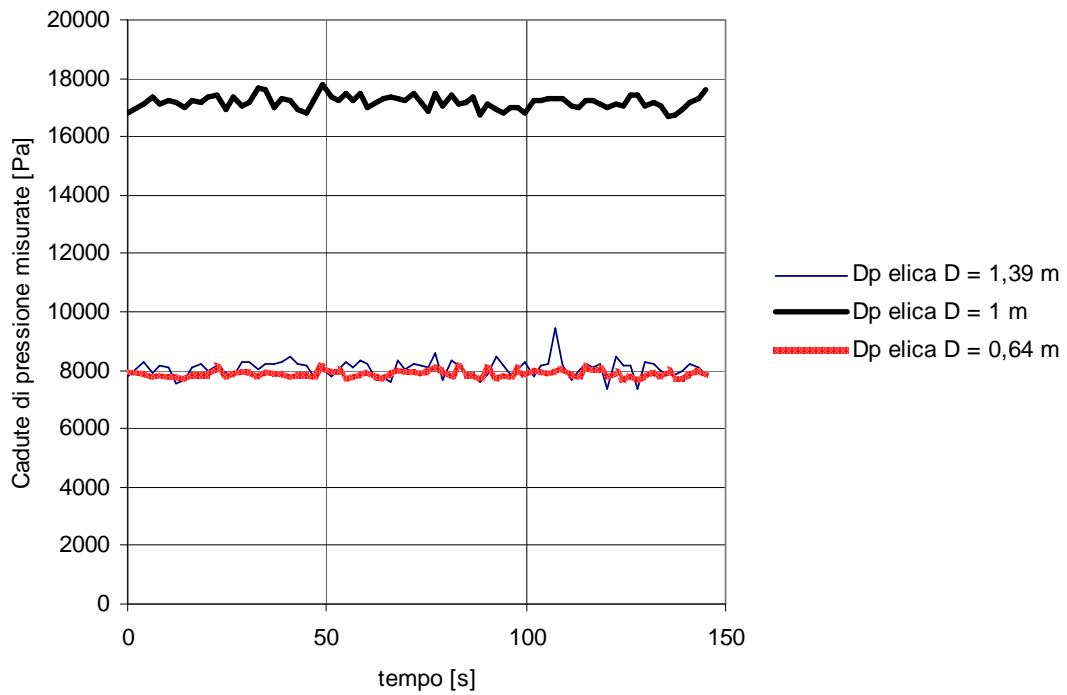


Figura 362: Andamento cadute di pressione misurate caso monofase Prove tipo I (Portata W1).

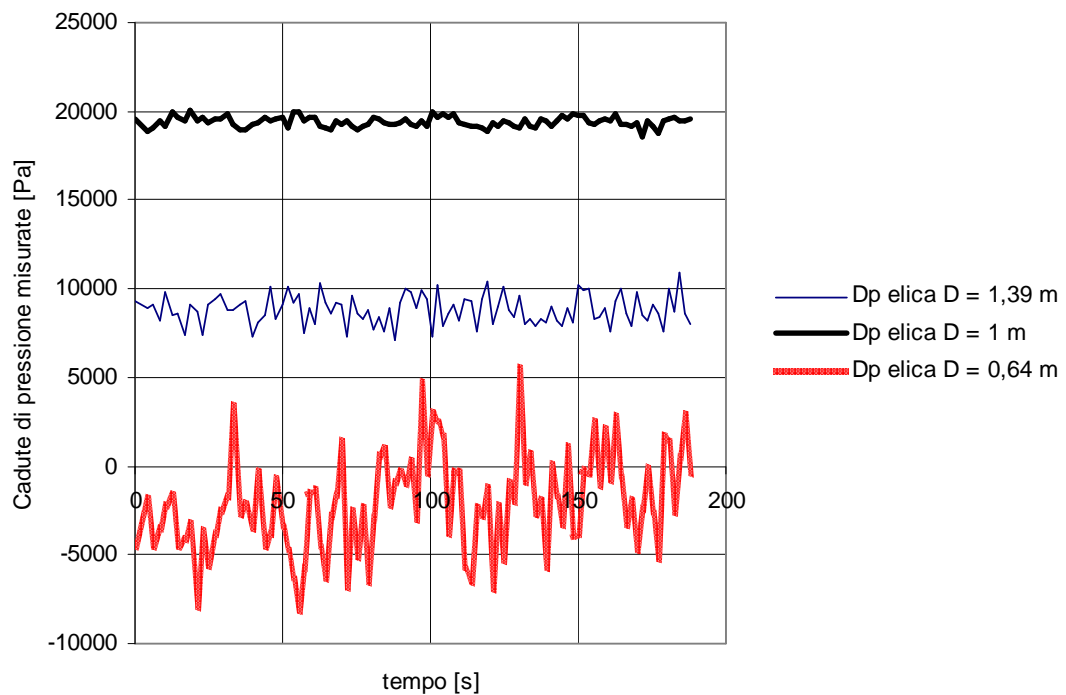
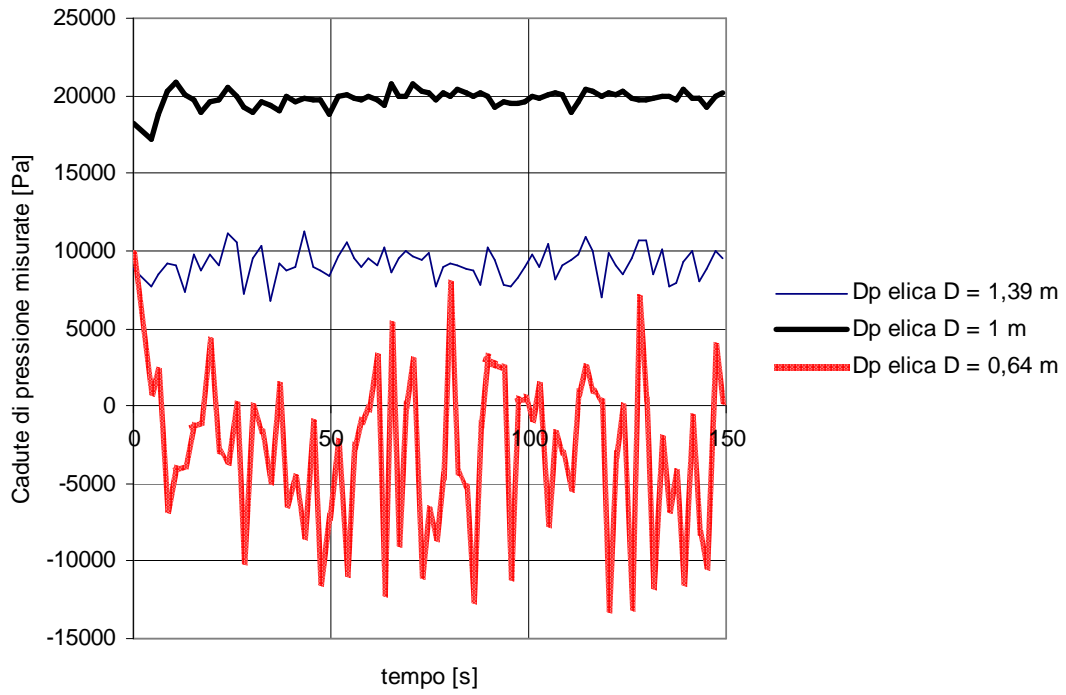
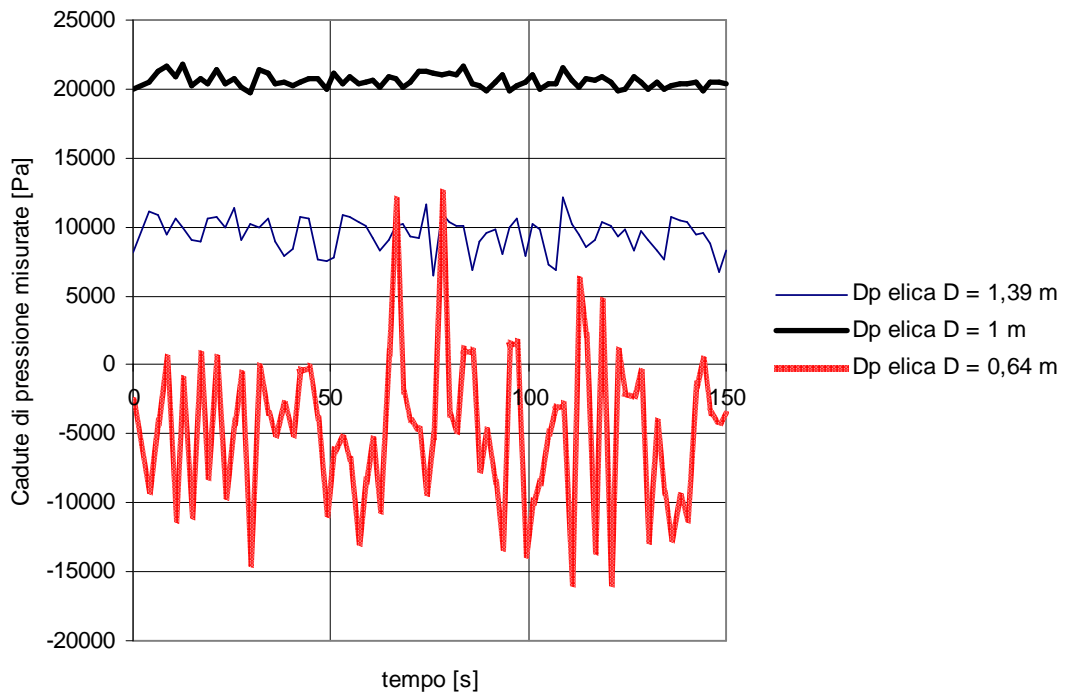


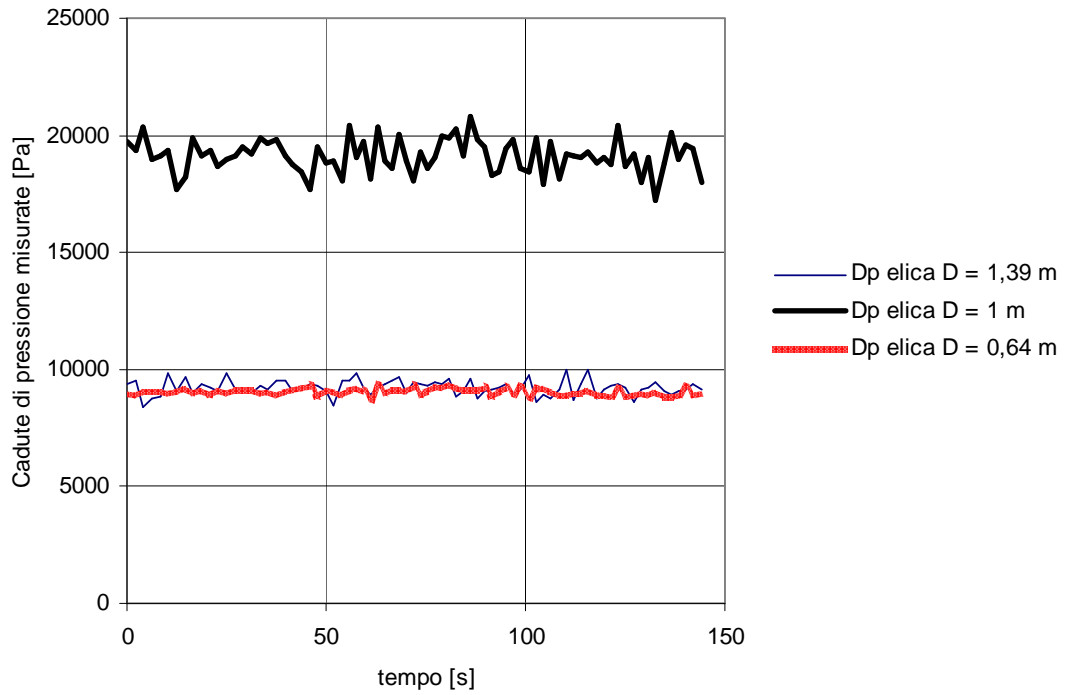
Figura 363: Andamento cadute di pressione misurate W<sub>aria</sub> = 100 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).



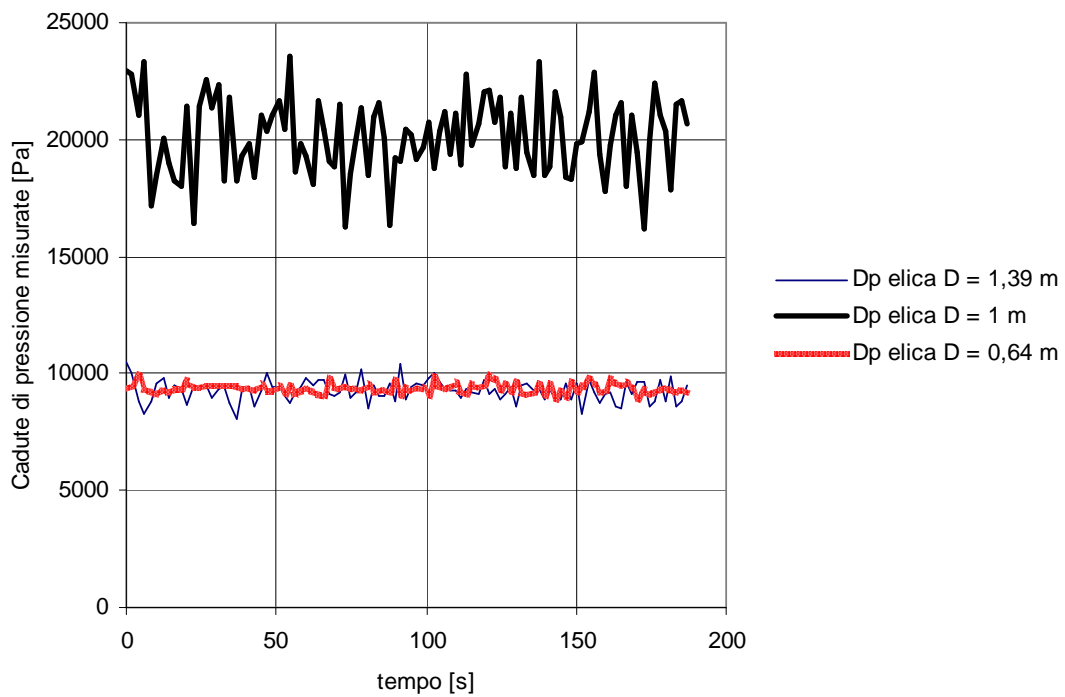
**Figura 364: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**



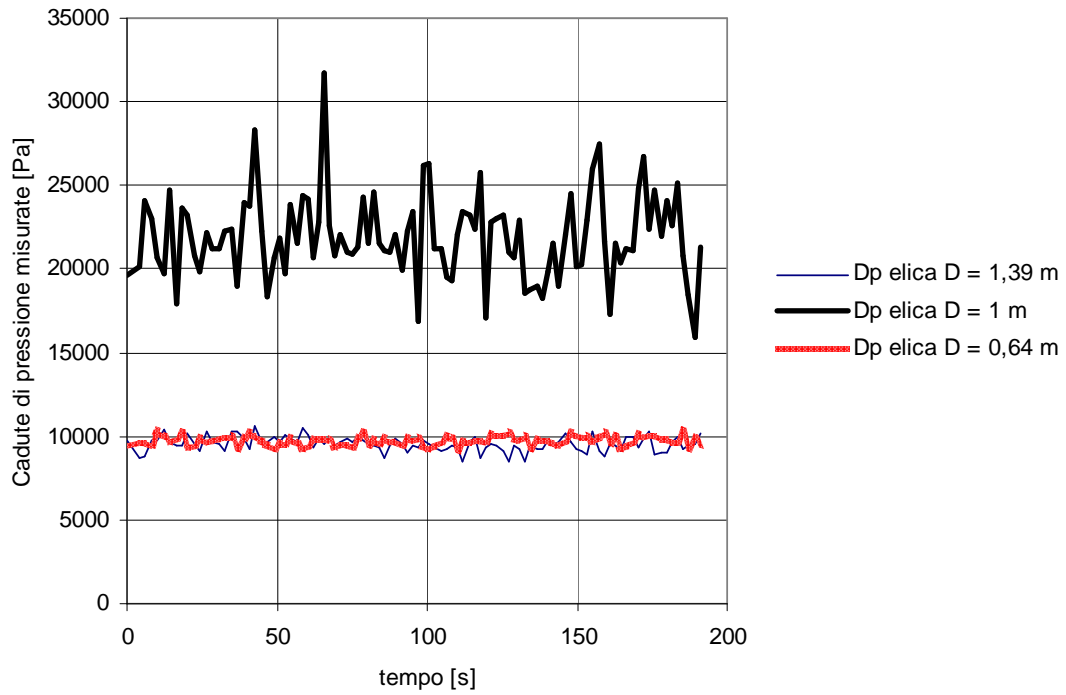
**Figura 365: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**



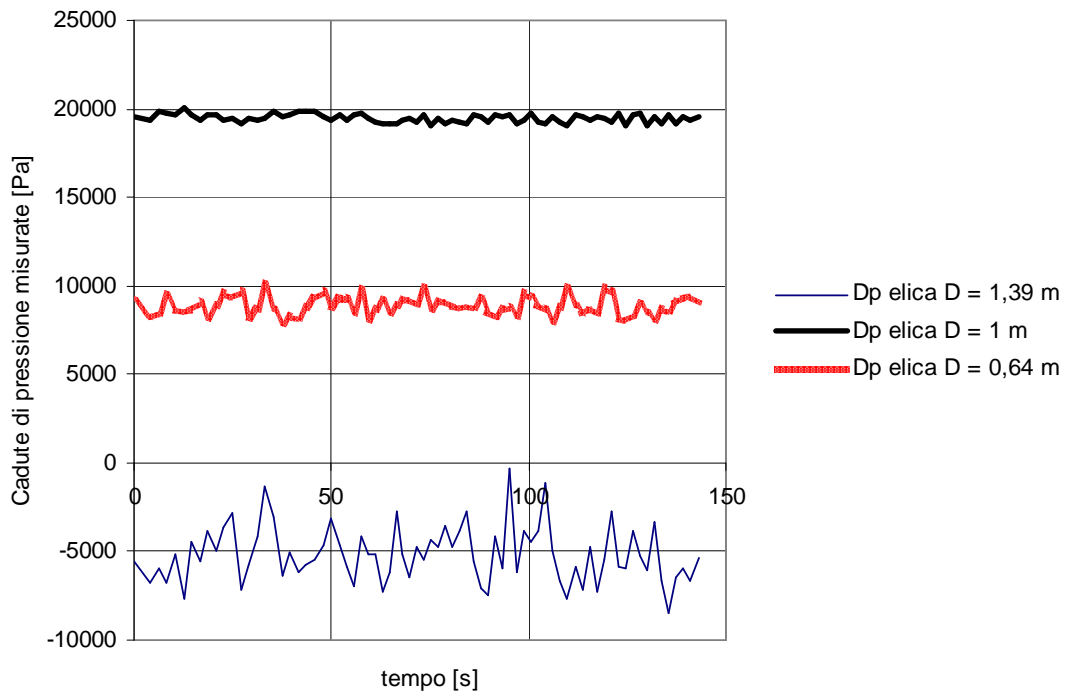
**Figura 366: Andamento della portata d'acqua misurate  $W_{\text{aria}} = 100 \text{ l/h}$   
Elica  $D = 1 \text{ m}$  in bifase Prove tipo I (Portata  $W_1$ ).**



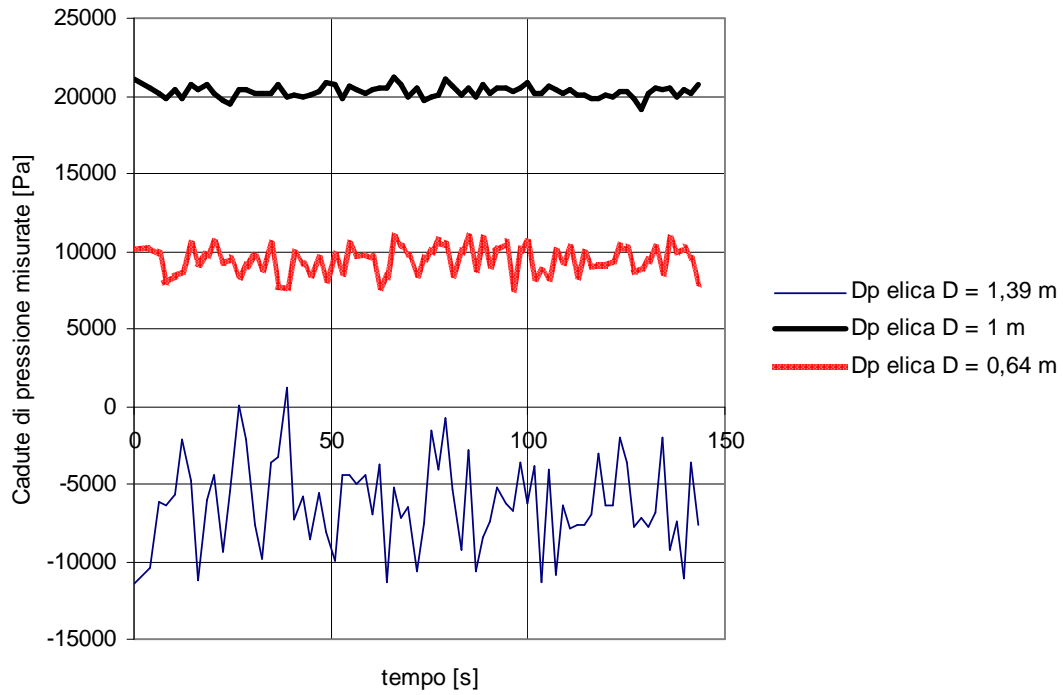
**Figura 367: Andamento cadute di pressione misurate  $W_{\text{aria}} = 200 \text{ l/h}$   
Elica  $D = 1 \text{ m}$  in bifase Prove tipo I (Portata  $W_1$ ).**



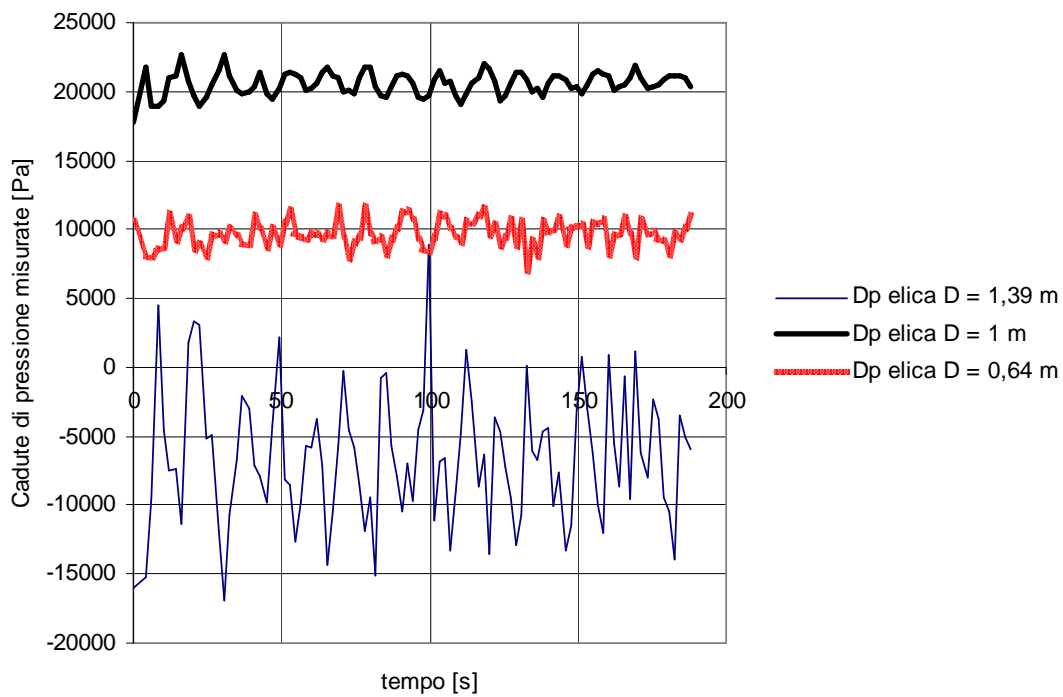
**Figura 368: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica  $D = 1$  m in bifase Prove tipo I (Portata  $W1$ ).**



**Figura 369: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 100 l/h  
Elica  $D = 1,39$  m in bifase Prove tipo I (Portata  $W1$ ).**



**Figura 370: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**



**Figura 371: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W1).**



• Portata W2

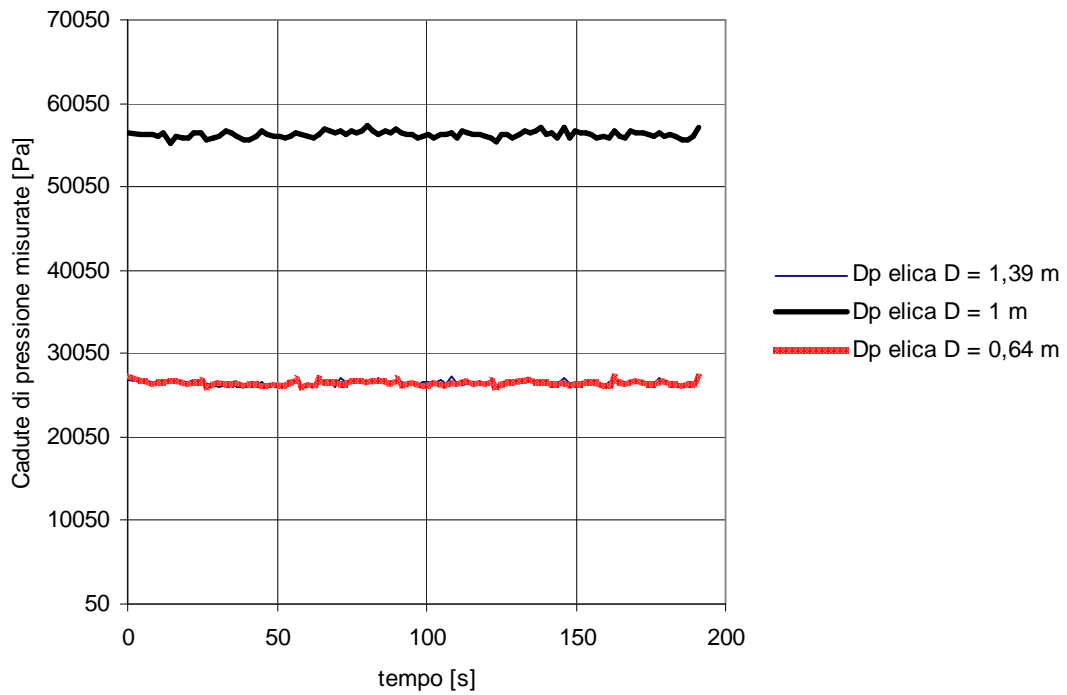


Figura 372: Andamento cadute di pressione misurate caso monofase Prove tipo I (Portata W2).

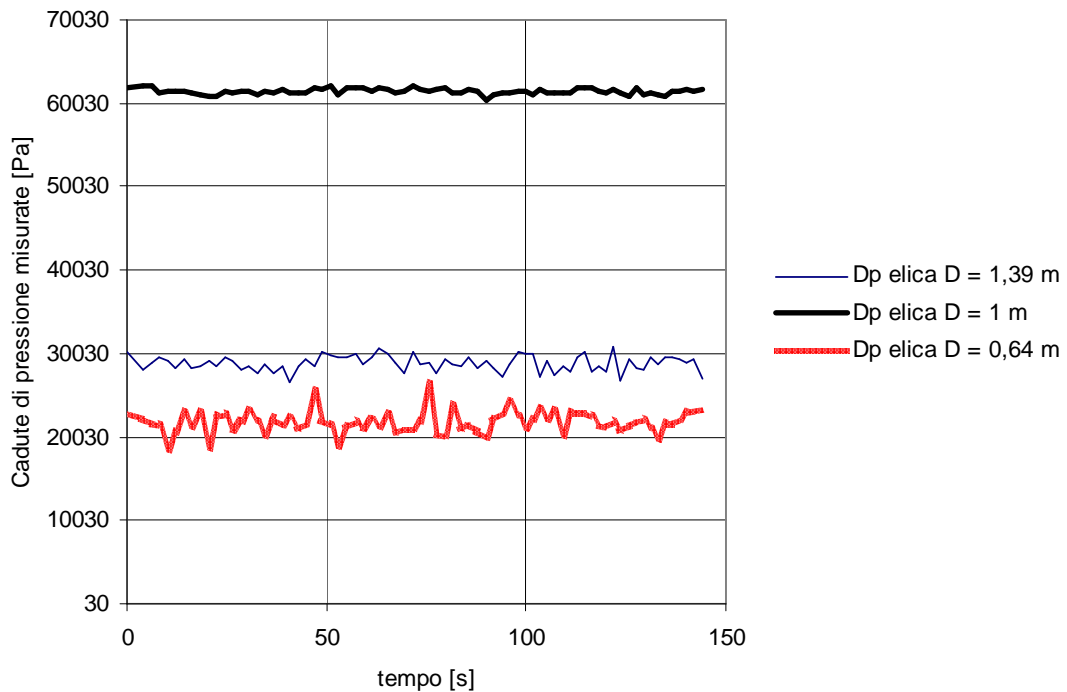
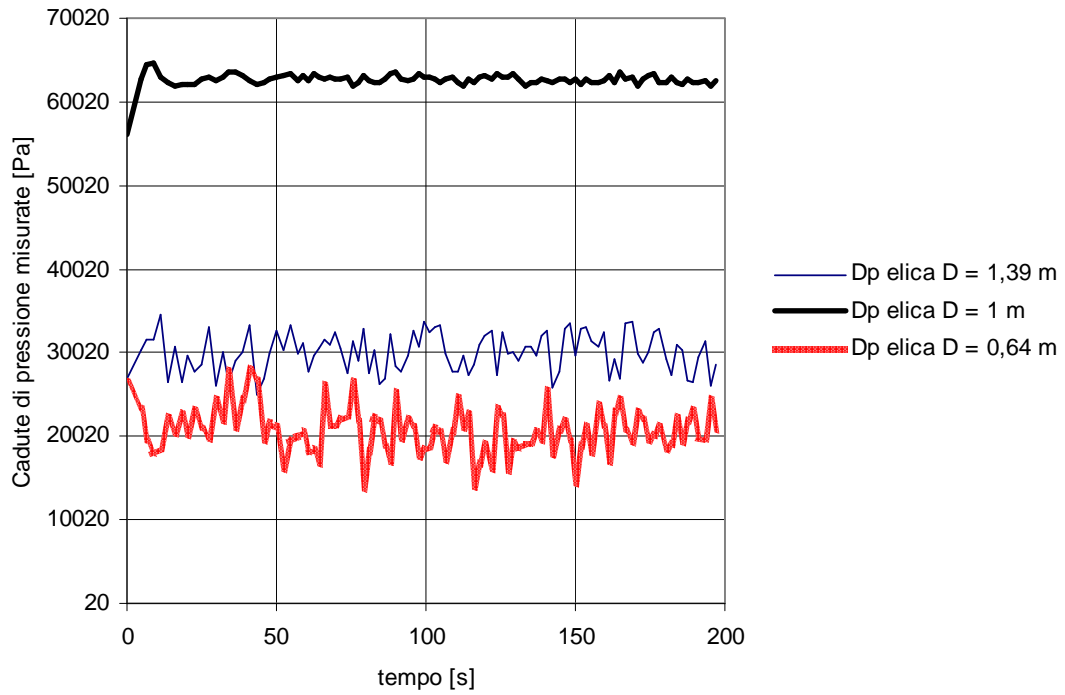
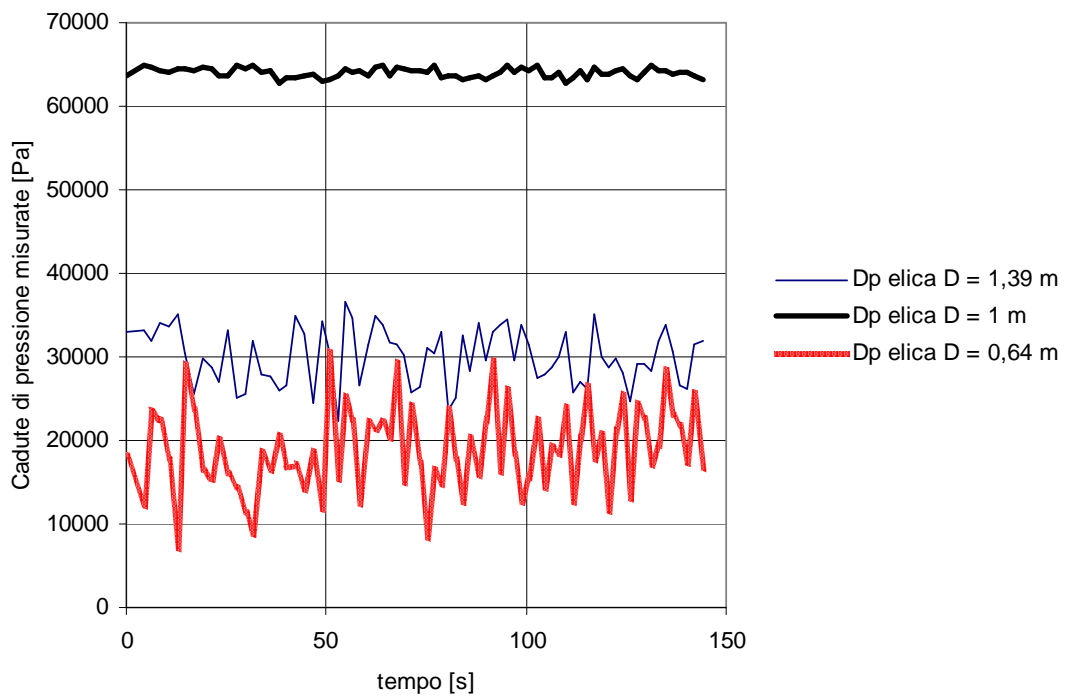


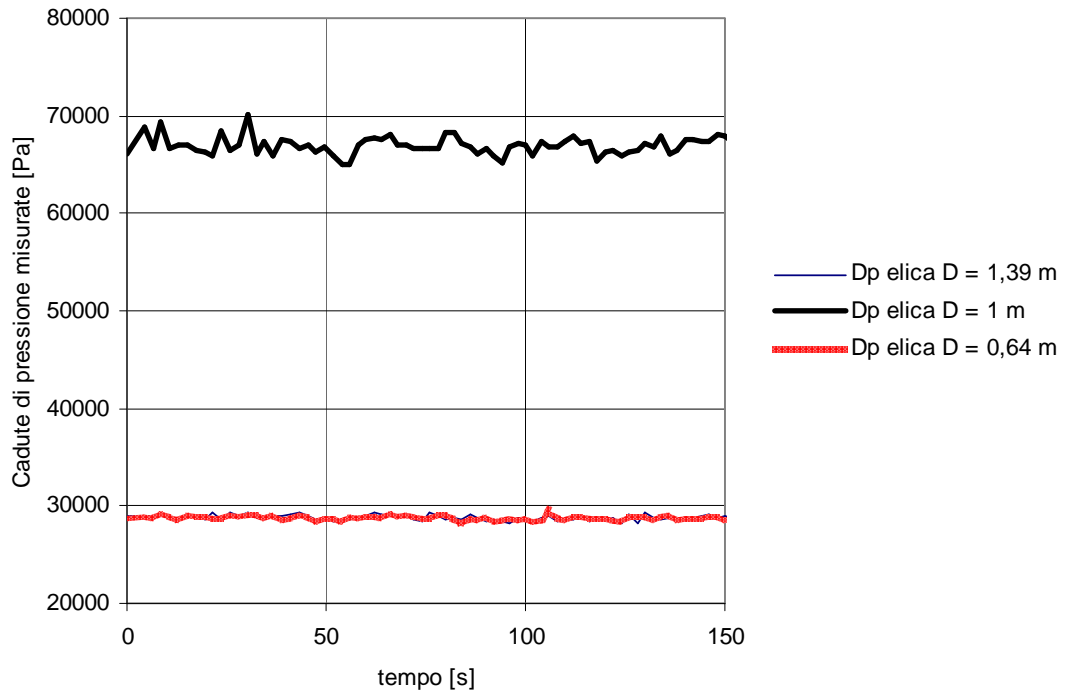
Figura 373: Andamento cadute di pressione misurate  $W_{\text{aria}} = 100 \text{ l/h}$   
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).



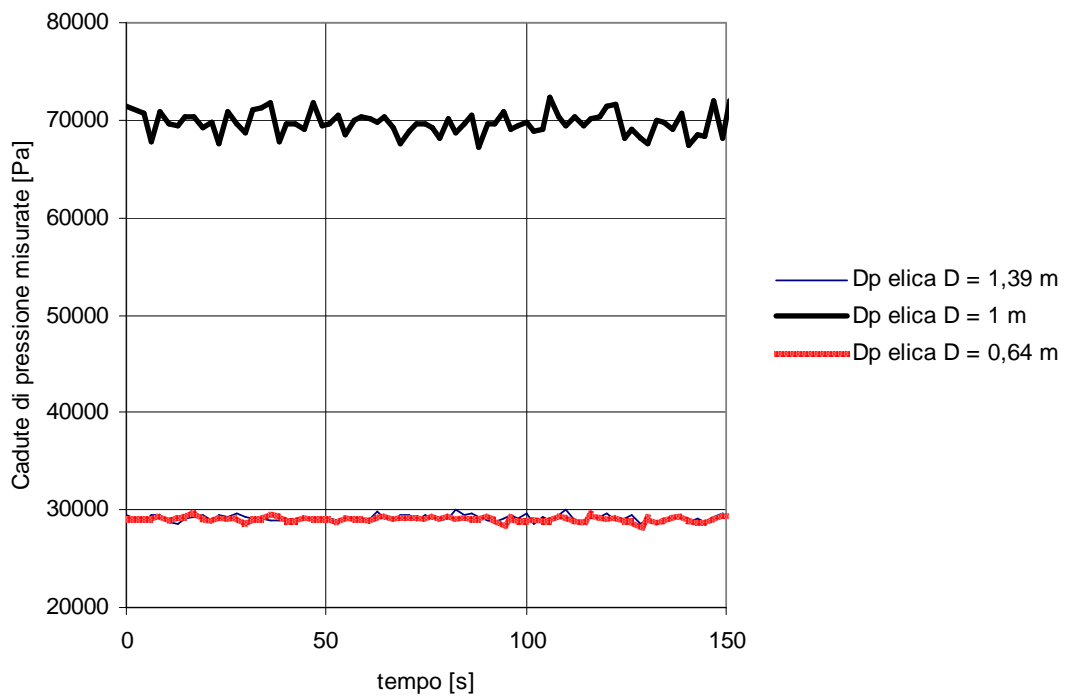
**Figura 374: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).**



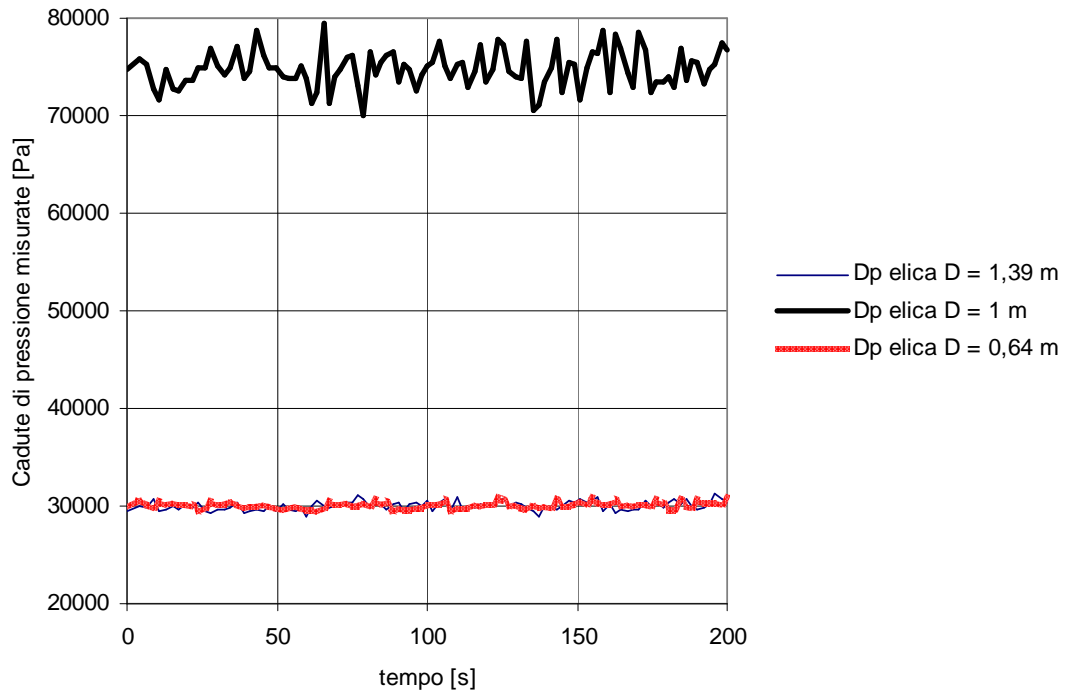
**Figura 375: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).**



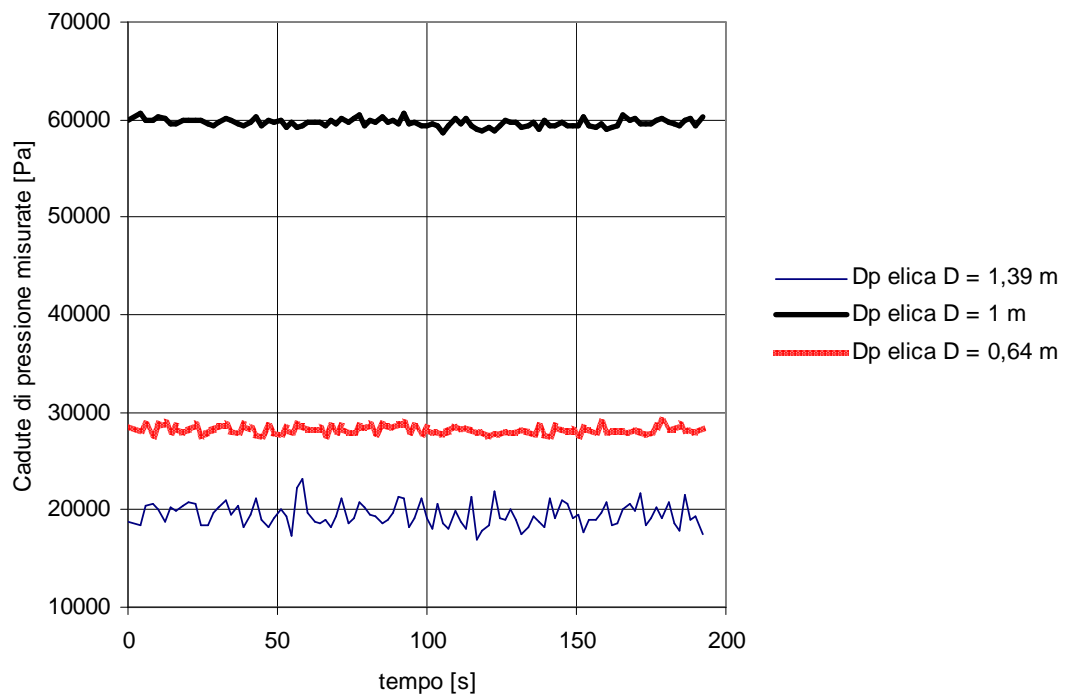
**Figura 376: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 100 l/h  
Elica  $D = 1$  m in bifase Prove tipo I (Portata  $W_2$ ).**



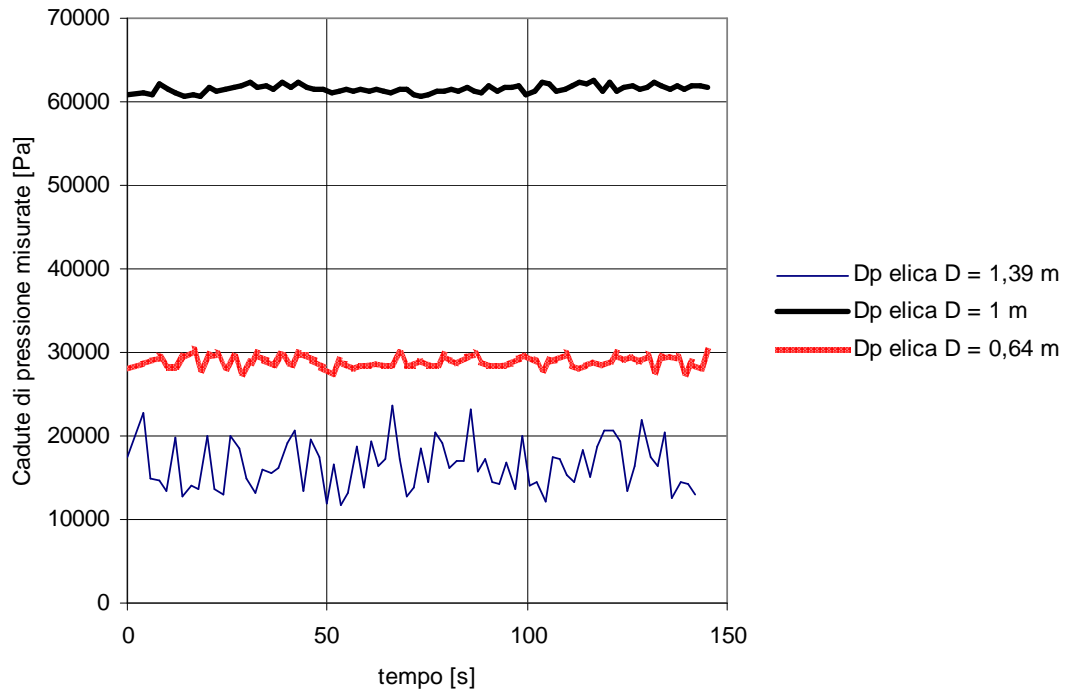
**Figura 377: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica  $D = 1$  m in bifase Prove tipo I (Portata  $W_1$ ).**



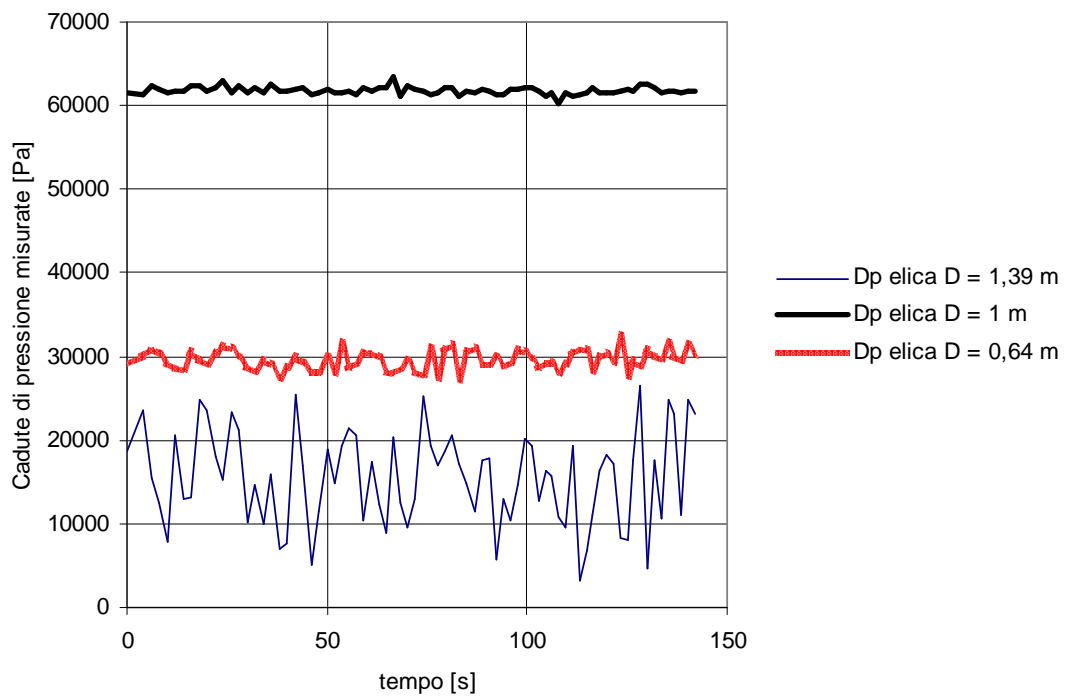
**Figura 378: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).**



**Figura 379: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 100 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).**



**Figura 380: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).**



**Figura 381: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W2).**

• Portata W3

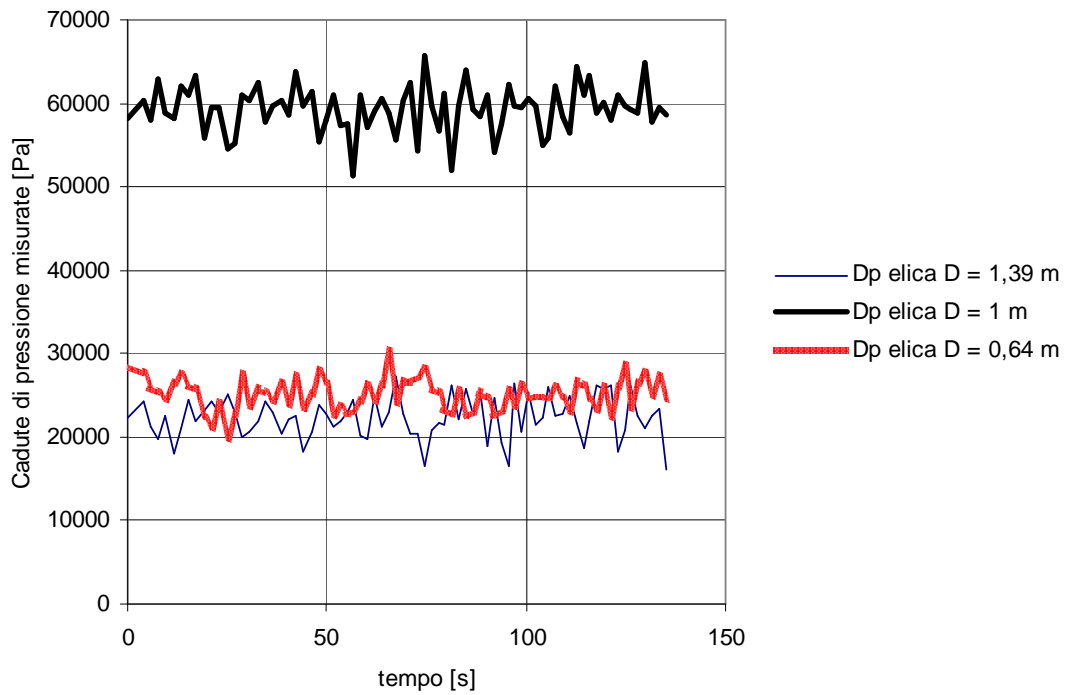


Figura 382: Andamento cadute di pressione misurate caso monofase Prove tipo I (Portata W3).

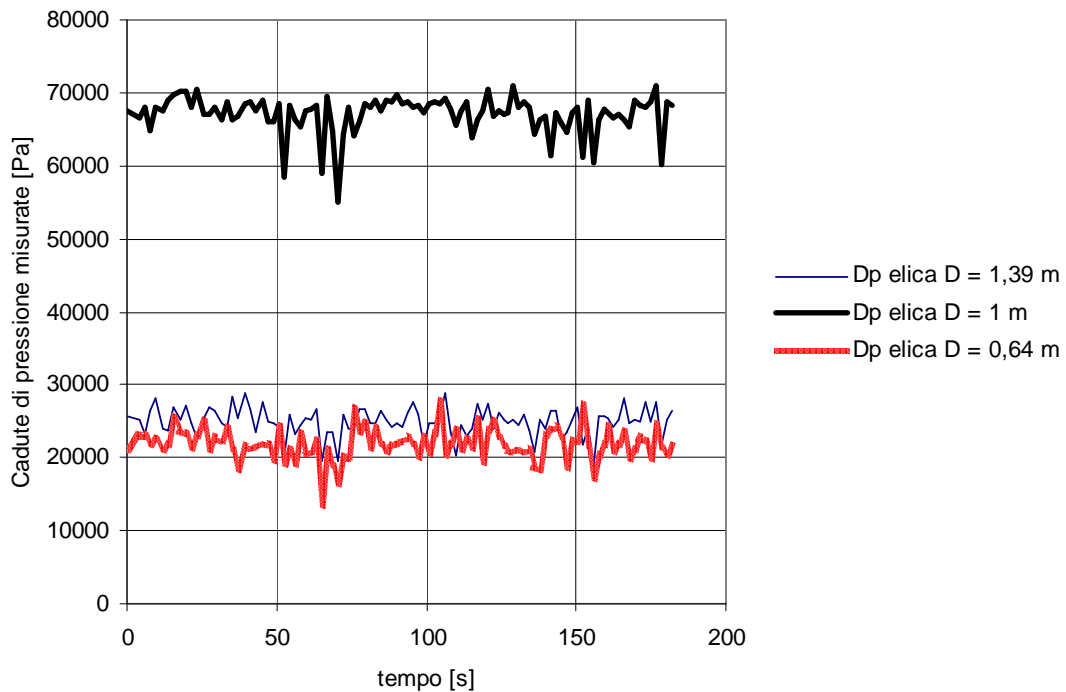
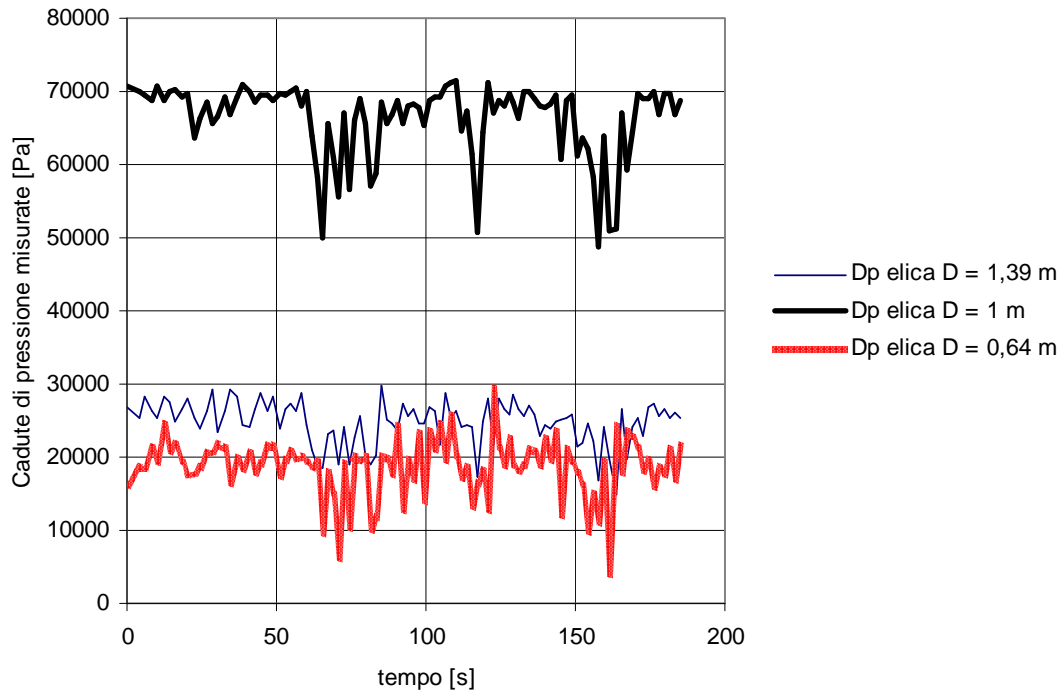
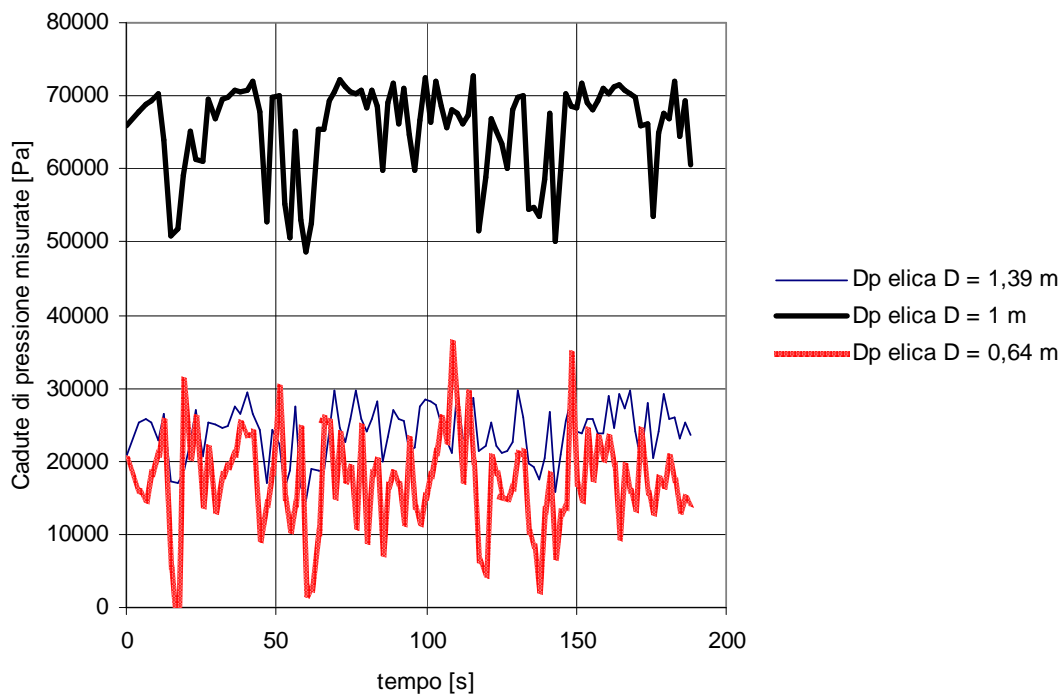


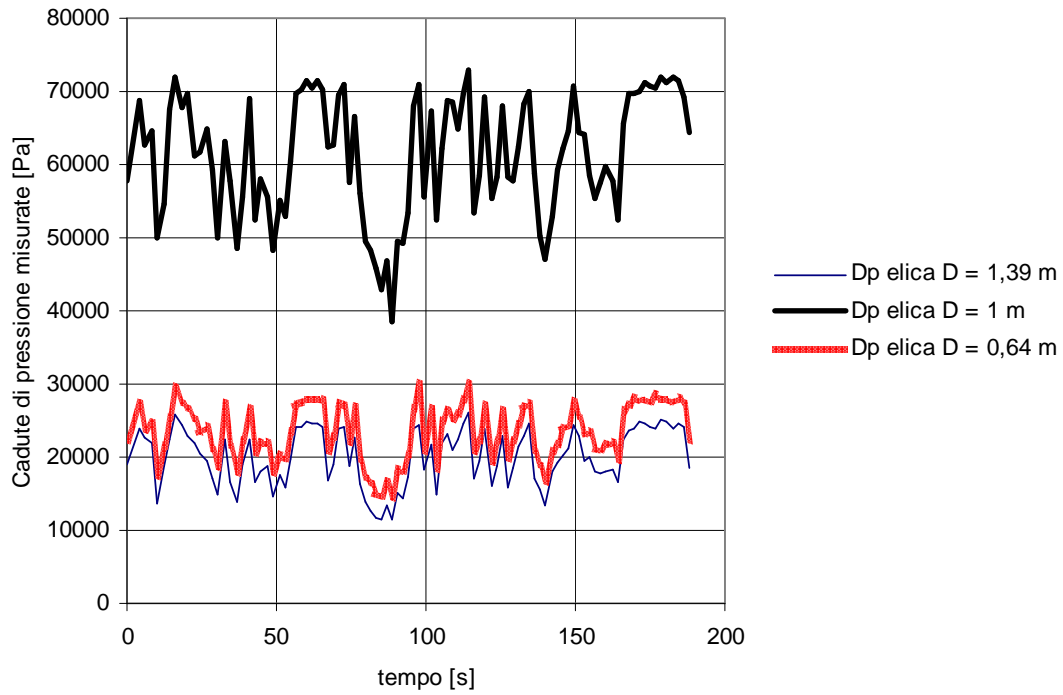
Figura 383: Andamento cadute di pressione misurate  $W_{\text{aria}} = 100 \text{ l/h}$   
Elica  $D = 0,64 \text{ m}$  in bifase Prove tipo I (Portata W3).



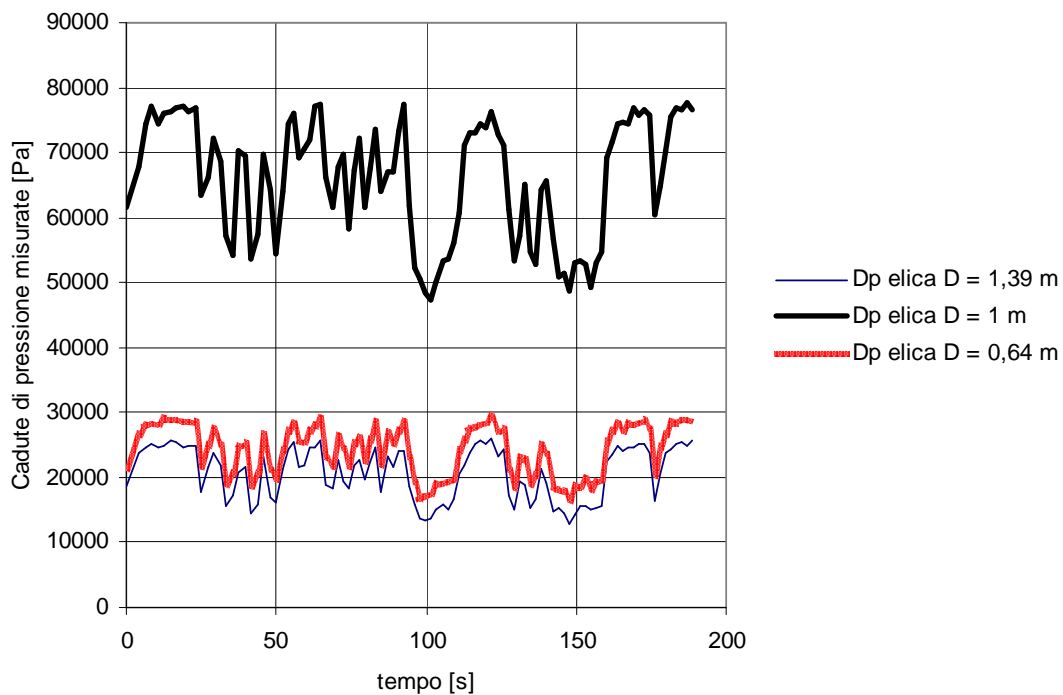
**Figura 384: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**



**Figura 385: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**

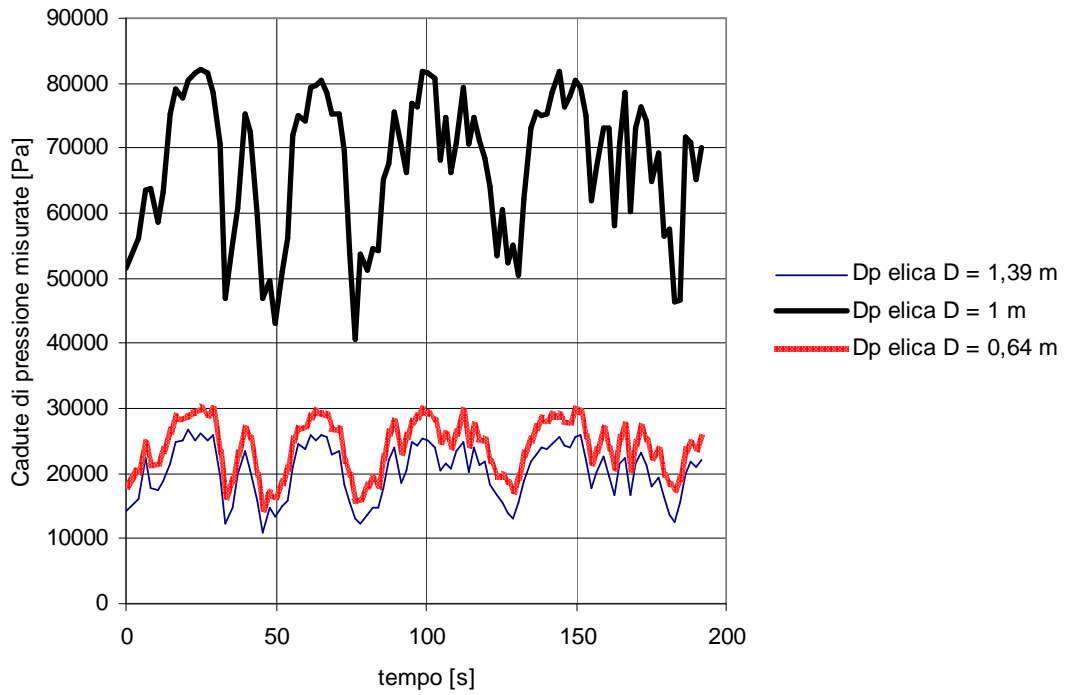


**Figura 386: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 100 l/h  
Elica  $D = 1$  m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**

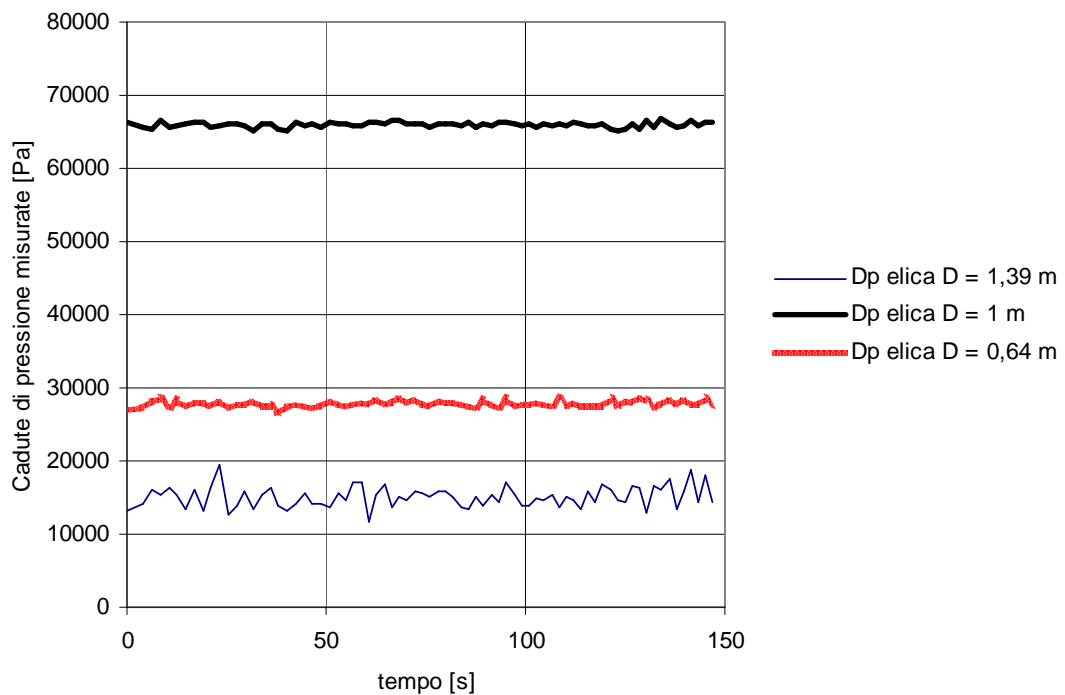


**Figura 387: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica  $D = 1$  m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**

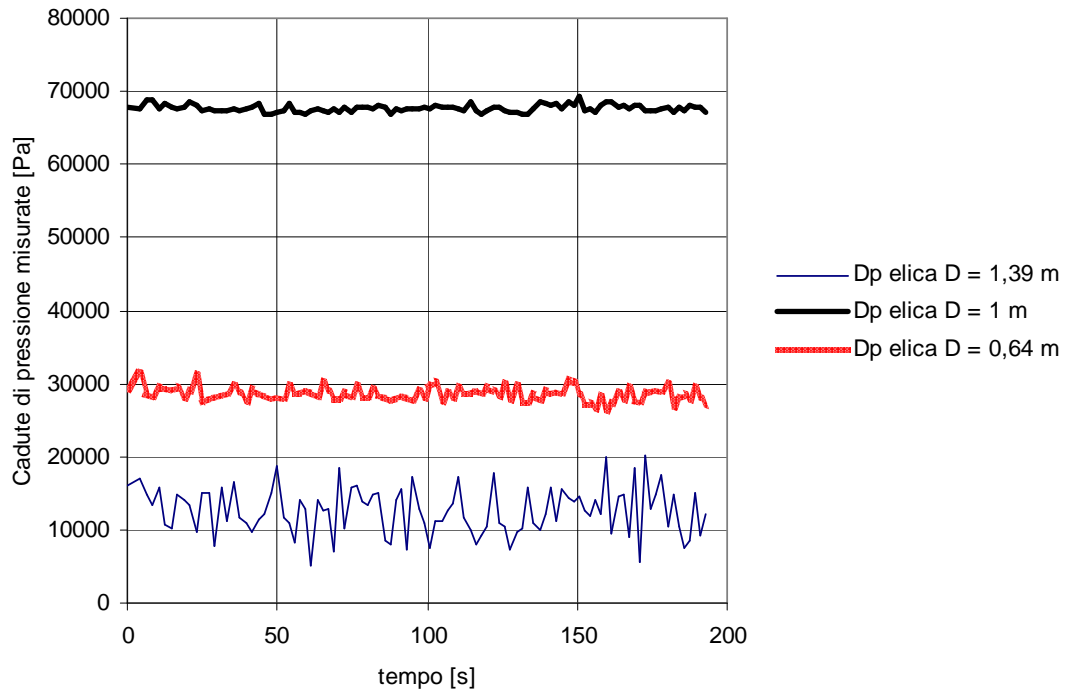




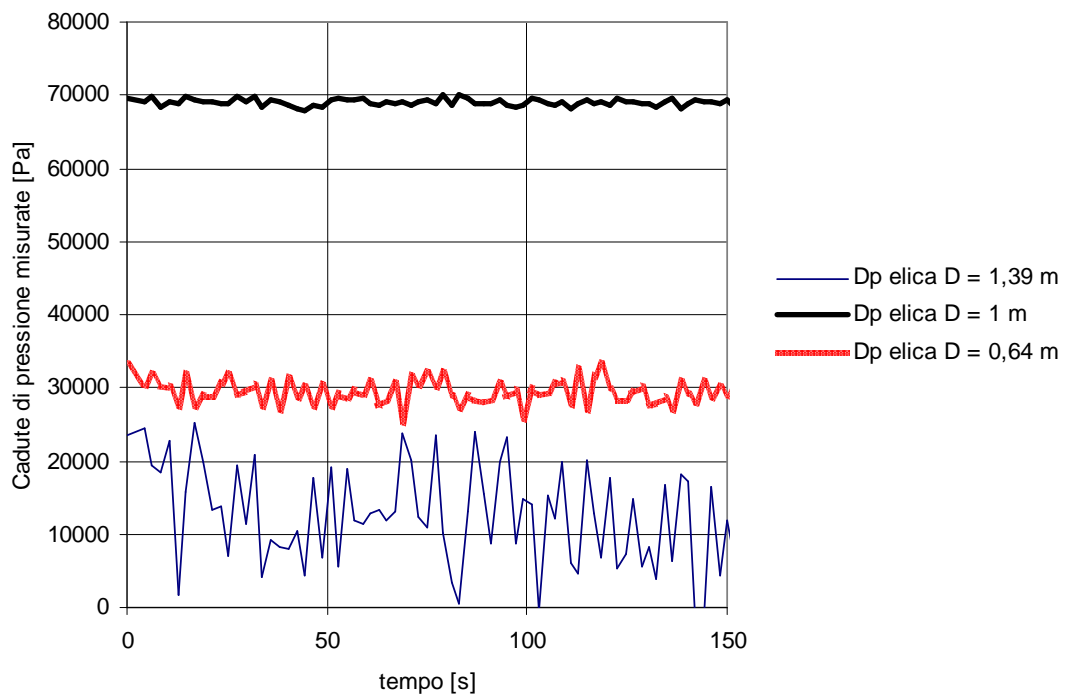
**Figura 388: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**



**Figura 389: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 100 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**



**Figura 390: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**



**Figura 391: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W3).**

• Portata W4

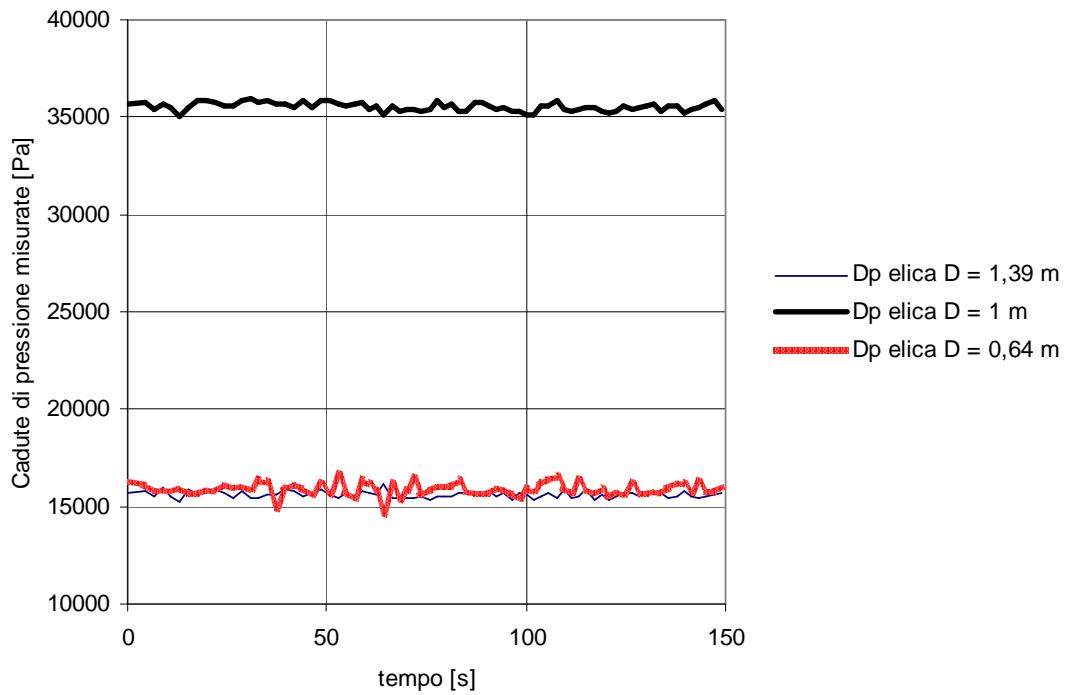


Figura 392: Andamento cadute di pressione misurate caso monofase Prove tipo I (Portata W4).

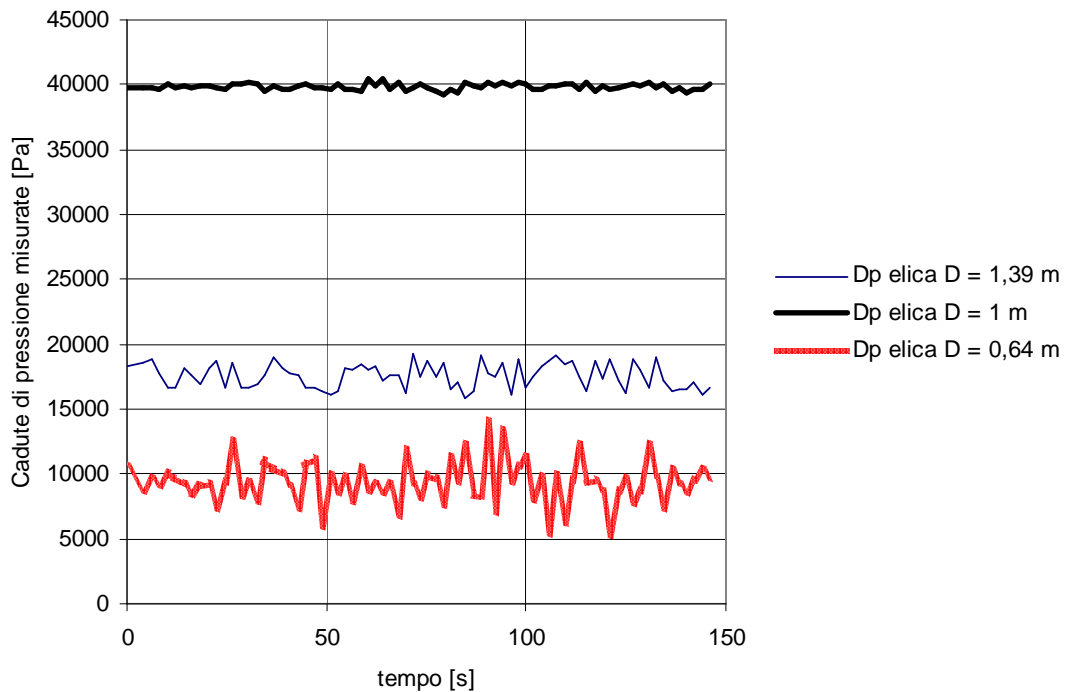
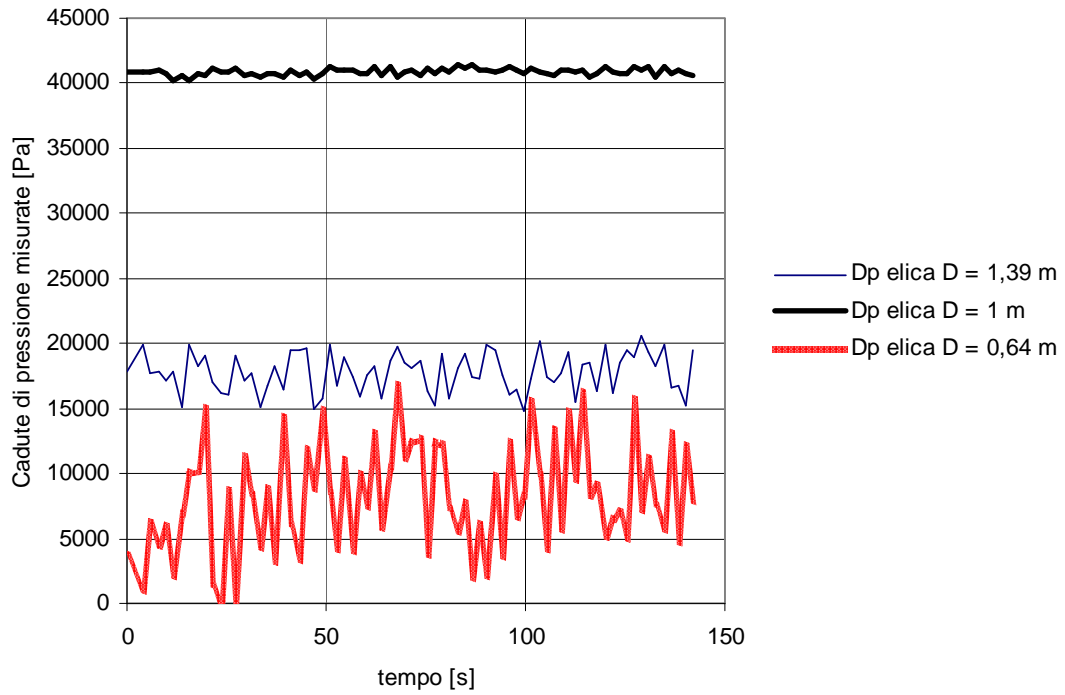
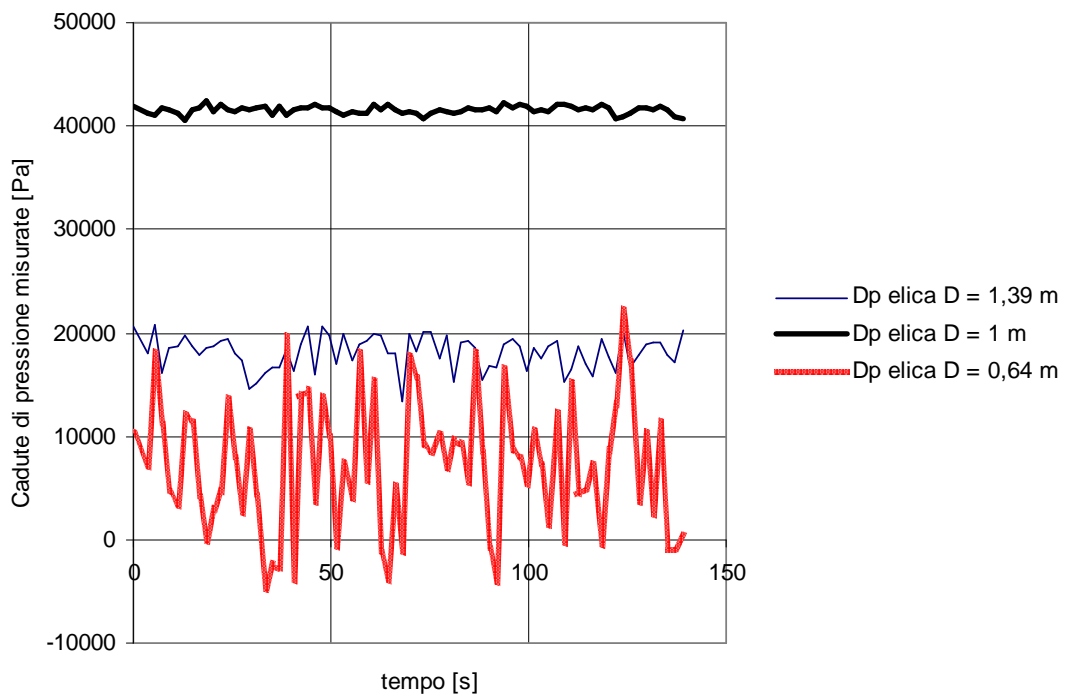


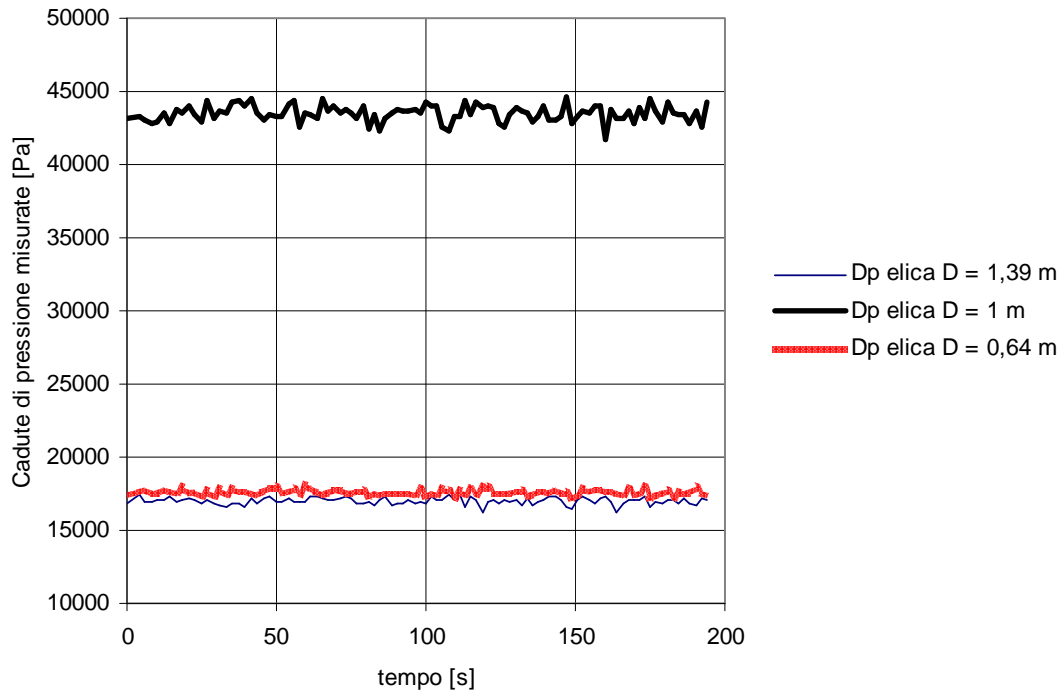
Figura 393: Andamento cadute di pressione misurate  $W_{\text{aria}} = 100 \text{ l/h}$   
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).



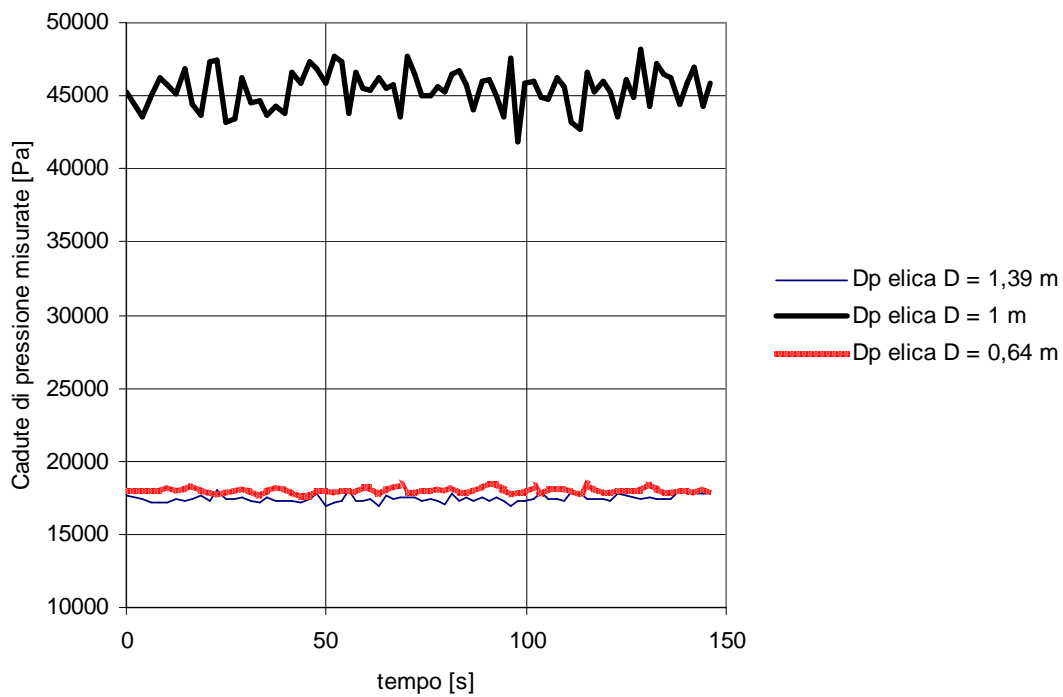
**Figura 394: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**



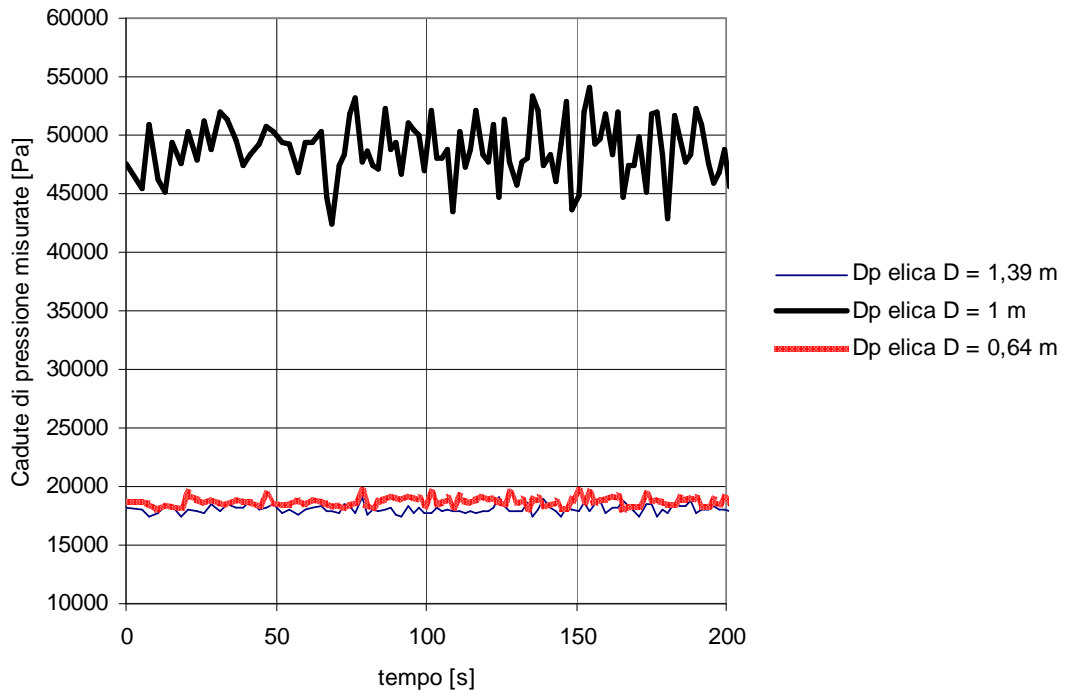
**Figura 395: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 0,64 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**



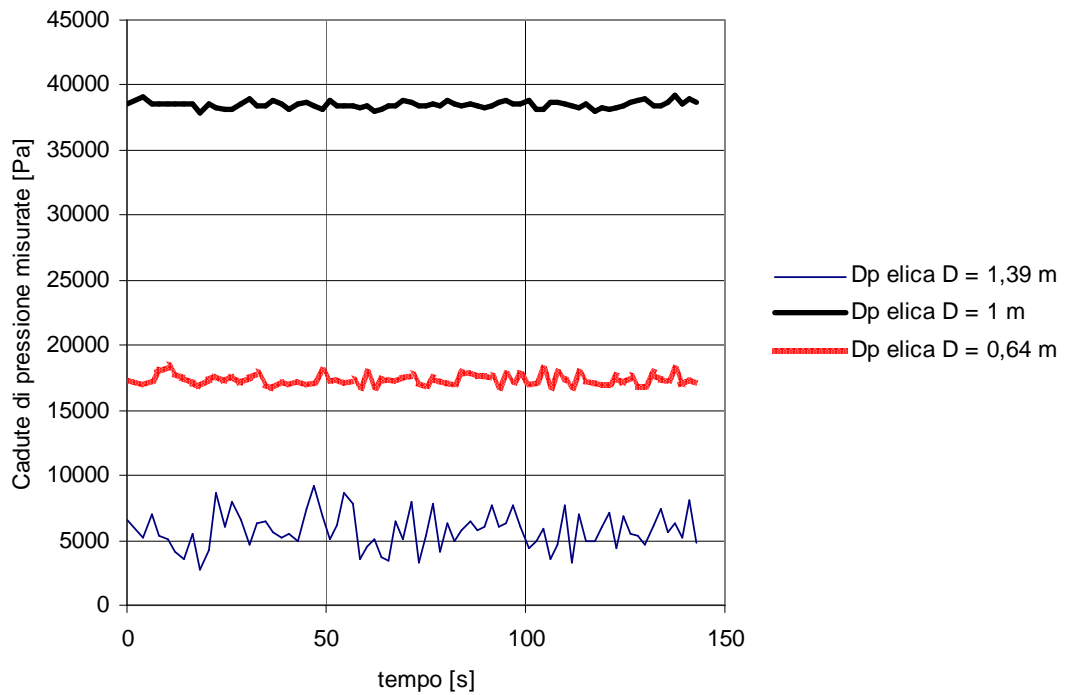
**Figura 396: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 100 l/h  
Elica  $D = 1$  m in bifase Prove tipo I (Portata  $W_4$ ).**



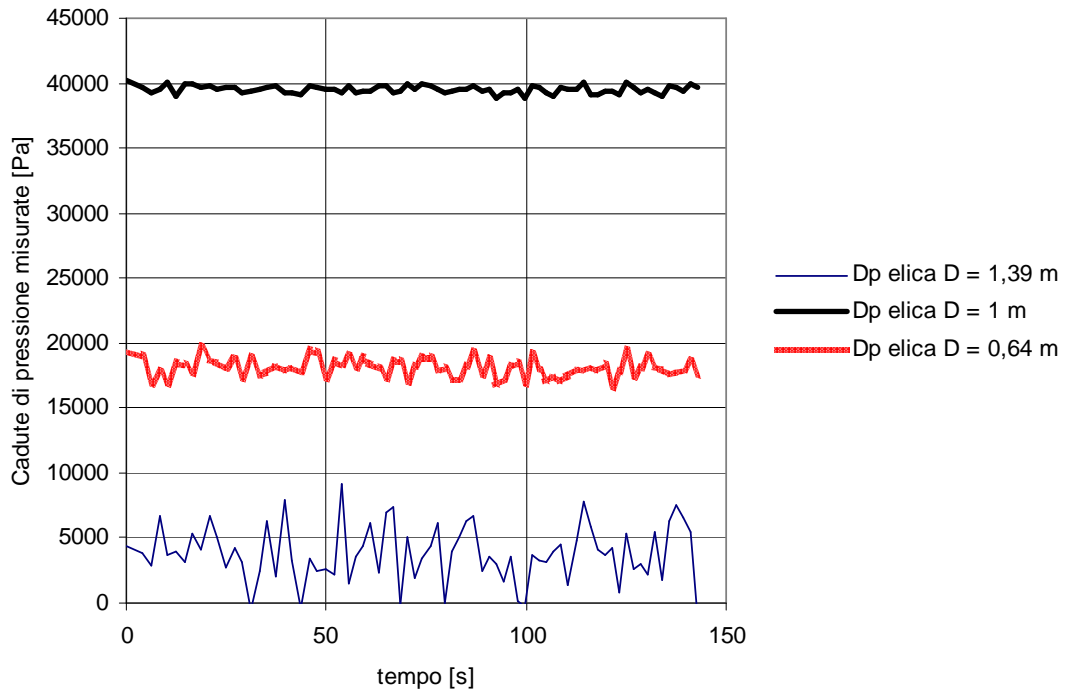
**Figura 397: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica  $D = 1$  m in bifase Prove tipo I (Portata  $W_4$ ).**



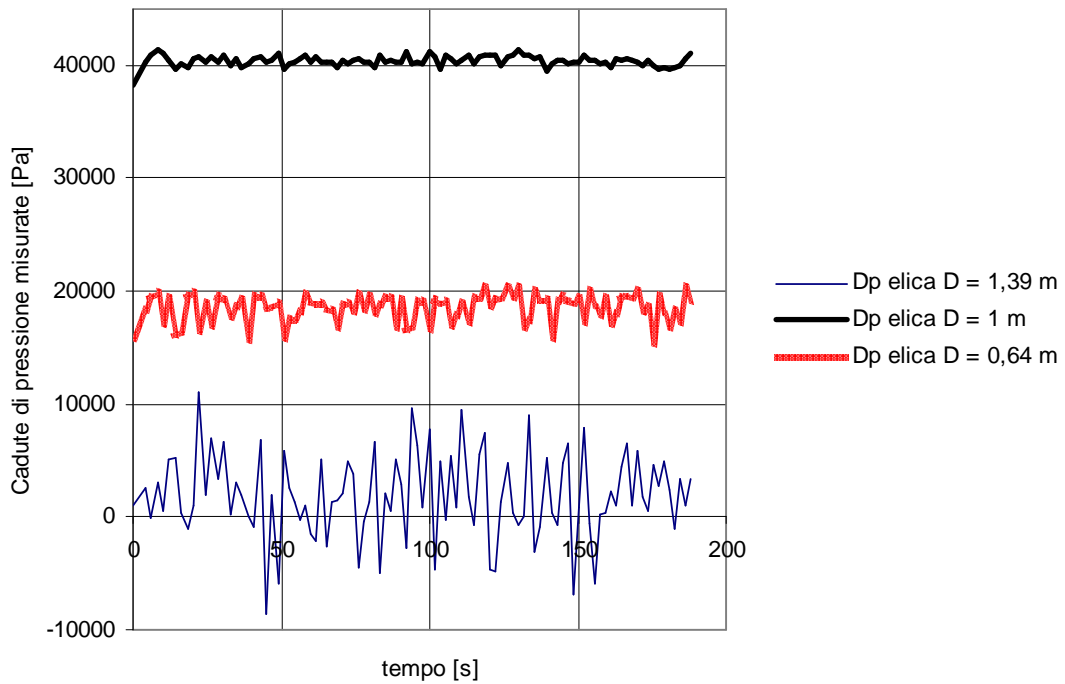
**Figura 398: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 1 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**



**Figura 399: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 100 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**



**Figura 400: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**



**Figura 401: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Elica D = 1,39 m in bifase Prove tipo I (Portata W4).**

### ***8.2.2 Distribuzione delle cadute di pressione misurate Prove II Caso I.***

In questa tipologia di prove si è imposto il deflusso bifase nelle tre eliche contemporaneamente.

Anche in questo caso si riportano, da Figura 402 a Figura 417, gli andamenti delle cadute di pressione tra ingresso ed uscita delle tre sezioni di prova in funzione del tempo per le quattro portate d'acqua totali analizzate e per le diverse portate d'aria imposte nelle sezioni di prova.

Al crescere della portata d'acqua totale le oscillazioni risultano meno ampie, mentre aumentano, come atteso, al crescere della portata d'aria iniettata nelle sezioni di prova. Le oscillazioni più ampie sono state riscontrate nelle eliche di diametro 1,39 m e 0,64 m; questa peculiarità è da attribuirsi alla minore portata d'acqua che si ha nei rami di alimento di questa due sezioni di prova, rispetto all'elica di diametro di 1 m.

In questa campagna sperimentale non si sono riscontrate le problematiche relative alla portata totale W3 che sono state rilevate nel caso delle prove di tipo I, descritte nel paragrafo precedente.

Sebbene le oscillazioni delle cadute di pressione, tra ingresso ed uscita delle sezioni di prova, siano in alcuni casi elevate è stato possibile utilizzare una caduta di pressione media per l'analisi dei risultati effettuata nei capitoli precedenti.

Per una visualizzazione complessiva del fenomeno al crescere della portata d'aria si riportano, da Figura 418 a Figura 421 anche i diagrammi riassuntivi di questa tipologia di prova.



• Portata W1

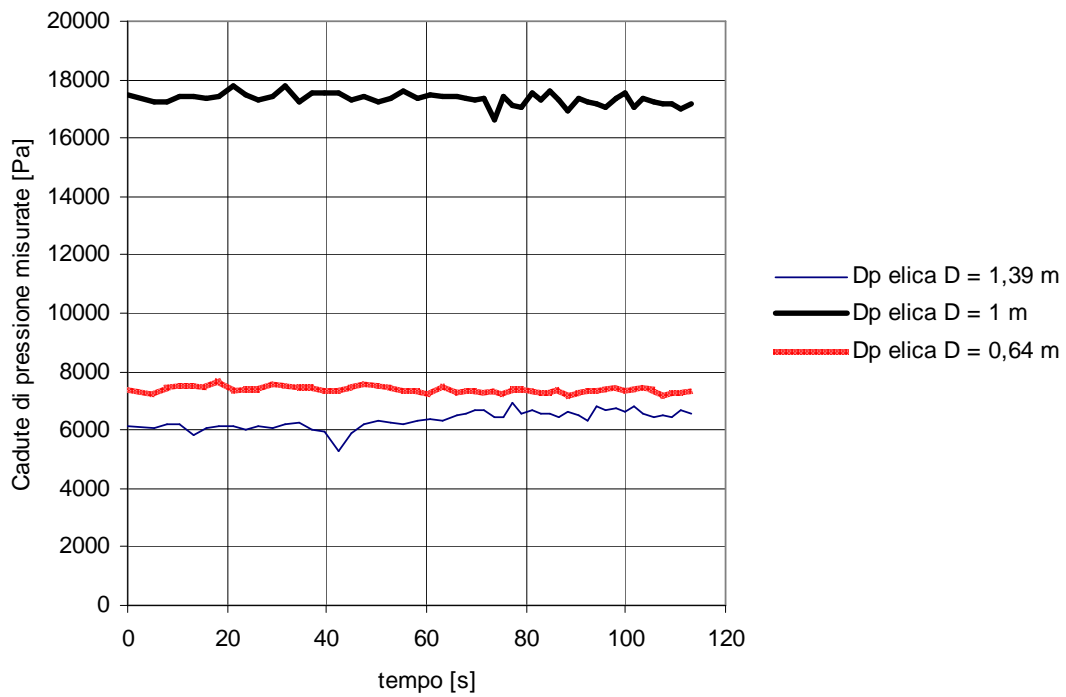


Figura 402: Andamento cadute pressione misurate monofase Prove tipo II Caso 1 (Portata W1).

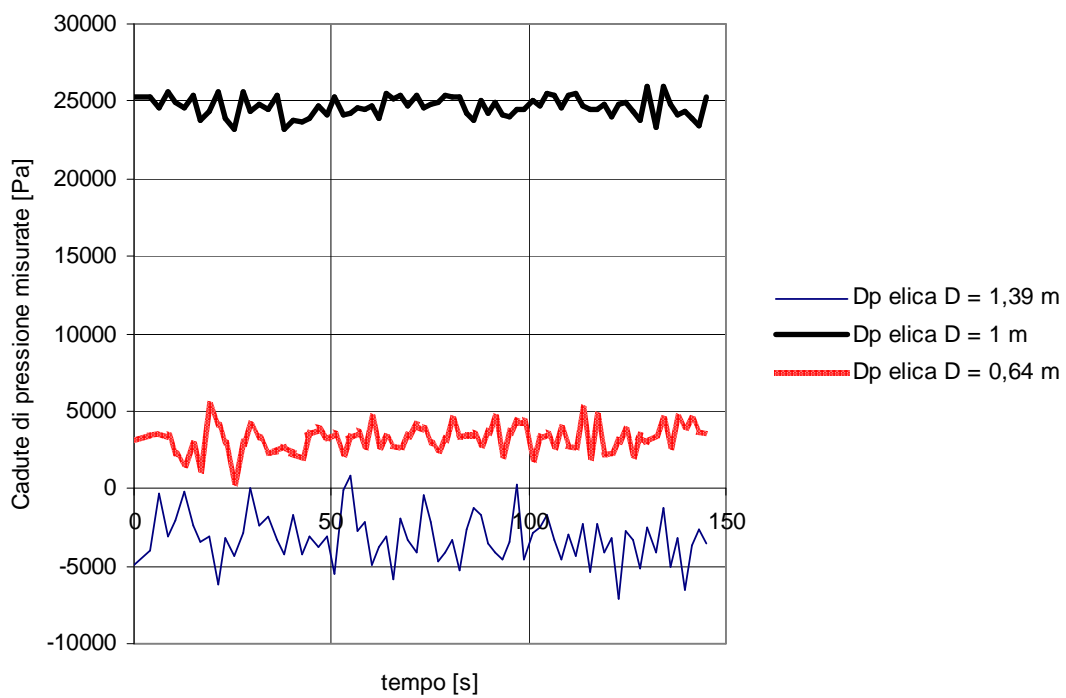
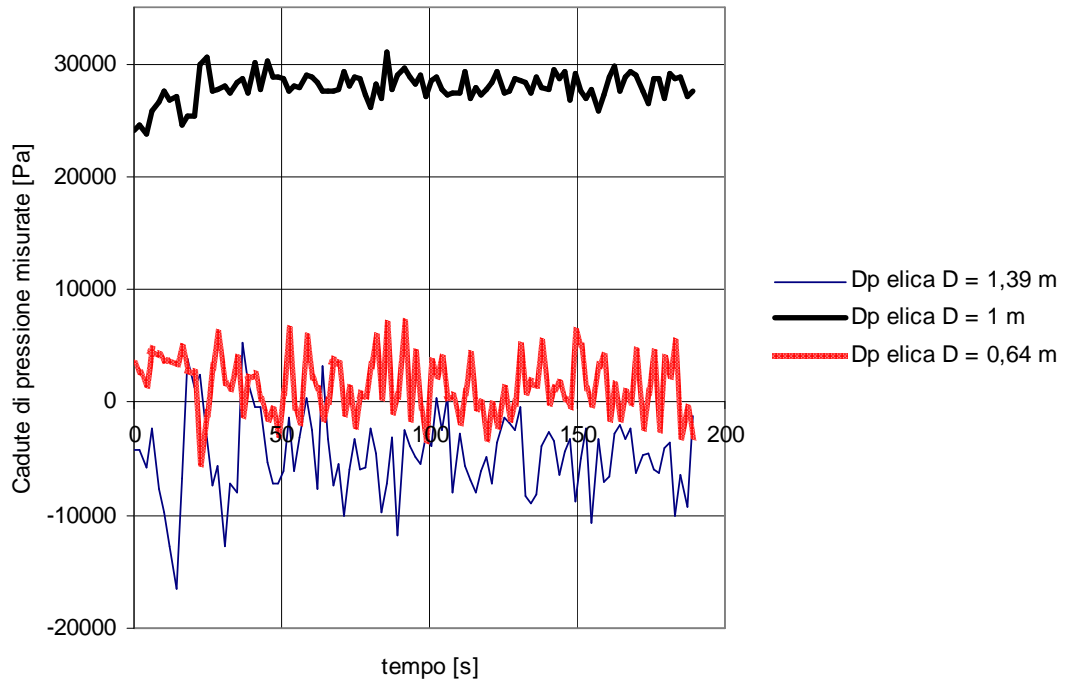
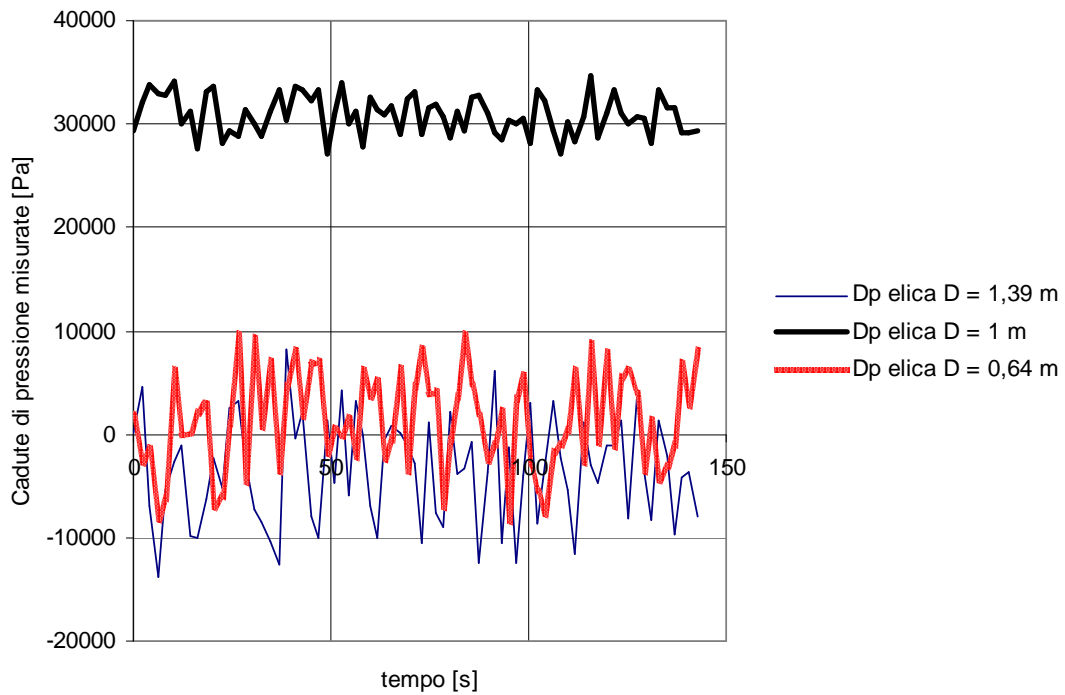


Figura 403: Andamento cadute di pressione misurate W aria = 100 l/h Prove tipo II (Portata W1).

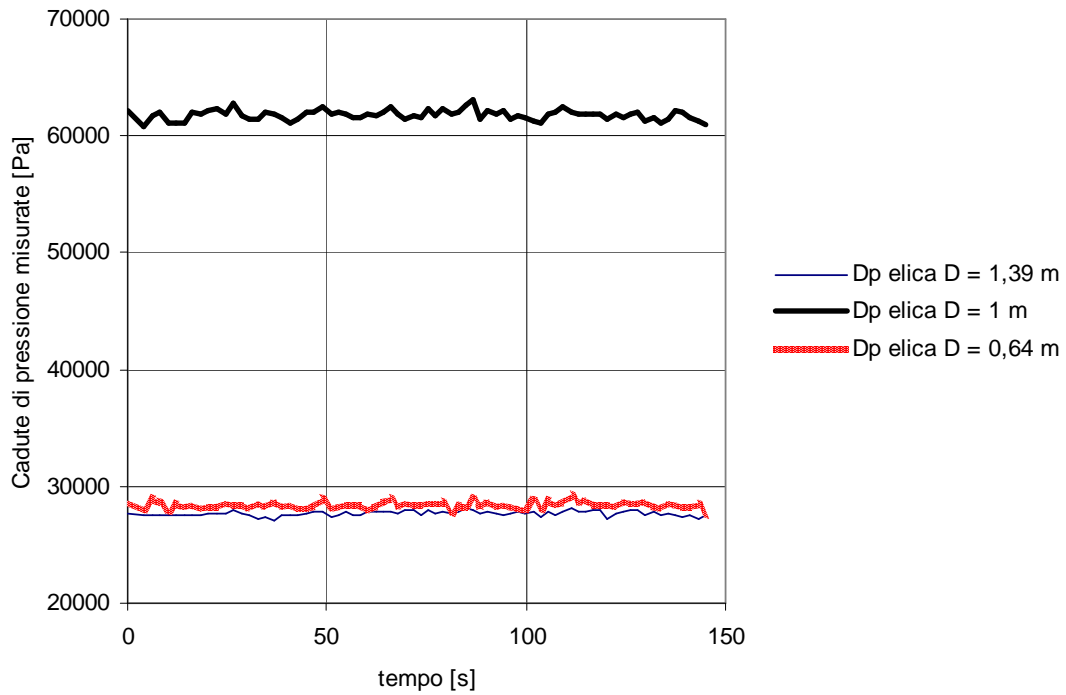


**Figura 404: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Prove tipo II (Portata W1).**

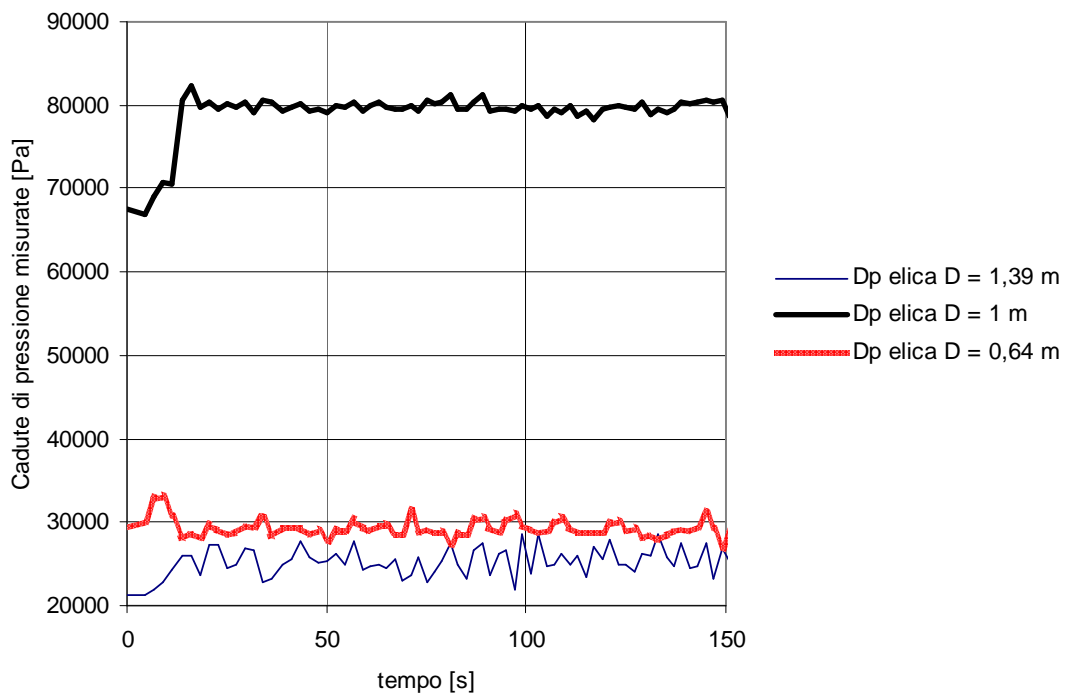


**Figura 405: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Prove tipo II (Portata W1).**

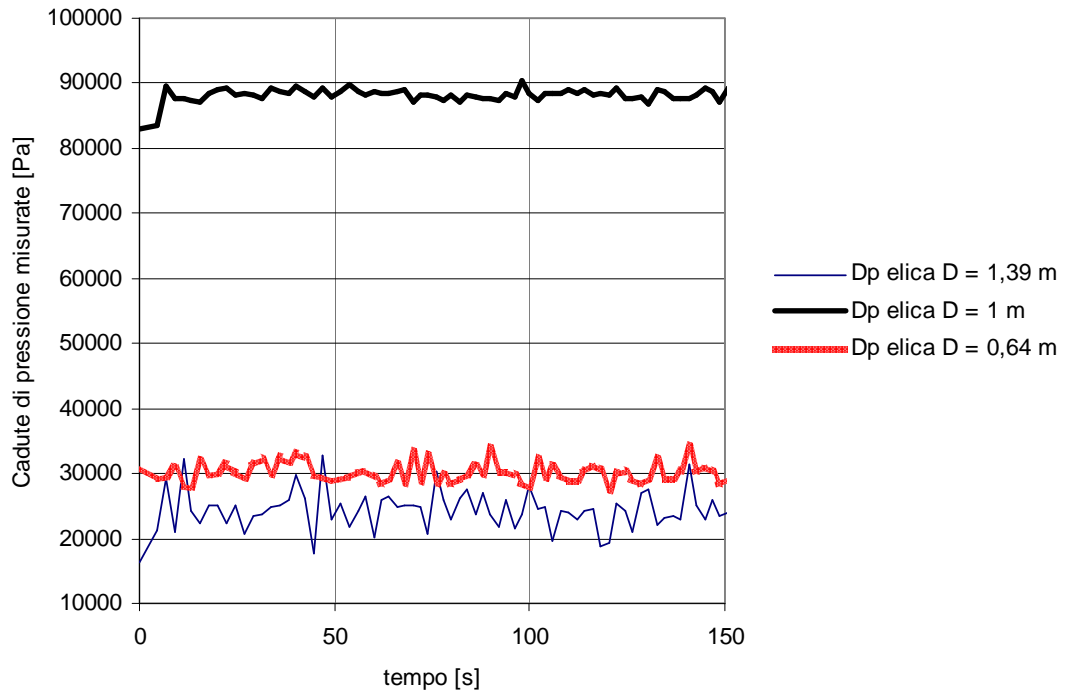
- **Portata W2**



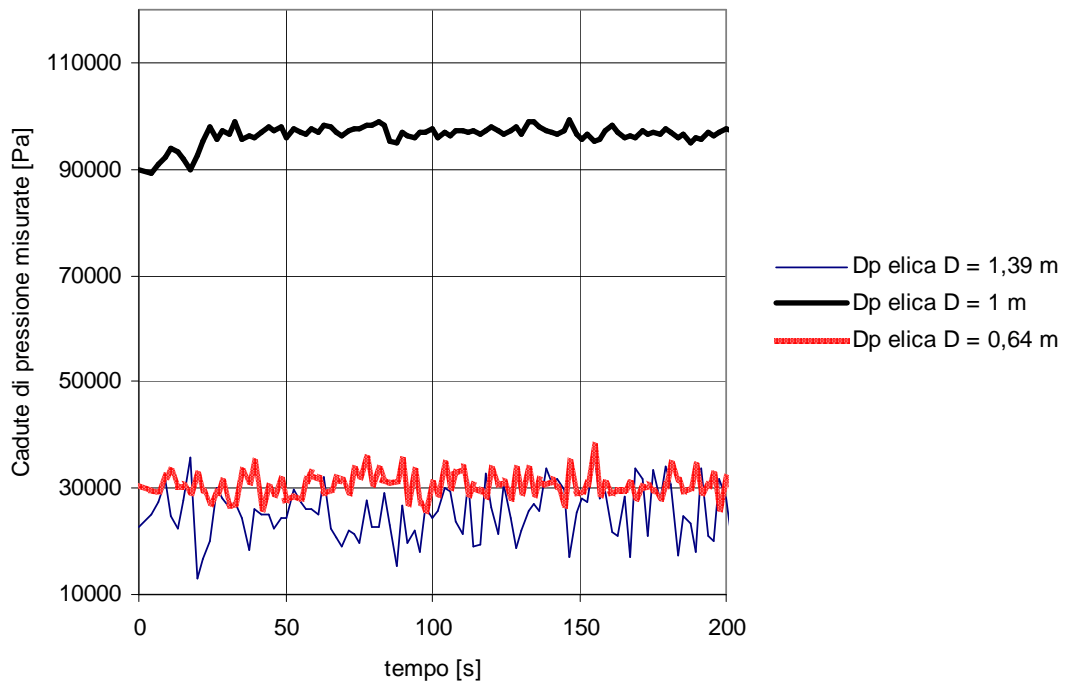
**Figura 406: Andamento cadute pressione misurate monofase Prove tipo II Caso 1 (Portata W2).**



**Figura 407: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 100 l/h Prove tipo II (Portata W2).**



**Figura 408: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Prove tipo II (Portata W2).**



**Figura 409: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Prove tipo II (Portata W2).**

• Portata W3

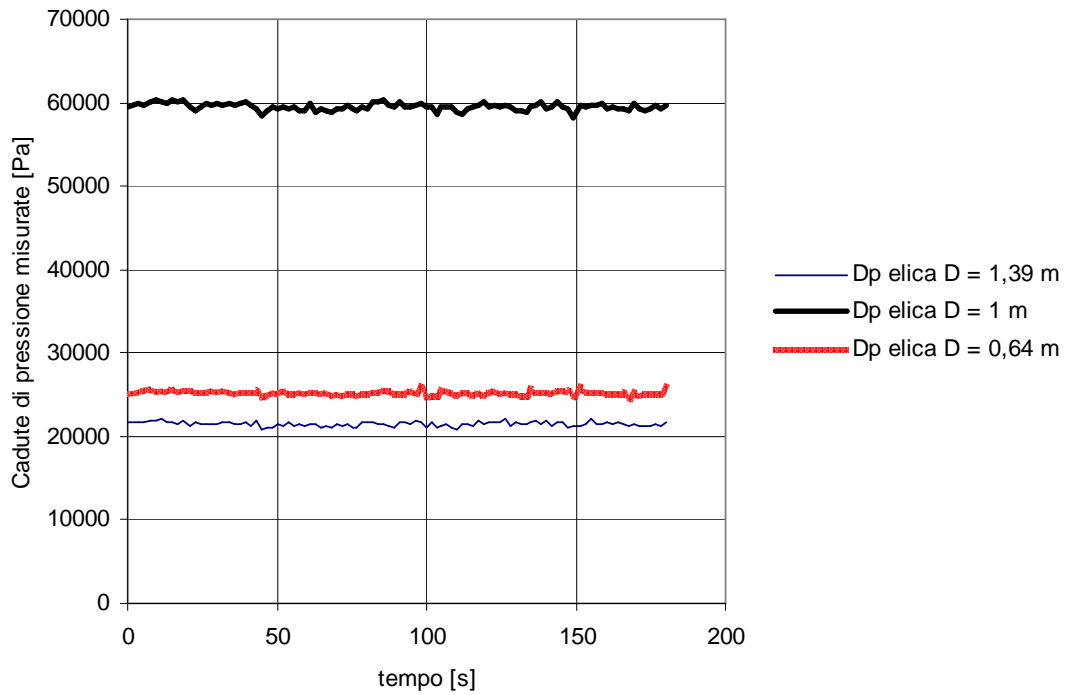


Figura 410: Andamento cadute pressione misurate monofase Prove tipo II Caso 1 (Portata W3).

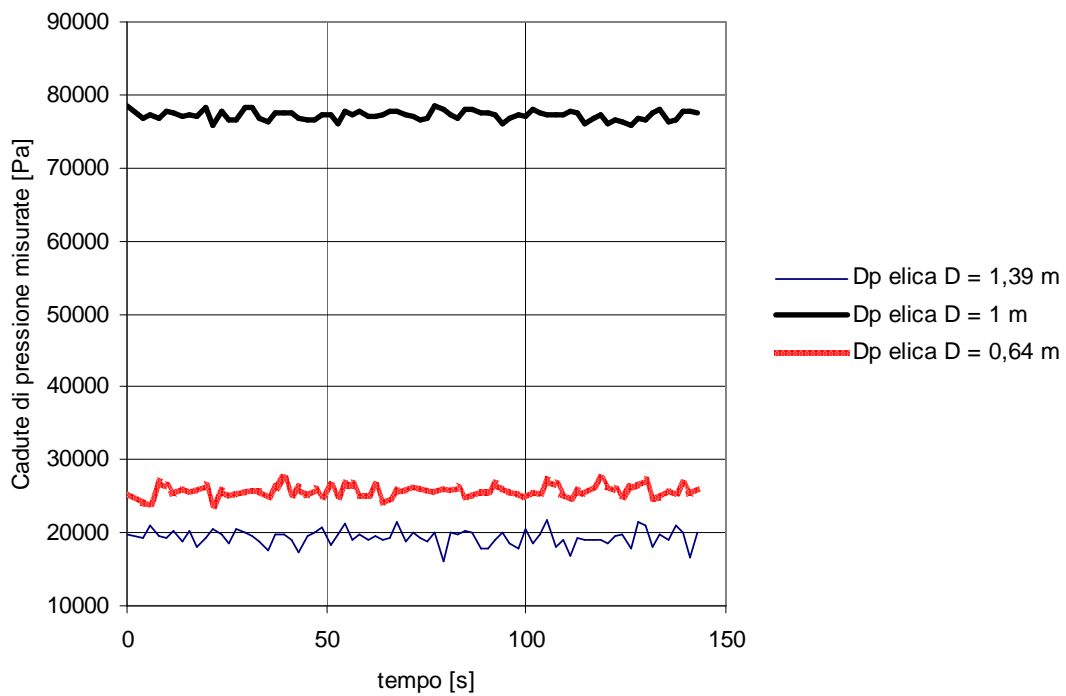
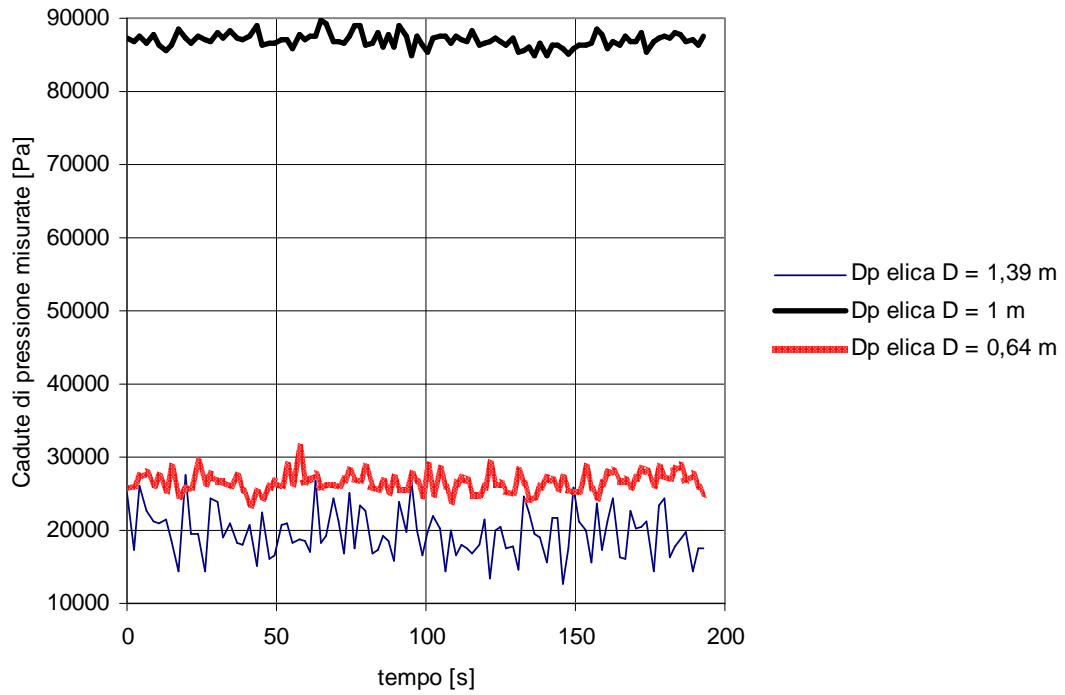
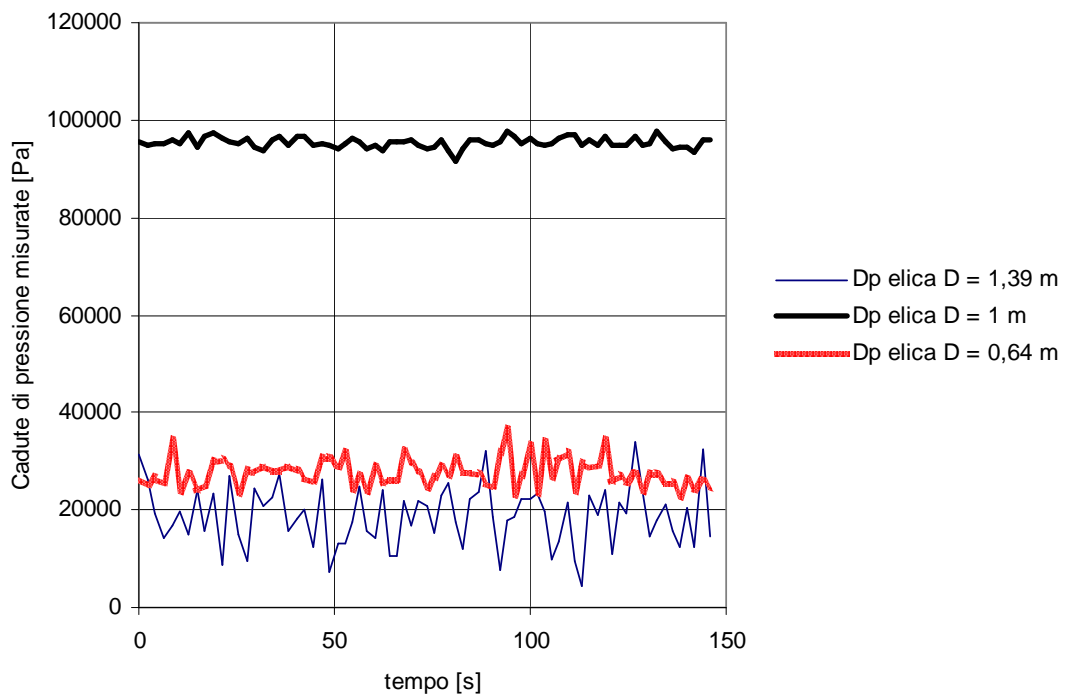


Figura 411: Andamento cadute di pressione misurate W aria = 100 l/h Prove tipo II (Portata W3).



**Figura 412: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Prove tipo II (Portata W3).**



**Figura 413: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Prove tipo II (Portata W3).**

• Portata W4

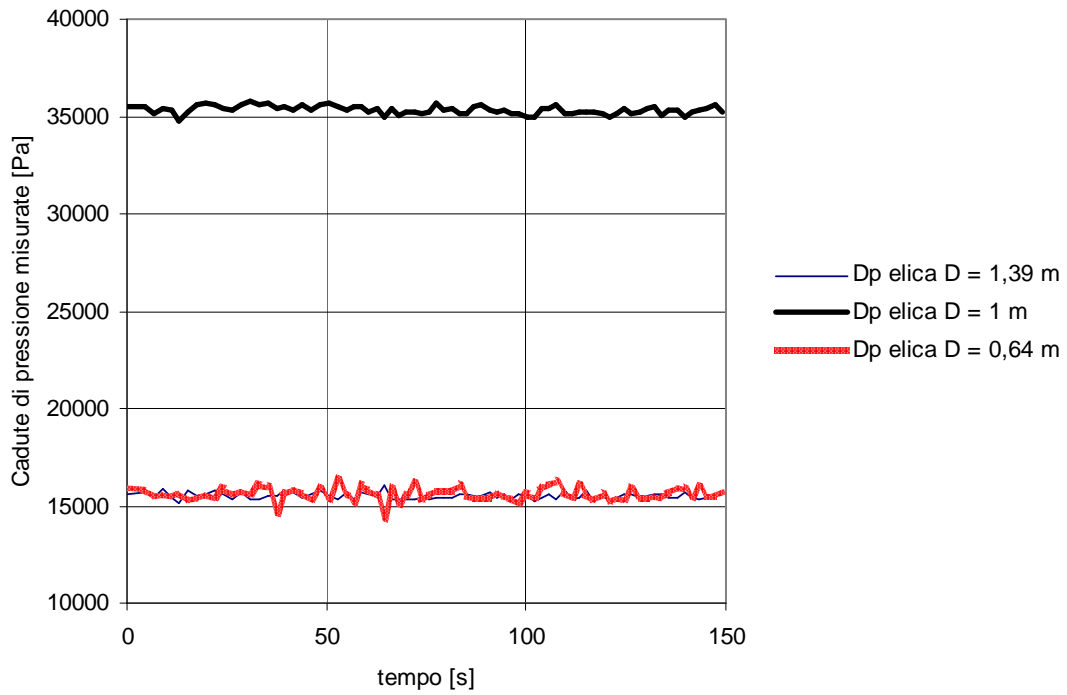


Figura 414: Andamento cadute pressione misurate monofase Prove tipo II Caso 1 (Portata W4).

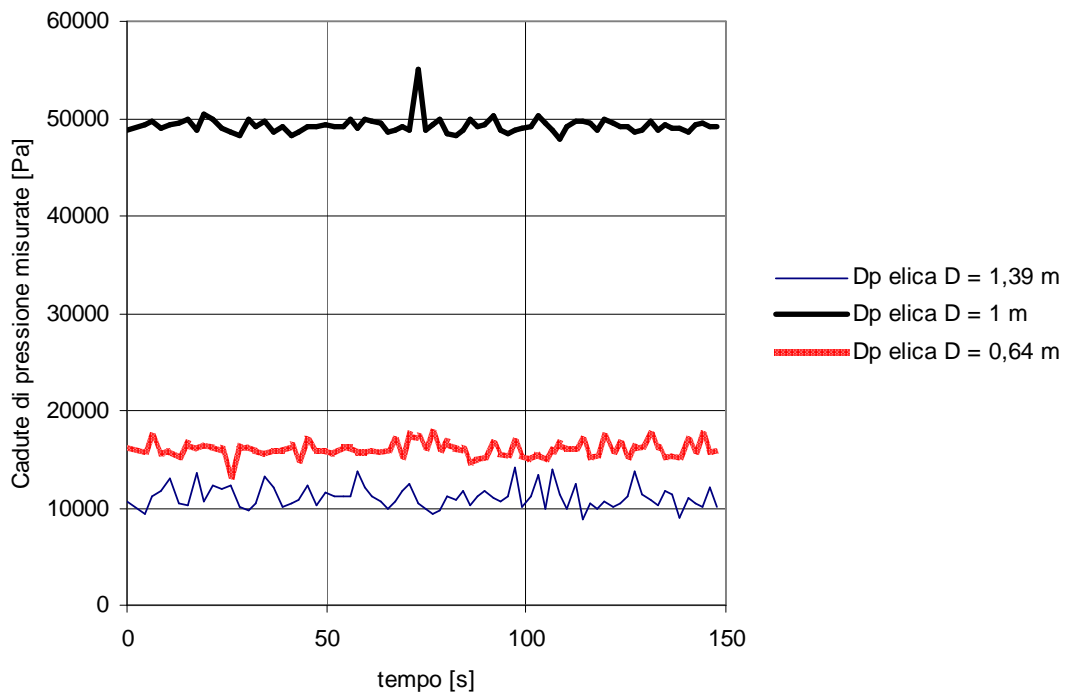
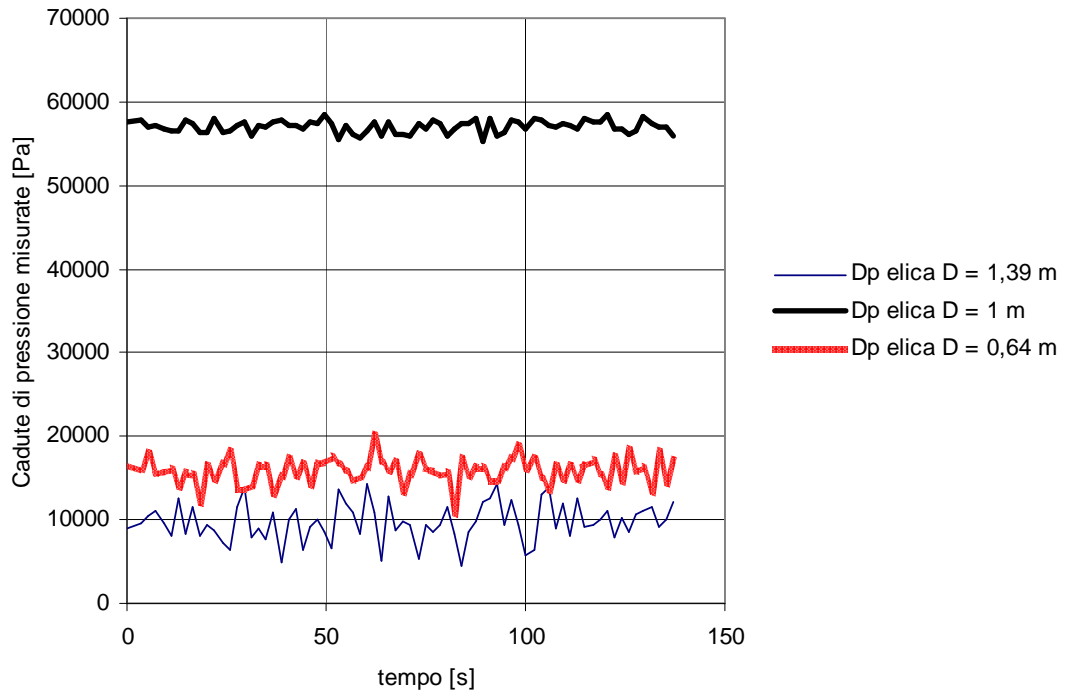
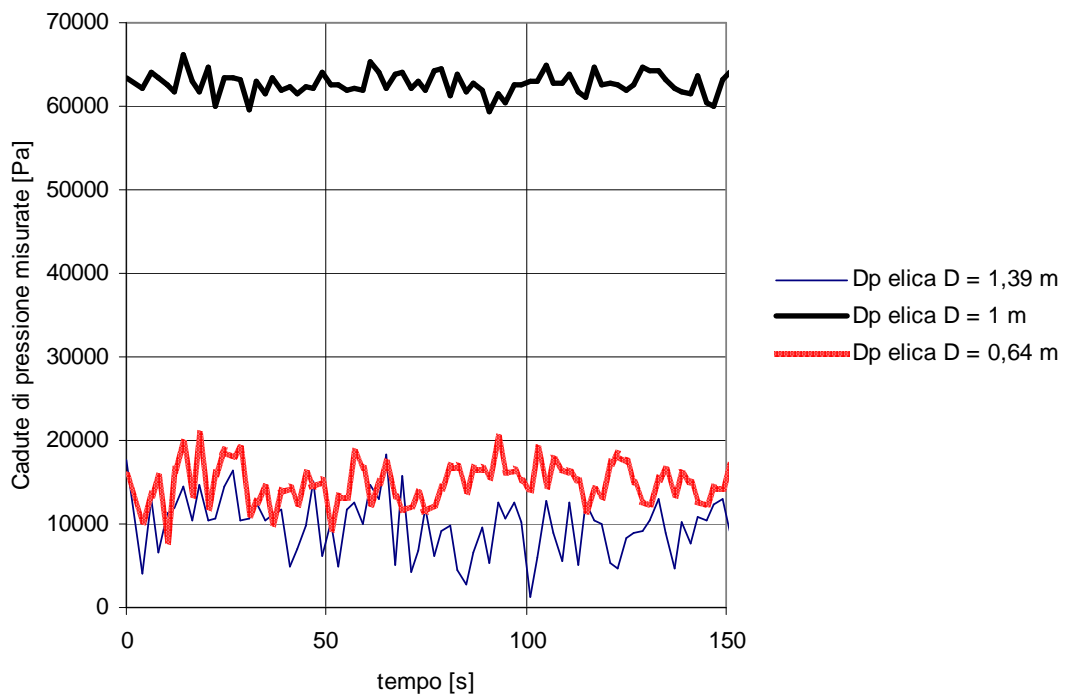


Figura 415: Andamento cadute di pressione misurate W aria = 100 l/h Prove tipo II (Portata W4).



**Figura 416: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 200 l/h  
Prove tipo II (Portata W4).**



**Figura 417: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 300 l/h  
Prove tipo II (Portata W4).**



• Diagrammi riassuntivi

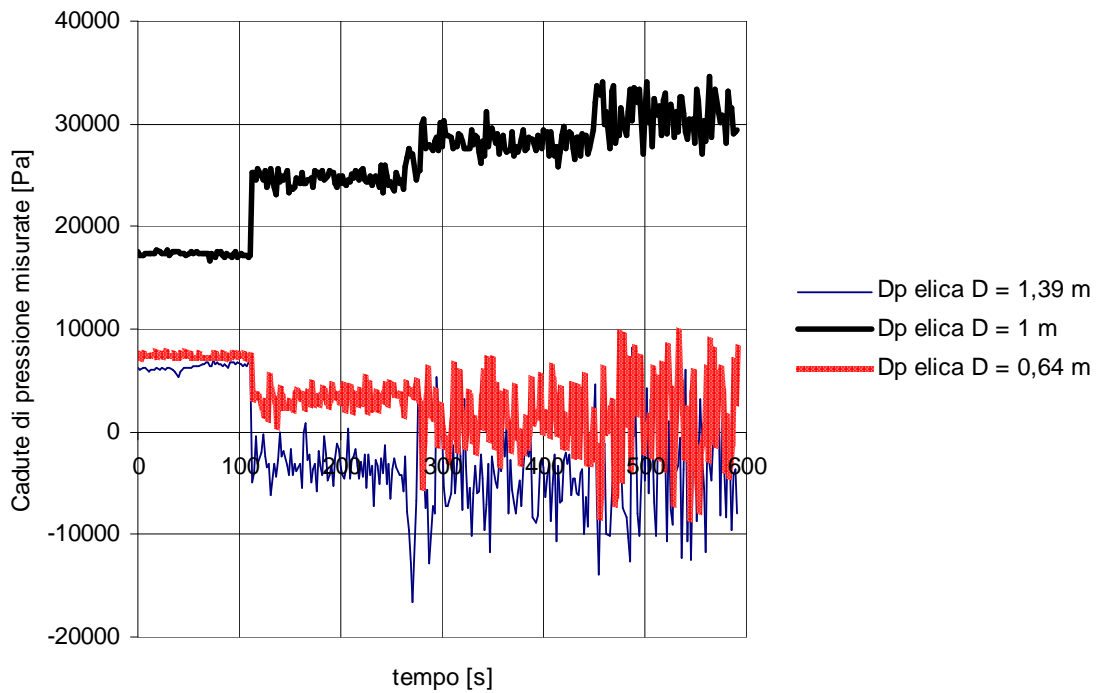


Figura 418: Andamento della portata d'acqua nei canali al variare della portata d'aria  
Prove tipo II Caso 1 (Portata W1).

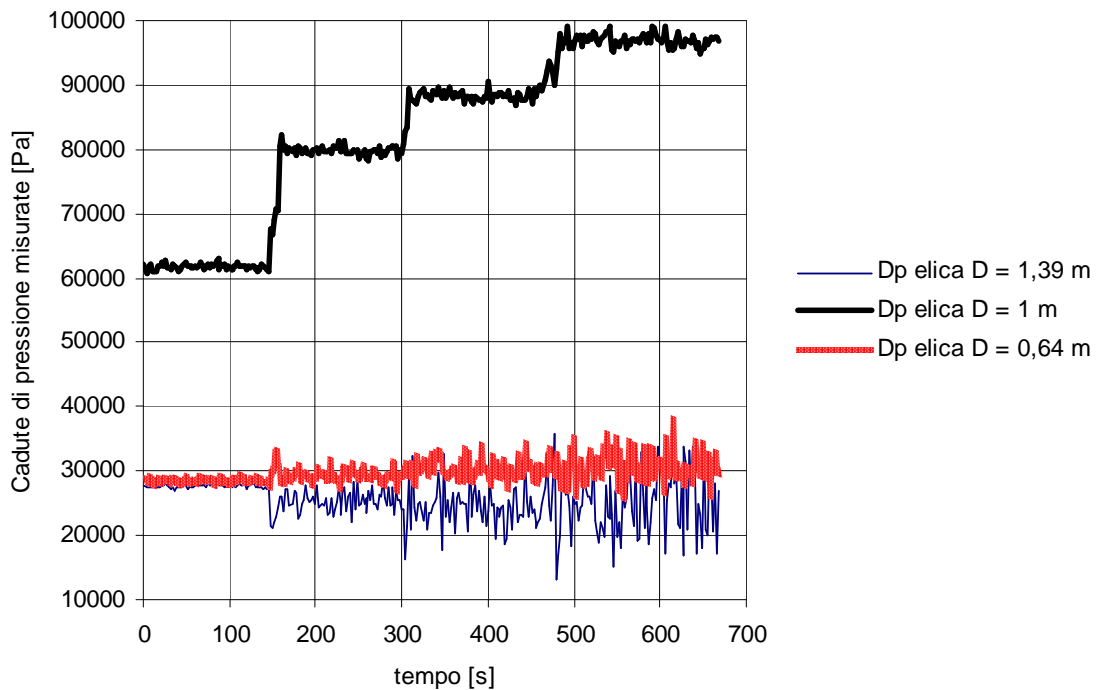
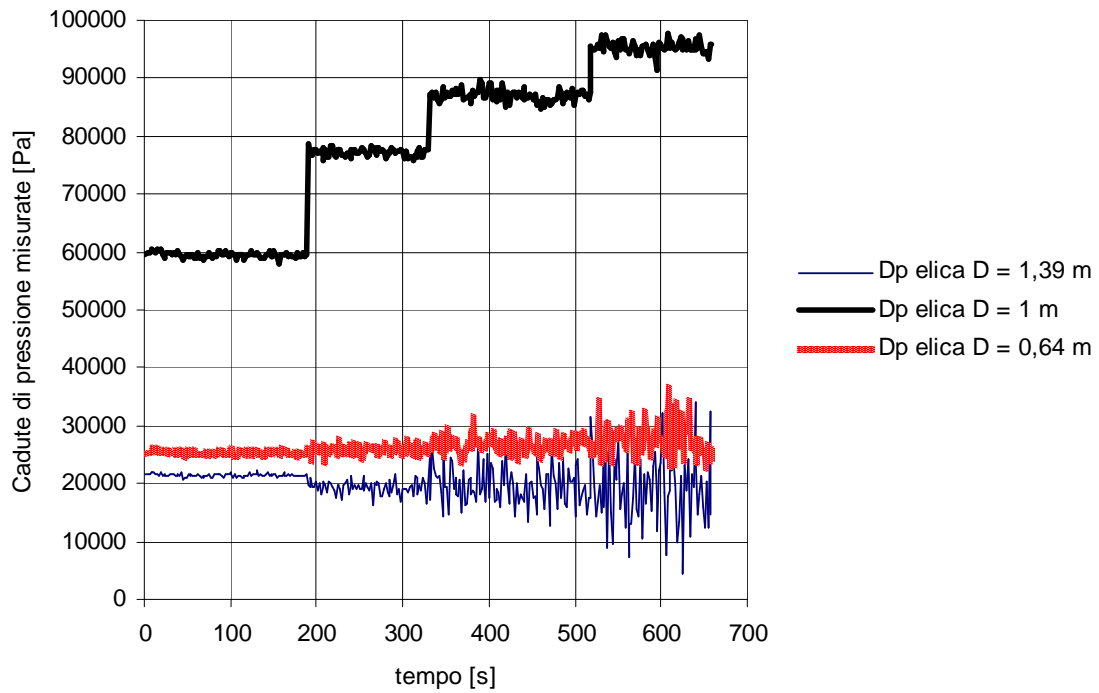
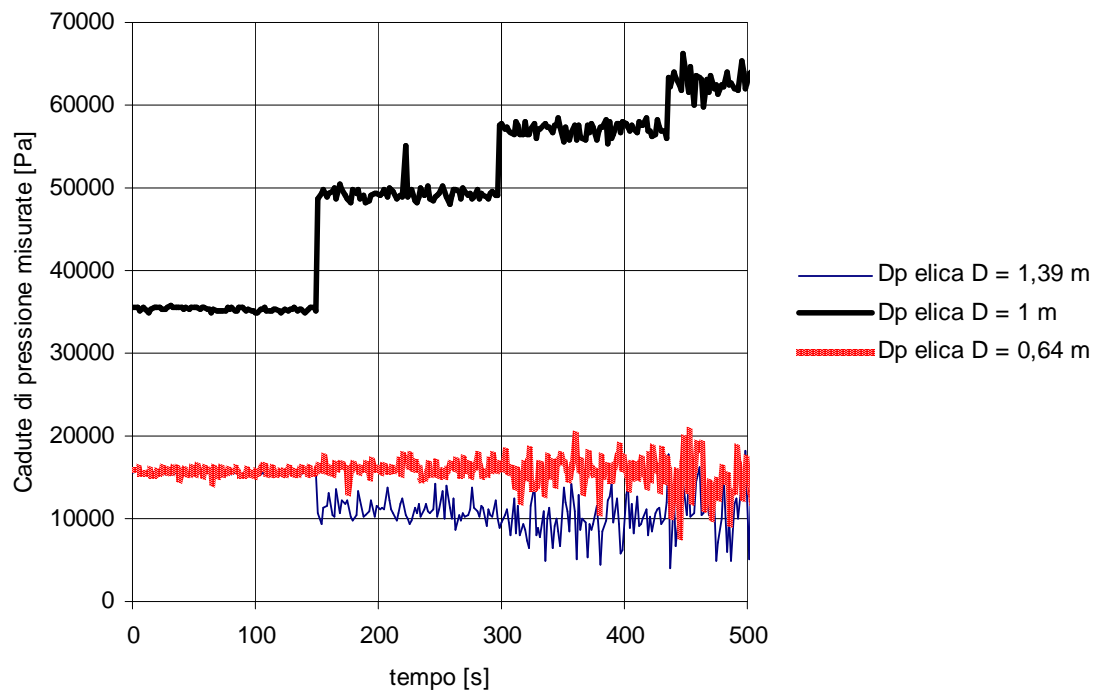


Figura 419: Andamento della portata d'acqua nei canali al variare della portata d'aria  
Prove tipo II Caso 1 (Portata W2).



**Figura 420: Andamento della portata d'acqua nei canali al variare della portata d'aria  
Prove tipo II Caso 1 (Portata W3).**



**Figura 421: Andamento della portata d'acqua nei canali al variare della portata d'aria  
Prove tipo II Caso 1 (Portata W4).**

### ***8.2.3 Distribuzione delle cadute di pressione Prove II Caso 2.***

Per questa campagna di prove si sono utilizzate portate d'acqua totali molto basse rispetto a quelle utilizzate nelle prove di tipo I e nelle prove di tipo II nel Caso 1, mentre le portate d'aria imposte sono state molto più elevate.

Come già detto in precedenza si è imposto il deflusso bifase alle tre sezioni di prova contemporaneamente.

Dall'analisi dei diagrammi, riportati da Figura 422 a Figura 429, appare evidente come, in questo caso, le cadute di pressione siano quasi costanti per ogni portata d'aria imposta nelle sezioni di prova, al contrario di quanto evidenziato nei casi precedentemente illustrati. Si può ipotizzare che per portate d'aria elevate e portate d'acqua molto basse le cadute di pressione tra ingresso ed uscita delle eliche nel caso di canali in parallelo abbiano oscillazioni trascurabili, al contrario di quanto rilevato per le portate d'aria nei canali le quali risultano avere oscillazioni estremamente marcate.

Si riportano gli andamenti delle cadute di pressione misurate tra ingresso ed uscita delle tre eliche in funzione del tempo per le due portate d'acqua totali analizzate (W5 e W6) e per le portate d'aria imposte, anche in questo caso, per una visualizzazione complessiva del fenomeno al crescere della portata d'aria, si riportano, in Figura 430 ed in Figura 431, i diagrammi riassuntivi delle prove effettuate.

• Portata W5

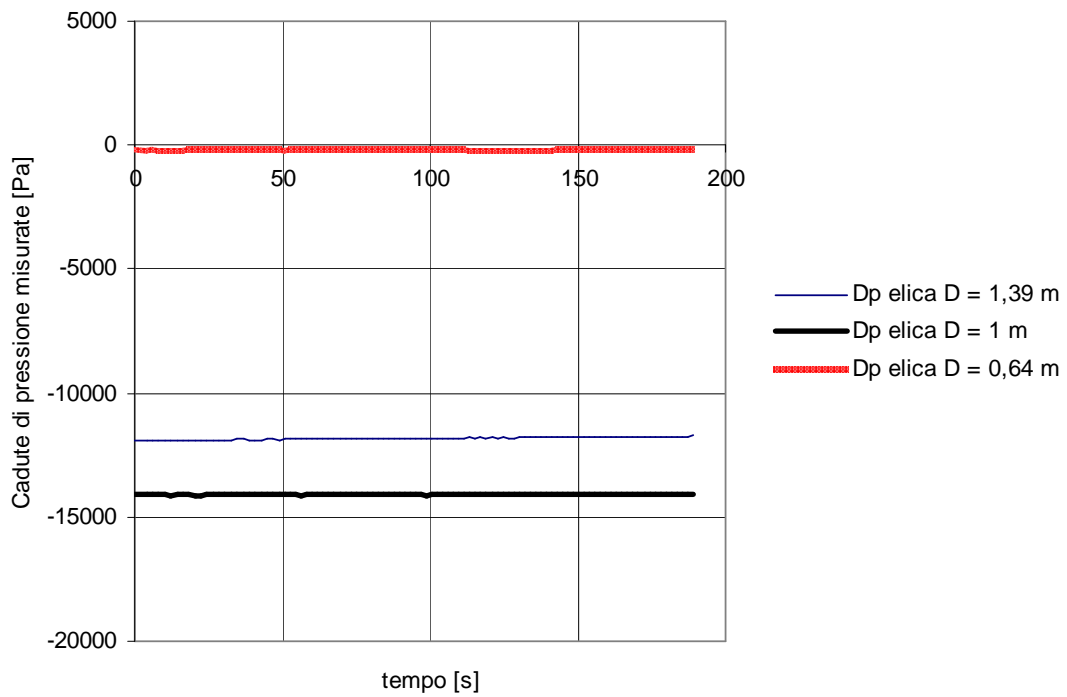


Figura 422: Andamento cadute pressione misurate monofase Prove tipo II Caso 2 (Portata W5).

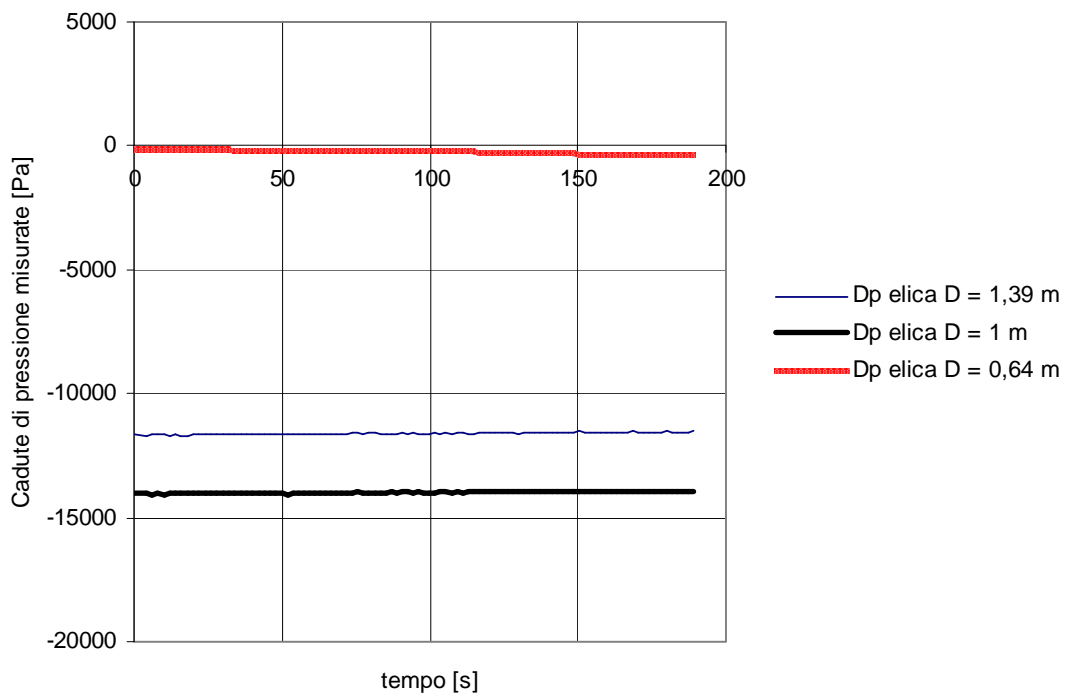
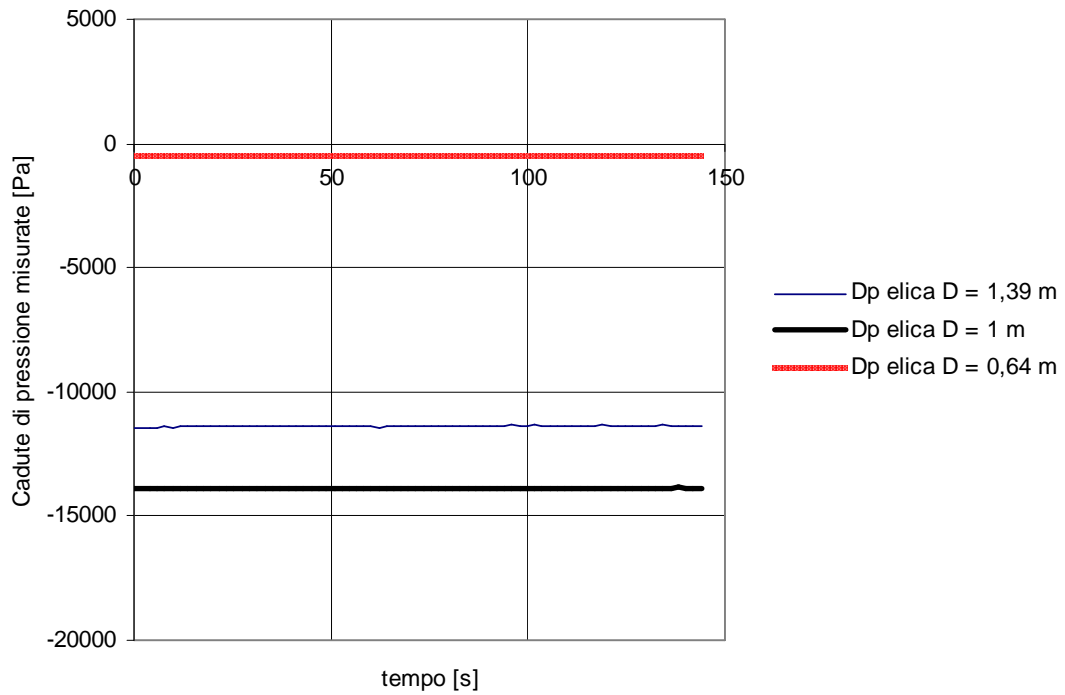
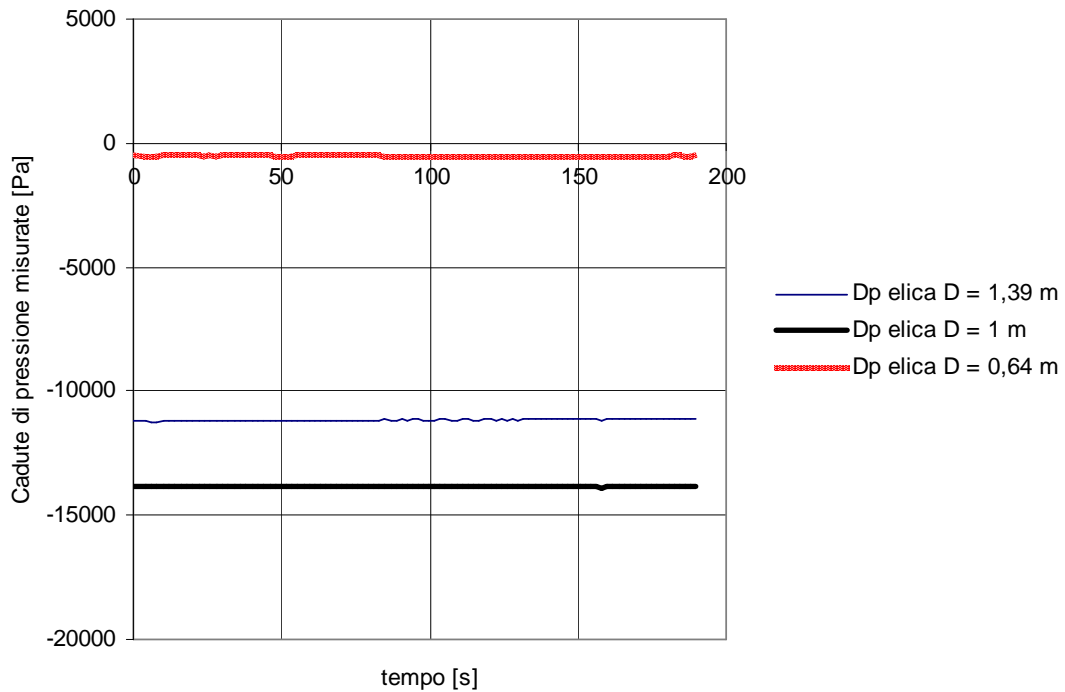


Figura 423: Andamento cadute di pressione misurate W aria = 500 l/h Prove tipo II Caso 2 (Portata W5).



**Figura 424: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 600 l/h  
Prove tipo II Caso 2 (Portata W5).**



**Figura 425: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 700 l/h  
Prove tipo II Caso 2 (Portata W5).**

- Portata W6

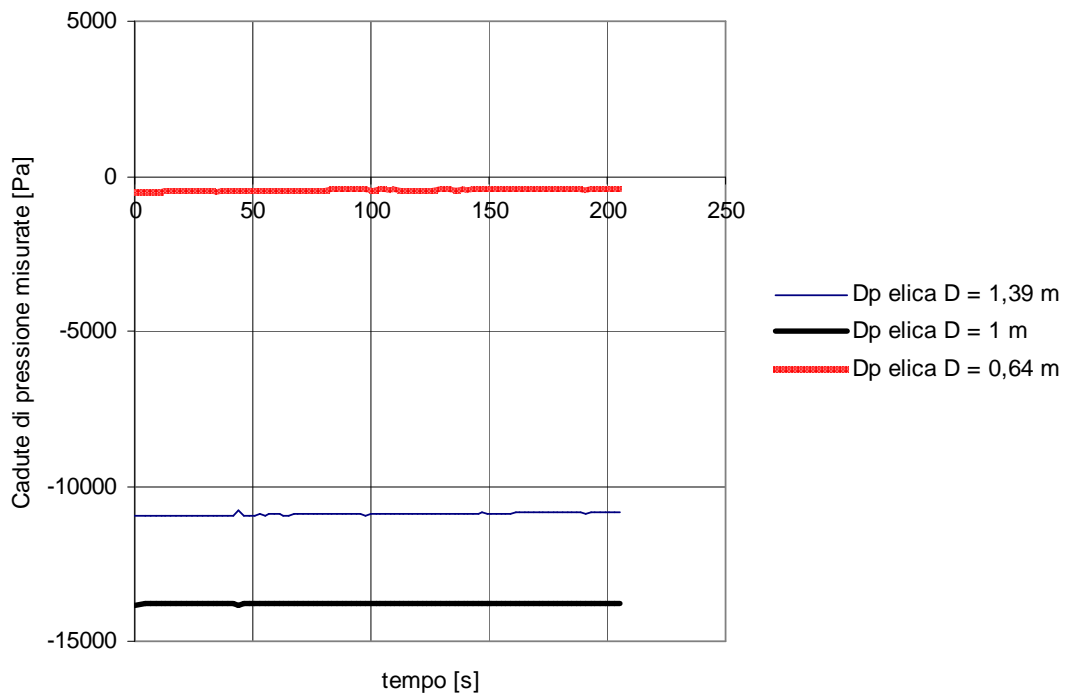


Figura 426: Andamento cadute pressione misurate monofase Prove tipo II Caso 2 (Portata W6).

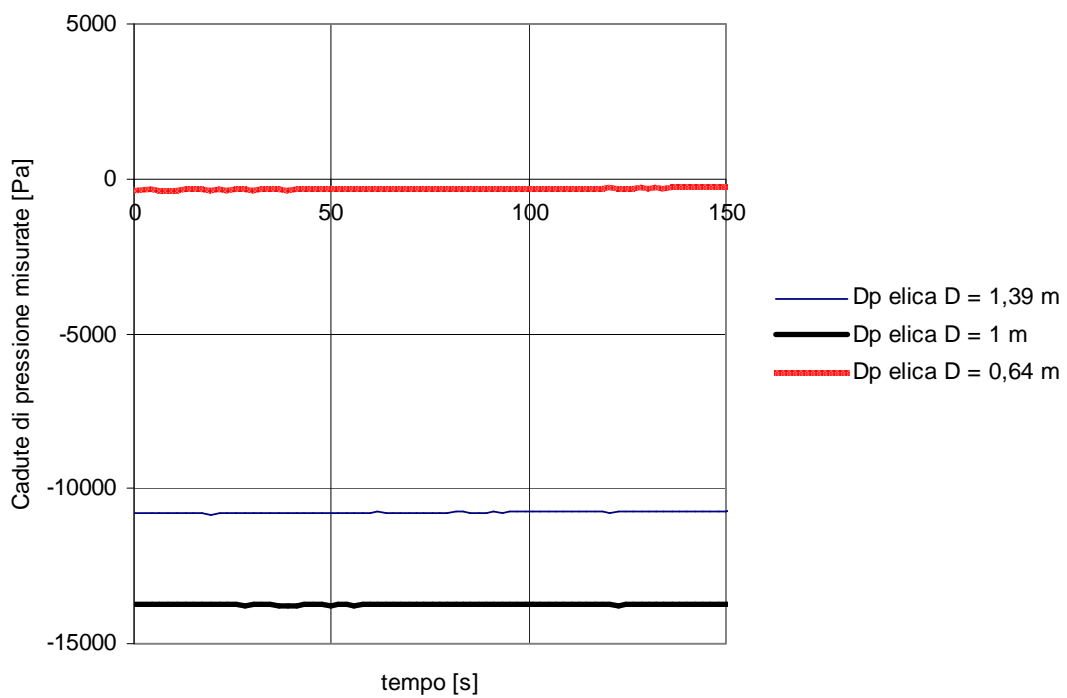
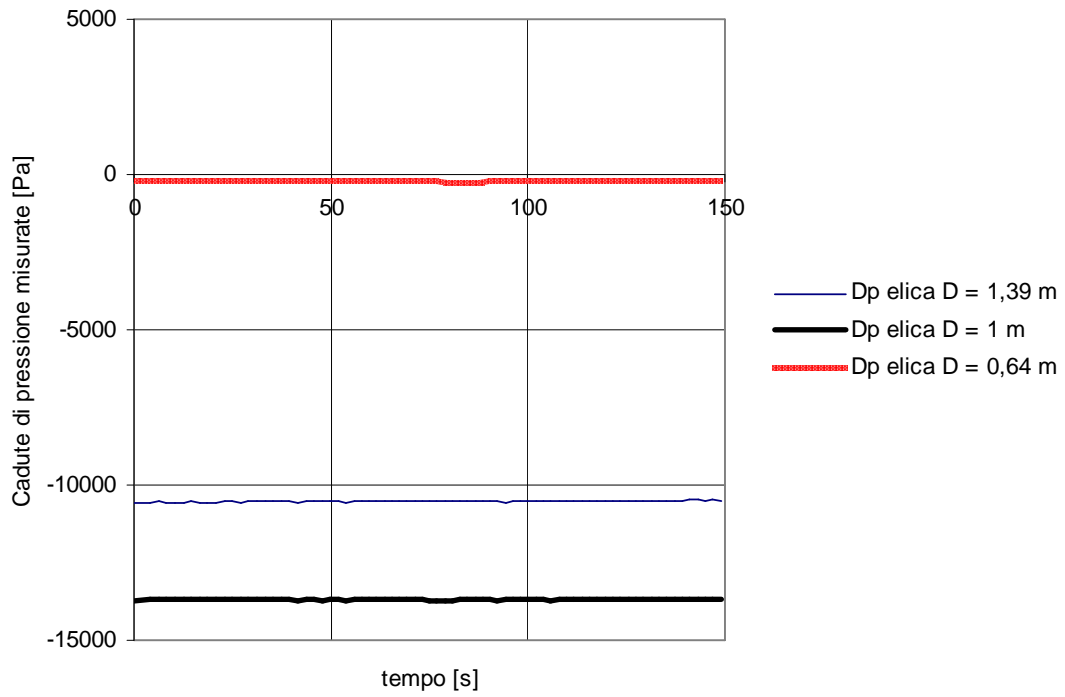
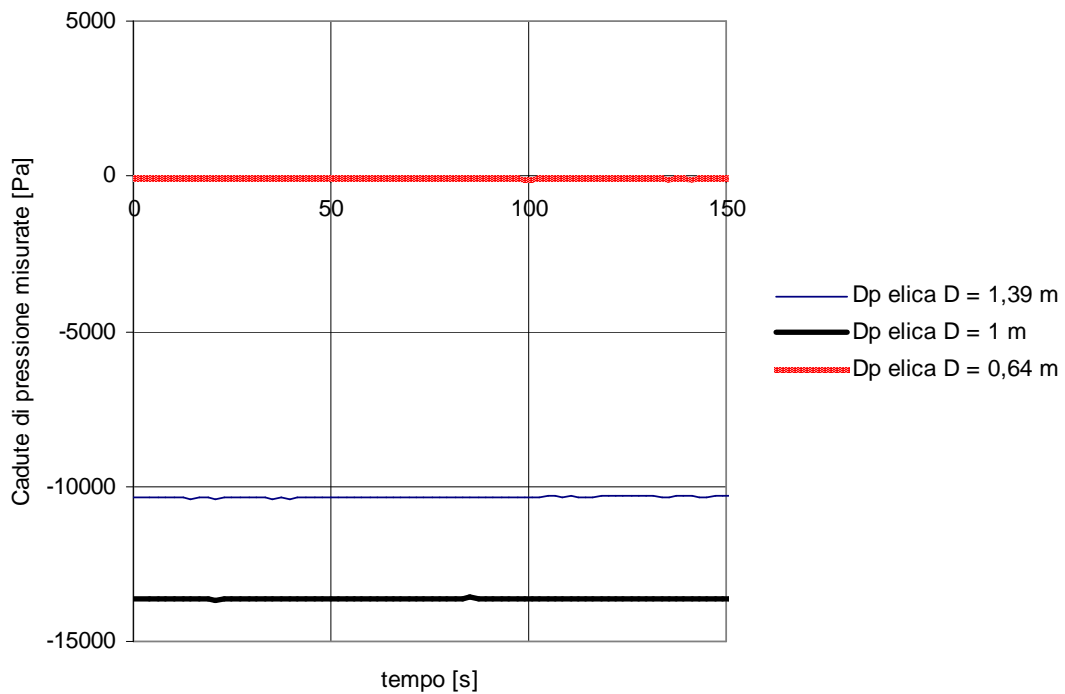


Figura 427: Andamento cadute di pressione misurate W aria = 500 l/h Prove tipo II Caso 2 (Portata W6).

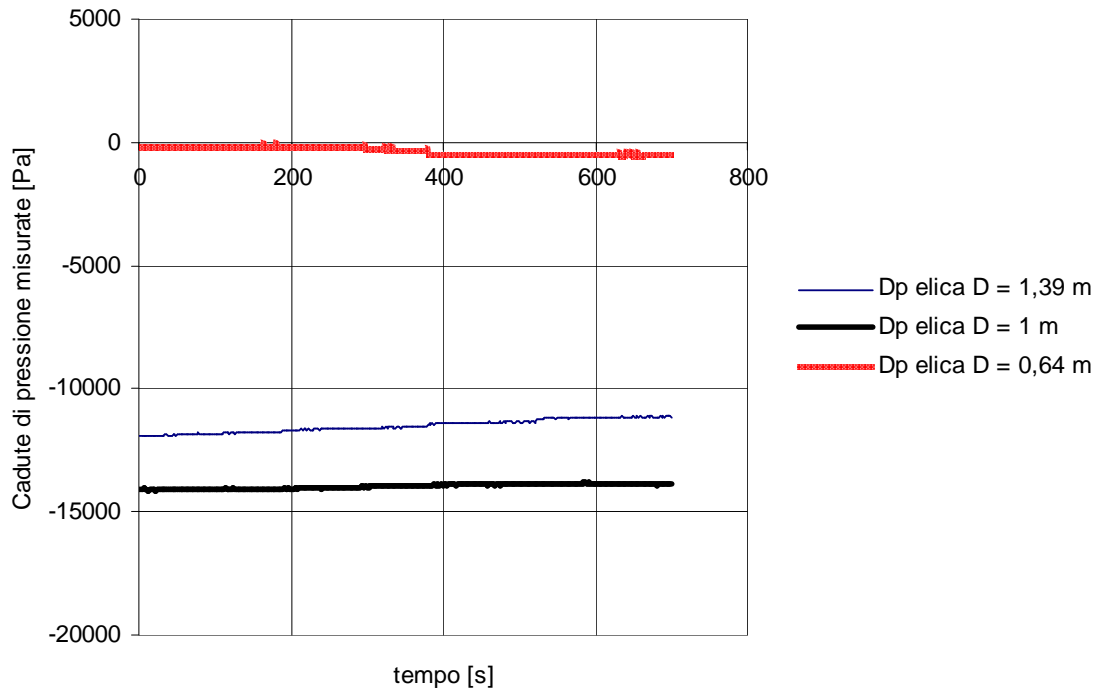


**Figura 428: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 600 l/h  
Prove tipo II Caso 2 (Portata W6).**

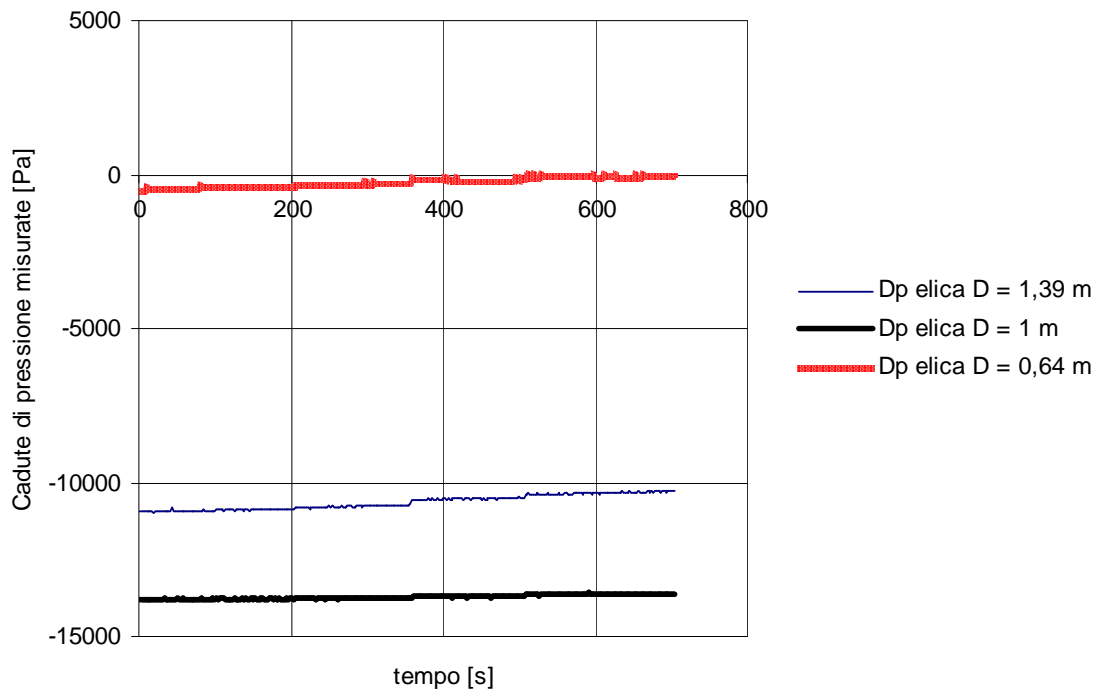


**Figura 429: Andamento cadute di pressione misurate  $W$  aria = 700 l/h  
Prove tipo II Caso 2 (Portata W6).**

• **Diagrammi riassuntivi**



**Figura 430: Andamento cadute di pressione misurate al variare della portata d'aria Prove tipo II Caso 2 (Portata W5).**



**Figura 431: Andamento cadute di pressione misurate al variare della portata d'aria Prove tipo II Caso 2 (Portata W6).**



## 9 Conclusioni.

Nell'ambito di questa ricerca si sono analizzate tre differenti sezioni di prova, costituite da tre tubi in Polimetilmetacrilato, di geometria confrontabile con quella prevista nel progetto dei generatori di vapore del reattore innovativo IRIS. Sono state effettuate due diverse campagne di prove sperimentali, sia in regime di deflusso monofase che in regime di deflusso bifase, utilizzando due distinti circuiti di prova progettati ed assemblati presso il Dipartimento Energia (ex Dipartimento di Energetica) del Politecnico di Torino.

Le tre tubazioni ad elica testate presentano diametri pari a 0,64 m, 1 m e 1,39 m e passi rispettivamente pari a 0,485 m, 0,79 m e 0,954 m; esse sono provviste di prese per la misura della pressione.

Il primo circuito di prova, denominato circuito A, è stato concepito e realizzato per testare singolarmente le tre sezioni di prova evidenziandone gli aspetti peculiari. Con questa configurazione si sono misurati e analizzate le cadute di pressione in funzione delle lunghezze delle tubazioni elicoidali.

Le prove sperimentali effettuate in deflusso monofase sono state eseguite utilizzando come fluido acqua con portate tra 200 e 800 l/h circa, corrispondenti a numeri di Reynolds compresi tra 5500 e 23800, a seconda dell'elica considerata. Si è dunque analizzata la zona di transizione da moto laminare a moto turbolento e parte della zona di deflusso turbolento. In condizioni di deflusso monofase si sono valutate le cadute di pressione tra la presa posta in ingresso alla sezione di prova e le successive otto prese.

I risultati ottenuti dall'analisi di queste prove hanno evidenziato come le cadute di pressione misurate crescano linearmente all'aumentare della lunghezza del tratto di elica considerato. Questa considerazione ci permette di affermare come le singolarità geometriche nel tubo, quali prese di pressione ed incollaggi, e gli effetti di imbocco risultino essere trascurabili ai fini della corretta valutazione delle cadute di pressione lungo il tubo ad elica.

Le cadute di pressione misurate hanno un andamento di tipo parabolico in funzione della portata d'acqua per ogni tratto di tubazione considerato e anche normalizzando i risultati ottenuti rispetto alle lunghezze di tubazione a cui si riferiscono.

Si è effettuata un'ulteriore speculazione per determinare il fattore d'attrito lungo il condotto elicoidale facendo uso dei dati sperimentali; successivamente si è confrontato il risultato ottenuto con il fattore d'attrito previsto avvalendosi di correlazioni reperibili in letteratura. In particolare si è focalizzato il confronto con la correlazione proposta da Ito, che, come verificato in precedenti studi empirici presenti nella letteratura di settore, meglio approssima i risultati sperimentali.

I risultati sperimentali ottenuti, per ogni tratto di tubazione elicoidale presa in esame, sono stati analizzati in funzione del numero di Reynolds; successivamente si sono mediati i valori in corrispondenza dello stesso numero di Reynolds e si sono comparati con i fattori d'attrito previsti dalle correlazioni di Ito e dalle correlazioni per tubi dritti, sia nel caso di deflusso laminare che nel caso di deflusso turbolento.

Il confronto di questi risultati ci permette di asserire che la correlazione di Ito per moto turbolento approssima bene i risultati sperimentali, mentre nella zona di transizione la correlazione del fattore d'attrito in tubi dritti, in condizioni di deflusso turbolento, prevede discretamente i risultati sperimentali.

Si è analizzato il caso di condizioni di deflusso bifase mediante una campagna di prove utilizzando una miscela aria – acqua. La portata d'acqua è stata variata da 200 a 400 l/h con *step* di 100 l/h e da 400 a 800 l/h con *step* di 200 l/h, mentre la portata d'aria è stata variata da 0,043 g/s a 0,26 g/s con *step* di 0,043 g/s.

Per ogni serie di prove in deflusso bifase si è valutata la pressione in ingresso alla sezione di prova, questa è stata confrontata con la pressione media nel tubo ad elica: si è accertato che i due valori si scostano di poco.

Per ogni condizione di misura si è stimato il grado di vuoto  $\alpha$  con il metodo della pesata e l'utilizzo di valvole per l'intercettazione rapida del deflusso; i valori così ricavati sono stati analizzati in funzione della portata d'aria.

Si è proceduto al confronto tra il grado di vuoto  $\alpha$  ed il titolo volumetrico  $\beta$ . Nel caso di moto omogeneo, cioè nel caso in cui le velocità del gas e del liquido presenti nella miscela in esame siano uguali, e quindi lo *slip ratio* sia pari ad 1, il grado di vuoto  $\alpha$  ed il titolo volumetrico  $\beta$  dovrebbero coincidere. Nel nostro caso in esame, invece,  $\alpha$  appare essere maggiore di  $\beta$ , questo comportamento permette quindi di asserire che la fase liquida possiede velocità maggiori rispetto alla fase gassosa, fenomeno che risulta essere maggiormente evidente per portate d'acqua elevate. Infatti lo *slip ratio* valutato

con i risultati ottenuti varia tra 0,3 e 1,3 , per basse portate d'acqua ( $W < 400$  l/h), e tra 0,3 e 0,9 , per portate d'acqua elevate ( $W > 400$  l/h).

Si è esaminato inoltre il comportamento del grado di vuoto  $\alpha$  in funzione del titolo in massa  $x$  ottenendo un andamento di tipo parabolico: il grado di vuoto cresce all'aumentare del titolo in massa e , ovviamente, della portata d'aria, a parità di portata d'acqua.

Si è calcolata, utilizzando i dati sperimentali, la velocità media della miscela  $j$ ; i risultati ottenuti permettono di affermare che la velocità media della miscela cresca con l'aumentare del titolo volumetrico  $\beta$ , del titolo in massa  $x$  e della portata d'acqua. Le velocità medie delle miscele utilizzate in questa serie di prove sperimentali sono comprese tra 0,7 e 2,2 m/s.

Sono stati calcolati sia il parametro di Martinelli  $\chi^2$  che i moltiplicatori bifase per attrito  $\Phi_{lo}$  e  $\Phi_{go}$ , rispettivamente per la fase gassosa e per la fase liquida. Analizzando i risultati ottenuti si è ricavato l'andamento di  $\Phi_{lo}$ , per ogni tratto di elica considerato, in funzione di  $\chi$  e si è ottenuta una distribuzione di punti sperimentali aventi la tendenza prevista dai risultati riportati in precedenti pubblicazioni. Si è scelto di confrontare tali risultati con correlazioni reperibili in letteratura, in particolare si sono raffrontate le previsioni del modello di Lockhart – Martinelli con  $\chi^2$ ,  $\Phi_{lo}$  e  $\Phi_{go}$  sperimentali. In questo modello è presente il coefficiente  $C$  che varia il suo valore a seconda che le fasi liquida e gassosa siano in regime laminare o turbolento, tra 5 e 20.

Da questa analisi si è dedotto che il modello considerato sottostima i dati sperimentali, soprattutto per i titoli più alti, e quindi non può essere utilizzato per prevedere il moltiplicatore bifase per attrito sia per la fase gassosa che per la fase liquida nel caso di tubazioni elicoidali. Si è avuto lo stesso esito confrontando il grado di vuoto sperimentale con il grado di vuoto stimato mediante la formulazione di Lockhart, che quindi appare opportuno non utilizzare per queste valutazioni.

Utilizzando la struttura del modello proposto da Lockhart – Martinelli per il calcolo dei moltiplicatori bifase  $\Phi_{lo}$  e  $\Phi_{go}$ , si propone come coefficiente  $C$  il numero 36,85 per il quale i risultati sperimentali sono previsti in maniera molto precisa.

In ultima analisi si è proceduto con le osservazioni, visive e mediante una videocamera ad alta definizione, dei *flow pattern* instauratisi durante le prove. Il confronto tra le osservazioni sperimentali e le previsioni ricavate utilizzando mappe di *flow pattern*,

---

per tubi dritti, presenti in letteratura, hanno evidenziato come le previsioni migliori siano dati dalle mappe per tubi dritti e deflusso orizzontale, data la pendenza contenuta del tubo ad elica in esame; queste considerazioni sono valide in particolare per la mappa di Taitel – Dukler.

L'analisi visiva e dei filmati ha permesso di rilevare che la fase gassosa si posiziona internamente rispetto all'asse del tubo elicoidale, a supporto del fatto che la sua velocità è minore di quella della fase liquida, come prima dichiarato. Questa osservazione coincide con visualizzazioni precedentemente eseguite in studi empirici presenti in letteratura. Inoltre si è notata un'accelerazione della fase gassosa, durante la risalita dell'elica, che comporta uno sviluppo dei *flow pattern* lungo il condotto.

Il secondo circuito di prova, denominato circuito B, è stato concepito e realizzato per testare le tre sezioni di prova poste in configurazione di canali in parallelo per evidenziare le instabilità fluidodinamiche e come la portata totale venga ripartita nelle tre eliche. Con questa configurazione si sono misurate e analizzate le cadute di pressione tra ingresso ed uscita delle tubazioni elicoidali, il grado di vuoto e la pressione nelle eliche. Anche per questo circuito si sono effettuate prove sia in deflusso monofase che bifase.

Le prove sperimentali effettuate in deflusso monofase sono state eseguite utilizzando come fluido acqua con portate confrontabili con quelle utilizzate nel circuito A in modo da poter procedere al confronto tra i risultati ottenuti per entrambi i circuiti di prova; da tale confronto si è potuto verificare che con il circuito B i risultati non si scostano dalla curva ricavata dai dati relativi al circuito A.

Anche nel caso del fattore d'attrito si ha un buon accordo tra i risultati ottenuti con i due circuiti sperimentali.

Per quanto concerne le prove sperimentali in deflusso bifase si sono utilizzate due tipologie di prove: prove di tipo I, in cui due eliche con deflusso monofase e la terza in deflusso bifase e prove di tipo II in cui le tre eliche sono contemporaneamente in deflusso bifase.

Per le prove di tipo I sono state testate quattro portate totali di acqua, poi suddivise nei tre rami di alimento delle eliche, pari a 290 g/s, 530 g/s, 560 g/s e 580 g/s e come portate d'aria 0 g/s, 0,25 g/s, 0,58 g/s e 0,85 g/s. Queste prove sono state realizzate

fissando la portata d'acqua e variando la portata di aria in modo discreto tra 0 (prova monofase) a 0,85 g/s.

Scopo principale del circuito B è determinare come la portata totale inviata al collettore di alimentazione si ripartisca nei rami di ingresso alle sezioni di prova e le instabilità fluidodinamiche della suddetta portata e delle cadute di pressione tra ingresso ed uscita delle eliche. Per questo motivo si sono state misurate le portate d'acqua nei rami di alimentazione delle tre eliche al variare della portata d'aria iniettata nell'elica in deflusso bifase; da questa analisi risulta che la portata d'acqua nel ramo dell'elica in deflusso bifase decresce al crescere della portata d'aria iniettata e parte della portata d'acqua si ripartisce sulle altre due sezioni di prova. Si è verificato che la regolazione della portata totale utilizzando il bypass dopo la pompa di alimentazione influisce significativamente nella redistribuzione delle portate sui rami. Con questa metodologia, non si ha una portata d'acqua costante al collettore di alimentazione poiché una parte della portata d'acqua non defluisce più nelle sezioni di prova, ma viene espulsa tramite il bypass quando la portata si ridistribuisce nei rami dopo aver variato la portata d'aria nell'elica in deflusso bifase. La differenza tra la portata totale iniziale, valutata con tutte e tre le sezioni di prova in regime monofase, e la portata totale dopo la redistribuzione delle portate varia tra 7 g/s e 85 g/s.

Per ogni condizione di prova testata si è misurato il grado di vuoto  $\alpha$  nell'elica in deflusso bifase con il metodo della pesata e l'utilizzo di valvole per l'intercettazione rapida del deflusso: per queste prove grado di vuoto  $\alpha$  risulta compreso tra 0,26 e 0,69, i valori sono confrontabili con quelli ottenuti con le prove effettuate con il circuito A. Si è quindi calcolato il titolo volumetrico; al contrario di quanto si è ottenuto con le prove effettuate con il circuito A il grado di vuoto risulta essere minore del titolo volumetrico ciò è supportato dal fatto che lo *slip ratio*  $S$  è nettamente maggiore di uno per quasi tutti i punti testati, cioè la fase gassosa percorre l'elica a velocità più alta della fase liquida.

Utilizzando i dati sperimentali si è calcolata la velocità media della miscela  $j$ : si può notare che essa cresce con l'aumentare del titolo volumetrico  $\beta$ , del titolo in massa  $x$  e della portata d'acqua. Le velocità medie delle miscele utilizzate in questa serie di prove sperimentali sono comprese tra 1,27 e 5,2 m/s, valori molto maggiori di quelli ottenuti con le prove effettuate con il circuito A.

Si è valutato il paramento di Martinelli nelle condizioni sperimentali e il moltiplicatore bifase per attrito per la fase liquida e per la fase gassosa con le formulazioni usate in per il circuito A.

Si sono confrontate le formulazioni presenti in letteratura, per il calcolo del fattore di moltiplicazione bifase per tubi diritti, con i risultati ottenuti dall'analisi delle prove effettuate. Risulta esserci un buon accordo con le previsioni delle correlazioni per moto turbolento. Anche in questo caso si sono confrontati e i moltiplicatori bifase per attrito utilizzando i dati sperimentali con le previsioni del modello di Lockhart – Martinelli: raffrontando i risultati del modello utilizzando i quattro parametri  $C$  in esame ed i risultati dell'analisi sperimentale. Si può verificare che i valori dei moltiplicatori bifase per attrito, sia per la fase gassosa che per la fase liquida, possono essere stimati utilizzando il modello di Lockhart - Martinelli con un coefficiente  $C$  che varia tra 5 e 35 a seconda della prova effettuata.

Confrontando il grado di vuoto sperimentale con il grado di vuoto stimato mediante la formulazione di Lockhart si ha che, per ogni portata d'acqua totale testata, il grado di vuoto sperimentale è maggiore del grado di vuoto previsto dal modello.

Si è proceduto con le osservazioni, visive e mediante una videocamera ad alta definizione, dei *flow pattern* instauratisi durante le prove ed il loro confronto con le previsioni ricavate utilizzando mappe di *flow pattern*, per tubi diritti, presenti in letteratura. Per questa tipologia di prove i pronostici migliori sono dati dalle mappe per tubi diritti e deflusso orizzontale, in particolare le mappe più che danno previsioni più 'veritiere' sono la mappa di Hewitt - Roberts e la mappa di Baker.

Le prove effettuate con il circuito B, definite come prove di tipo II in cui a tutte e tre eliche è imposto il deflusso in regime bifase contemporaneamente, sono state ulteriormente suddivise in due casi distinti, Caso 1 e Caso 2, per analizzare più chiaramente i fenomeni d'interesse.

Per il Caso 1 si sono utilizzate le portate totali d'acqua totali già prese in esame nelle prove di tipo I, pari a 290 g/s, 530 g/s, 560 g/s e 580 g/s e le portate d'aria di 0,25 g/s, 0,58 g/s e 0,85 g/s; per il Caso 2 si sono testate le portate totali d'acqua 112 g/s e 240 g/s, e le portate d'aria di 1,45 g/s, 1,65 g/s e 1,9 g/s.

Nel Caso 1 la distribuzione della portata totale nei tre rami subisce una notevole variazione nel corso delle prove, infatti al crescere della portata d'aria imposta nelle eliche la portata d'acqua nei rami decresce. La differenza tra la portata d'acqua in

regime monofase e quella che si ha nel caso di deflusso bifase è fortemente influenzata dall'utilizzo del bypass dopo la pompa di alimentazione per la regolazione della portata. La differenza tra la portata d'acqua totale iniziale, valutata con tutte e tre le sezioni di prova in regime monofase, e la portata d'acqua totale nelle prove in regime bifase risulta essere proporzionale alla portata d'aria imposta nelle eliche.

Il grado di vuoto  $\alpha$ , il titolo in massa  $x$  e il titolo volumetrico  $\beta$  sono stati valutati con la stessa metodologia delle prove I. Il grado di vuoto per queste prove risulta compreso tra 0,14 e 0,67; questi valori sono confrontabili con quelli ottenuti con le prove di tipo I.

A causa della redistribuzione della portata d'acqua nei rami al variare della portata d'aria nell'elica in condizioni bifase si ottengono differenti gradi di vuoto. Il grado di vuoto risulta minore del titolo volumetrico, al contrario di quanto si ottenuto con le prove effettuate con il circuito A, lo *slip ratio*  $S$  è quindi maggiore di uno per tutti i punti testati: la fase gassosa percorre l'elica a velocità più elevata della fase liquida.

Si è calcolata la velocità media della miscela  $j$ : essa crescere con continuità all'aumentare sia del titolo in massa  $x$  che del titolo volumetrico  $\beta$ , e quindi all'aumentare della portata d'aria, ed incrementa il suo valore con l'aumento della portata d'acqua. I valori di  $j$  calcolati per il Caso1 sono compresi tra 1,6 e 5,6 m/s e sono confrontabili con quelli trovati per le prove di tipo I.

Si è valutato il paramento di Martinelli nelle condizioni sperimentali e il moltiplicatore bifase per attrito con le formulazioni usate in precedenza. Si sono confrontati i risultati ottenuti dall'analisi delle prove effettuate con questa metodologia con le formulazioni presenti in letteratura per il calcolo del fattore di moltiplicazione bifase per tubi diritti.

Anche per questa campagna di prove c'è un buon accordo tra le previsioni delle correlazioni per moto turbolento e i risultati sperimentali per quanto riguarda le eliche di diametro 1,39 m e 0,64 m, mentre per l'elica di diametro 1 m i dati sperimentali si scostano molto dai valori previsti dal modello, risultando molto maggiori.

Si è proceduto al confronto tra i risultati sperimentali e le previsioni del modello di Lockhart - Martinelli utilizzando i valori del parametro  $C$  già adottati nelle precedenti analisi. I valori dei moltiplicatori bifase per attrito delle eliche di diametro pari a 1,39 m e 0,64 m, sia per la fase gassosa che per la fase liquida, possono essere stimati utilizzando il modello di Lockhart-Martinelli con un coefficiente  $C$  che varia tra 10,64 e 35 a seconda della prova effettuata. Per quanto concerne invece l'elica di diametro

pari a 1 m il modello non riesce a prevedere i valori dei moltiplicatori bifase per attrito per nessun coefficiente  $C$  compreso tra 5 e 35.

Si è confrontato il grado di vuoto sperimentale con il grado di vuoto teorico calcolato con la formulazione di Lockhart: l'elica di diametro pari a 1,39 m, per ogni portata d'acqua totale testata, risulta avere un grado di vuoto sperimentale leggermente maggiore o confrontabile con quanto previsto dal modello, mentre per le altre due sezioni di prova si ha un grado di vuoto sperimentale maggiore di quello previsto dal modello. Solo nelle condizioni di portata totale W1 il grado di vuoto sperimentale per l'elica di diametro pari a 0,64 m risulta maggiore delle previsioni della formulazione di Lockhart.

I *flow pattern* instauratisi durante le prove, rilevati con le osservazioni visive e mediante una videocamera ad alta definizione, sono stati confrontati con le previsioni ricavate utilizzando mappe di *flow pattern*, per tubi dritti, presenti in letteratura: per queste prove tutte le mappe prese in esame sembrano dare delle previsioni abbastanza buone.

Per quanto concerne il Caso 2 le portate d'acqua totali interessate sono molto basse rispetto a quelle trattate nel caso precedente, in questo modo si sono potute mettere maggiormente in evidenza i fenomeni di instabilità fluidodinamica della portata nei rami di alimento delle sezioni di prova; per tale ragione per questa tipologia di prove non si è potuto fare un'analisi precisa e accurata dei parametri d'interesse come nei casi precedentemente trattati.

Il grado di vuoto medio misurato è elevato per entrambe le portate d'acqua totale utilizzate per questa serie di prove ed è compreso tra 0,70 e 0,84.

Il calcolo del titolo in massa  $x$ , del titolo volumetrico  $\beta$  e della velocità media della miscela  $j$  è stato eseguito considerando una portata d'acqua media nei rami, non tenendo conto delle elevate instabilità fluidodinamiche ad essa associate; pertanto i valori trovati sono stati considerati come indicativi di una 'zona d'interesse' e non rappresentativi di valori reali.

Il grado di vuoto è nettamente minore del titolo volumetrico e si ha quindi che lo *slip ratio*  $S$  è maggiore di uno per tutti i punti testati, ciò implica che anche per questa serie di misure la fase gassosa percorre l'elica a velocità più elevata della fase liquida.

Anche per il Caso 2 si è valutato il paramento di Martinelli nelle condizioni sperimentali e si sono confrontati i valori del moltiplicatore bifase per attrito previsti



---

con il modello di Lockhart-Martinelli utilizzando i valori del coefficiente  $C$  usati in precedenza; fa eccezione l'elica di diametro pari a 1 m, per la quale il valore dei moltiplicatori bifase per attrito non possono essere stimati con l'utilizzo del modello utilizzato per nessun coefficiente  $C$  preso in esame; per le altre due sezioni di prova l'attendibilità delle previsioni è subordinata alla portata d'acqua presa in esame.

Anche il confronto tra il grado di vuoto sperimentale con il grado di vuoto teorico calcolato con la formulazione di Lockhart è solo indicativo essendo il grado di vuoto fortemente dipendente dall'instabilità fluidodinamica della portata nel canale considerato. Per quasi tutte le condizioni di prova il grado di vuoto sperimentale risulta essere maggiore del grado di vuoto teorico calcolato con il modello di Lockhart per tutte e tre le eliche.

In questo caso le previsioni dei *flow pattern* fatte utilizzando le mappe prese in esame in questa ricerca risultano essere tutte attendibili.

Parte delle campagne sperimentali effettuate in questa ricerca sono state improntate all'analisi delle instabilità fluidodinamiche nei canali in parallelo, in particolare le prove effettuate utilizzando il circuito B, prove I e prove II (caso A e caso B).

In questa sede vengono prima analizzate le instabilità della portata nei rami.

Per le prove di tipo I al diminuire della portata totale d'acqua e al crescere della portata d'aria le oscillazioni della portata nei rami risultano più ampie e presentano una frequenza maggiore. A questa affermazione fa eccezione il caso che riguarda la portata d'acqua totale W3, la più elevata presa in esame; in questo caso si ottengono forti oscillazioni nel caso in cui si pongano in regime bifase le eliche con diametro 0,64 m e 1 m, mentre non accade se il regime bifase è imposto alla sezione di prova con diametro più elevato. Questo comportamento anomalo può essere imputato ad una difficoltà di mantenere stabile il deflusso di acqua totale quando si inietta, all'interno delle eliche, una portata d'aria nei rami per i quali, come si è già visto, si ha una portata d'acqua maggiore. Essendo infatti la W3 la massima portata d'acqua totale che è possibile immettere nel collettore di alimentazione senza chiudere completamente la valvola di bypass, che regola il deflusso di acqua dopo la pompa di alimento, le oscillazioni rilevate in questa campagna sperimentale potrebbero essere imputate ad una instabilità del deflusso della portata totale; questa affermazione è supportata dal fatto che ogni picco (sia verso l'alto che verso il basso) è 'simmetrico' per tutte e tre le portate nei rami.

Per le prove di tipo II Caso 1, nonostante le instabilità delle portate nei rami è possibile utilizzare una portata d'acqua media nei canali, come è stato fatto nelle analisi delle prove effettuate in questa campagna sperimentale.

Si è rilevato come al diminuire della portata totale d'acqua e al crescere della portata d'aria le oscillazioni siano più ampie e hanno frequenza maggiore.

Per le prove II caso 2 non può essere utilizzata una portata d'acqua nei canali media: le oscillazioni sono tanto ampie che in molti punti il valore della portata d'acqua è nullo. Al diminuire della portata totale d'acqua e al crescere della portata d'aria le oscillazioni sono più ampie e hanno frequenza maggiore.

Si sono analizzate quindi le instabilità delle cadute di pressione misurate tra ingresso ed uscita delle tre sezioni di prova.

Per le prove di tipo I al crescere della portata d'aria per ogni sezione di prova si hanno oscillazioni delle cadute di pressione misurate più ampie. Maggiore è la portata d'aria più queste oscillazioni si smorzano. Fa eccezione la portata totale W3 nel caso delle eliche di diametro 1 m e 0,64 m, che ha un comportamento anomalo, come già analizzato nei paragrafi precedenti.

Per le prove di tipo II Caso 1, al crescere della portata d'acqua totale, le oscillazioni risultano meno ampie e aumentano al crescere della portata d'aria iniettata nelle sezioni di prova. Le oscillazioni più ampie sono state riscontrate nelle eliche di diametro 1,39 m e 0,64 m; questa peculiarità è da attribuirsi alla minore portata d'acqua che si ha nei rami di alimento di questa due sezioni di prova rispetto all'elica di diametro di 1 m. Sebbene le instabilità delle cadute di pressione tra ingresso ed uscita delle sezioni di prova siano in alcuni casi elevate, è stato possibile utilizzare una caduta di pressione media per l'analisi dei risultati.

Per le prove di tipo II Caso 2 appare evidente che le cadute di pressione siano quasi costanti per ogni portata d'aria imposta nelle sezioni di prova, al contrario di quanto evidenziato nei casi precedentemente illustrati. Si può ipotizzare che per portate d'aria elevate e portate d'acqua molto basse le cadute di pressione tra ingresso ed uscita delle eliche nel caso di canali in parallelo abbiano oscillazioni trascurabili, al contrario di quanto rilevato per le portate d'aria nei canali, le quali risultano avere instabilità estremamente marcate.

Oltre alle cadute di pressione anche il grado di vuoto misurato risulta essere instabile, ma le sue oscillazioni sono nella maggior parte dei casi così piccole che, a causa

dell'errore di misura da cui è affetta questa grandezza, non sono rilevabili. Solo per le prove di tipo II caso B si è dovuto utilizzare un grado di vuoto medio su una serie di misure per poter procedere all'analisi dei dati.

Questo studio sperimentale ha fornito risultati utili ed importanti per meglio comprendere la fluidodinamica dei tubi elicoidali per applicazioni di tipo nucleare.

Ulteriori sviluppi di questa attività di ricerca dovranno essere rivolti al miglioramento del circuito B in modo da ottimizzarne le funzionalità. Inoltre dovranno essere investigati i parametri qui analizzati e le instabilità fluidodinamiche per portate di acqua e di aria diverse.

## Appendice A Correlazioni per il calcolo del fattore d'attrito monofase in tubi curvi.

| Autore         | Correlazione   |
|----------------|--|
| Dean (1928)    | $\frac{f_c}{f_s} = 1.03058 \cdot \left(\frac{De^2}{288}\right)^2 + 0.01195 \cdot \left(\frac{De^2}{288}\right)^4$  |
| White (1929)   | $\frac{f_c}{f_s} = 1 - \left[1 - \left(\frac{11.6}{De}\right)^{0.45}\right]^{\frac{1}{0.45}}$ <p>(=1 per <math>De &lt; 11.6</math>)</p>                                    |
| White (1932)   | $f_c = 0.08 \cdot Re^{-0.25} + 0.012 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$   |
| Adler (1934)   | $\frac{f_c}{f_s} = 0.1064 \cdot \sqrt{De}$   |
| Prandtl (1949) | $\frac{f_c}{f_s} = 0.37 \cdot \left(\frac{De}{2}\right)^{0.36}$  |
| Hasson (1955)  | $\frac{f_c}{f_s} = 0.556 + 0.0969 \cdot \sqrt{De}$   |
| Ito (1959)     | $\frac{f_c}{f_s} = 21.5 \cdot \frac{De}{[1.56 + \log_{10} De]^{5.73}}$   |
| Ito (1959)     | $f_c \cdot \sqrt{\frac{D}{d}} = 0.0791 \cdot \left[Re \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^{-0.2}$  |
| Ito (1959)     | $4 \cdot f_c \cdot \sqrt{\frac{D}{d}} = 0.029 + 0.304 \cdot \left[Re \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^{-0.25}$  |
| Ito (1959)     | $f_c \cdot \sqrt{\frac{D}{d}} = 0.0081 + 0.4 \cdot \left(Y^2 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}\right)^{-1.27}$ <p>dove <math>Y^3 \cdot e^Y = Re \cdot \sqrt{\frac{D}{d}}</math></p> |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Ito (1959)                  | $f_c = \frac{0.2965}{Y^2}$  |
| Kubain-Varrier<br>(1961/62) | $f_c = 0.7716 \cdot \exp\left(\frac{3.553 \cdot d}{D}\right) \cdot \text{Re}^{-0.5}$<br>$f_c = 0.003538 \cdot \text{Re}^{0.09} \cdot \exp\left(\frac{1.887 \cdot d}{D}\right)$  |
| Barua (1963)                | $\frac{f_c}{f_s} = 0.509 + 0.0918 \cdot \sqrt{De}$  |
| Mori-Nakayama<br>(1965)     | $\frac{f_c}{f_s} = 0.1080 \cdot \frac{\sqrt{De}}{\left[1 - \frac{3.253}{\sqrt{De}}\right]}$   |
| Mori-Nakayama<br>(1967)     | $f_c \cdot \sqrt{\frac{D}{d}} = 0.075 \cdot \text{Re} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 0.2 \cdot \left\{1 + 0.112 \cdot \text{Re} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2\right\}^{-0.2}$  |
| Schmidt (1967)              | $\frac{f_c}{f_s} = 1 + 0.14 \cdot \text{Re}^x$ dove $x = \frac{\left(1 - \frac{0.0644}{\left(\frac{D}{d}\right)^{0.312}}\right)}{\left(\frac{D}{d}\right)^{0.97}}$  |
| Srinivasan e al.<br>(1968)  | $f_c = \frac{32}{\text{Re}}$<br>$f_c = 5.22 \cdot \left(\text{Re} \cdot \sqrt{\frac{D}{d}}\right)^{-0.6}$<br>$f_c = 1.8 \cdot \left(\text{Re} \cdot \sqrt{\frac{D}{d}}\right)^{-0.5}$<br>$f_c = 1.084 \cdot \left(\text{Re} \cdot \sqrt{\frac{D}{d}}\right)^{-0.2}$ |
| Ito (1969)                  | $\frac{f_c}{f_s} = 0.1033 \cdot \sqrt{De} \cdot \left[\left(1 + \frac{1.729}{De}\right)^{0.5} - \left(\frac{1.729}{De}\right)^{0.5}\right]^{-3}$  |
| Tarbell-Samuels<br>(1973)   | $\frac{f_c}{f_s} = 1 + \left[0.0008279 + 0.007964 \cdot \frac{d}{D}\right] \cdot \text{Re} - 2.096 \cdot 10^{-7} \text{Re}^2$   |

|  |   |
|--|---|
| <p>Ramana-Rao-<br/>Sadasivudu (1974)</p> | $f_c = 1.55 \cdot \exp\left(\frac{14.12 \cdot d}{D}\right) \cdot \text{Re}^{-1}$ $f_c = 1.55 \cdot \exp\left(\frac{14.12 \cdot d}{D}\right) \cdot \text{Re}^{-0.64}$ $f_c = 0.0382 \cdot \exp\left(\frac{11.17 \cdot d}{D}\right) \cdot \text{Re}^{-0.2}$ $f_c = 0.01065 \cdot \left(\frac{d^{0.94}}{D^{0.1}}\right) \cdot \text{Re}^{-0.2}$  |
| <p>Collins-Dennis<br/>(1975)</p>         | $\frac{f_c}{f_s} = 0.38 + 0.1028 \cdot \sqrt{De}$   |
| <p>Van Dyke (1978)</p>                   | $\frac{f_c}{f_s} = 0.47136 \cdot De^{0.25}$   |
| <p>Mishra-Gupta<br/>(1979)</p>           | $\frac{f_c}{f_s} = 1 + 0.033 \cdot (\log_{10} He)^4$ $f_c = 0.0791 \cdot \text{Re}^{-0.25} + 0.0075 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$ <p>dove <math>He = \text{Re} \cdot \left[ \frac{\frac{d}{D}}{1 + \left(\frac{p}{\pi \cdot D}\right)^2} \right]^{0.5}</math></p>   |
| <p>Dennis (1980)</p>                     | $\frac{f_c}{f_s} = 0.388 + 0.1015 \cdot \sqrt{De}$  |
| <p>Manlapaz-<br/>Churchill (1980)</p>    | $\frac{f_c}{f_s} = \left[ \left( 1 - \frac{0.18}{\left\{ 1 + \left( \frac{35}{He} \right)^2 \right\}^{0.5}} \right)^m + \left( 1 + \frac{d}{\{3 \cdot D\}} \right)^2 \cdot \left( \frac{He}{88.33} \right) \right]^{0.5}$ <p>dove</p> <p><math>m = 2</math> per <math>De &lt; 20</math></p> <p><math>m = 1</math> per <math>20 &lt; De &lt; 40</math></p> <p><math>m = 0</math> per <math>De &gt; 40</math></p> |

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <p>Yanase e al. (1989)</p>     | $\frac{f_c}{f_s} = 0.557 + 0.0938 \cdot \sqrt{De}$   |
| <p>Liu-Masliyah<br/>(1993)</p> | $f_c Re = [16 + (0.378 \cdot De \cdot \lambda^{0.25} + 12.1) \cdot De^{0.5} \cdot \lambda^{0.5} \cdot \gamma^2] \cdot \left[ 1 + \frac{\{(0.0908 + 0.0233 \cdot \lambda^{0.5}) \cdot De^{0.5} - 0.132 \cdot \lambda^{0.5} + 0.37 \cdot \lambda - 0.2\}}{\left(1 + \frac{49}{De}\right)} \right]$ <p>dove</p> $\lambda = \frac{\frac{D}{2}}{\left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{2 \cdot \pi}\right)^2\right]}$ $\gamma = \frac{\eta}{(\lambda \cdot De)^{0.5}}$ $\eta = \frac{\frac{p}{2 \cdot \pi}}{\left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{2 \cdot \pi}\right)^2\right]}$ |

In cui  $f_s = 64/Re$ .

Limiti di validità correlazioni.

| <b>Autore</b>                 | <b>Limiti di validità</b>   |
|-------------------------------|---|
| Dean                          | Toro, laminare, analitica, $d/D$ piccolo, $De < 20$                               |
| White (1929)                  | Tubo circolare, laminare empirica, $d/D = 15,15-50-2050$ ,<br>$11,6 < De < 2000$  |
| White (1932)                  | Elicoidale, turbolento, empirica $15000 < Re < 100000$                            |
| Adler                         | Laminare, sperimentale e teorica, $De$ grandi                                     |
| Prandtl                       | Empirica, laminare, $40 < De < 2000$  |
| Hasson                        | Elicoidale, empirica, laminare  |
| Ito (1959)                    | Empirica, laminare, $13,5 < De < 2000$  |
| Ito (1959)                    | Tubo circolare, empirica, turbolento, $Re(d/D)^2 > 6$                             |
| Ito (1959)                    | Teorica, turbolento, $0,034 < Re(d/D)^2 < 300$                                    |
| Ito (1959)                    | Teorica, turbolento, $Y^2 \cdot \sqrt{(d/D)} < 12$                                |
| Ito (1959)                    | Teorica, turbolento, $Y^2 \cdot \sqrt{(d/D)} < 5,3$                               |
| Kubain-Varrier (1)            | Elicoidale, empirico, non isoterma, $0,037 < d/D < 0,097$ ,<br>$2000 < Re < 9000$ |
| Kubain-Varrier (2)            | Elicoidale, empirica, turbolento, $10 < D/d < 27$ , $900 < Re < 25000$            |
| Barua                         | Toro, teorica, laminare, $De$ grandi  |
| Mori-Nakayama<br>(1965)       | Tubo circolare, teorica verifica sperimentale, laminare,<br>$13,5 < De < 2000$    |
| Mori-Nakayama<br>(1967)       | Tubo circolare, teorica-sperimentale, turbolento                                  |
| Schmidt                       | Empirica  |
| Srinivasan e al. (1)          | Elicoidale empirica, $0,0097 < d/D < 0,135$ , $Re \cdot \sqrt{d/D} < 30$          |
| Srinivasan e al. (2)          | Elicoidale empirica, $30 < Re \cdot \sqrt{d/D} < 300$                             |
| Srinivasan e al. (3)          | Elicoidale empirica, $300 < Re \cdot \sqrt{d/D} < Re_{critico} \cdot \sqrt{d/D}$  |
| Srinivasan e al. (4)          | Elicoidale empirica, $Re > Re_{critico} \cdot \sqrt{d/D}$                         |
| Ito (1969)                    | Teorica   |
| Tarbell-Samuels               | Toro, numerica, $20 < De < 500$ , $3 < D/d < 30$                                  |
| Ramana-Rao-<br>Sadasivudu (1) | Elicoidale, empirica, $0,0159 < d/D < 0,0556$ , $Re < 1200$                       |



|                           |  |
|---------------------------|--|
| Ramana-Rao-Sadasivudu (2) | Elicoidale, empirica, $0,0159 < d/D < 0,0556$ , $1200 < Re < Re_{critico}$             |
| Ramana-Rao-Sadasivudu (3) | Elicoidale, empirica, $0,0159 < d/D < 0,0556$ , $Re_{critico} < Re < 27000$            |
| Ramana-Rao-Sadasivudu (4) | Elicoidale, empirica, turbolento, $0,0159 < d/D < 0,0556$                              |
| Collins-Dennis            | Toro, numerica, laminare, grandi $De$  |
| Van Dyke                  | Toro, teorica, laminare, $De > 30$   |
| Mishra-Gupta (1)          | Elicoidale, empirica, turbolento, $1 < He < 3000$                                      |
| Mishra-Gupta (2)          | Elica, empirica, turbolento, $4500 < Re < 10^3$ , $6.7 < D/d < 346$ , $0 < p/D < 25,4$ |
| Dennis                    | Toro, numerica, laminare, grandi $De$  |
| Manlapaz-Churchill        | Elicoidale, numerica   |
| Yanase e al.              | Toro, teorica, laminare  |
| Liu-Masliyah              | Elicoidale, numerica, laminare   |

## Appendice B Cadute di pressione nelle tre eliche

### B.1 Circuito A

#### B.1.1 Cadute di pressione misurate elica $D = 0,64\text{ m}$

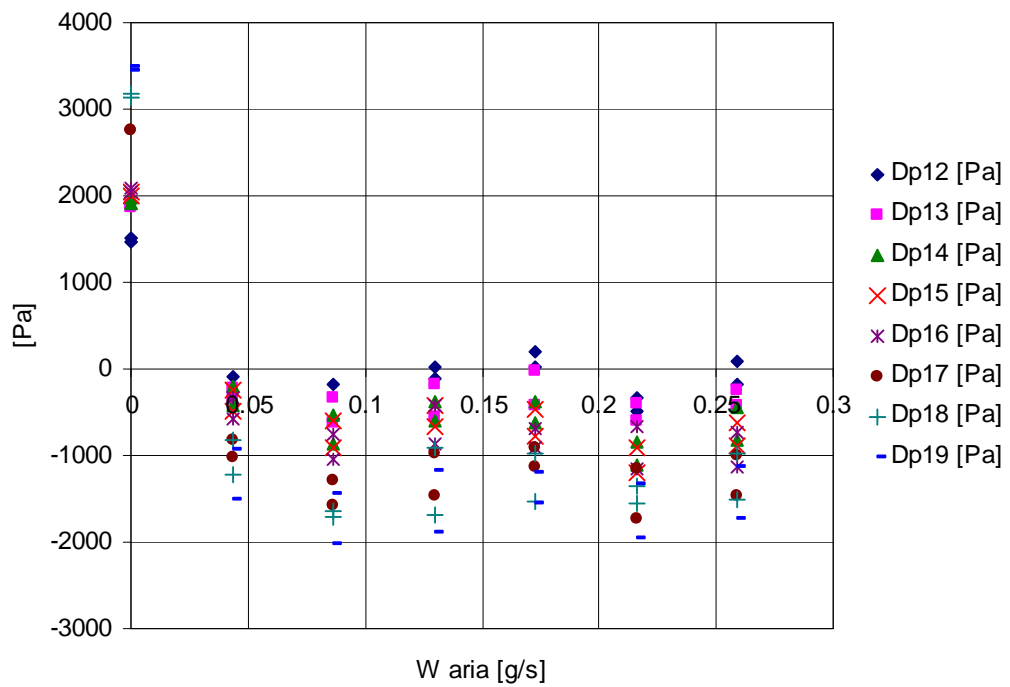


Figura 432: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 0,64\text{ m}$  con  $W\text{ acqua} = 200\text{ l/h}$ .

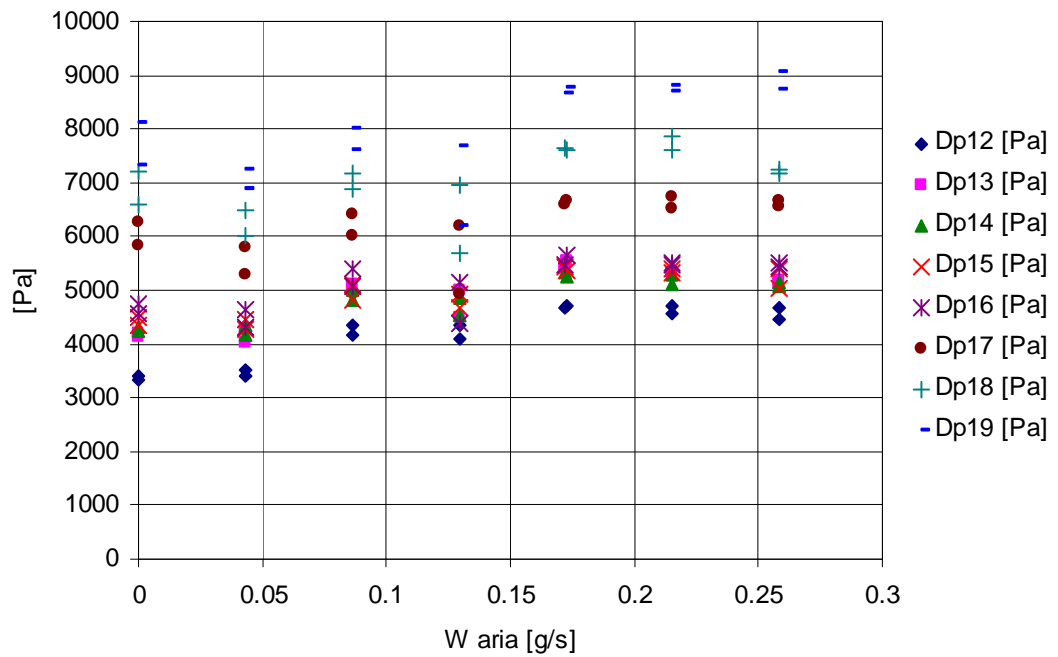


Figura 433: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 0,64$  m con  $W_{\text{acqua}} = 300$  l/h.

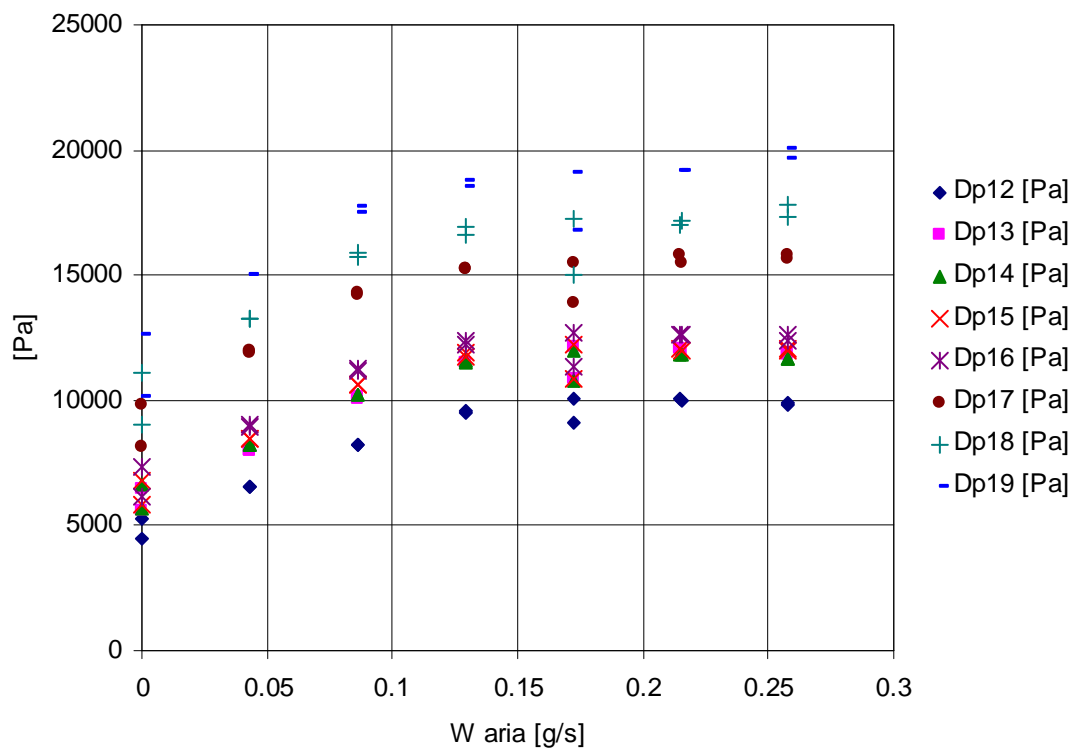


Figura 434: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 0,64$  m con  $W_{\text{acqua}} = 400$  l/h.

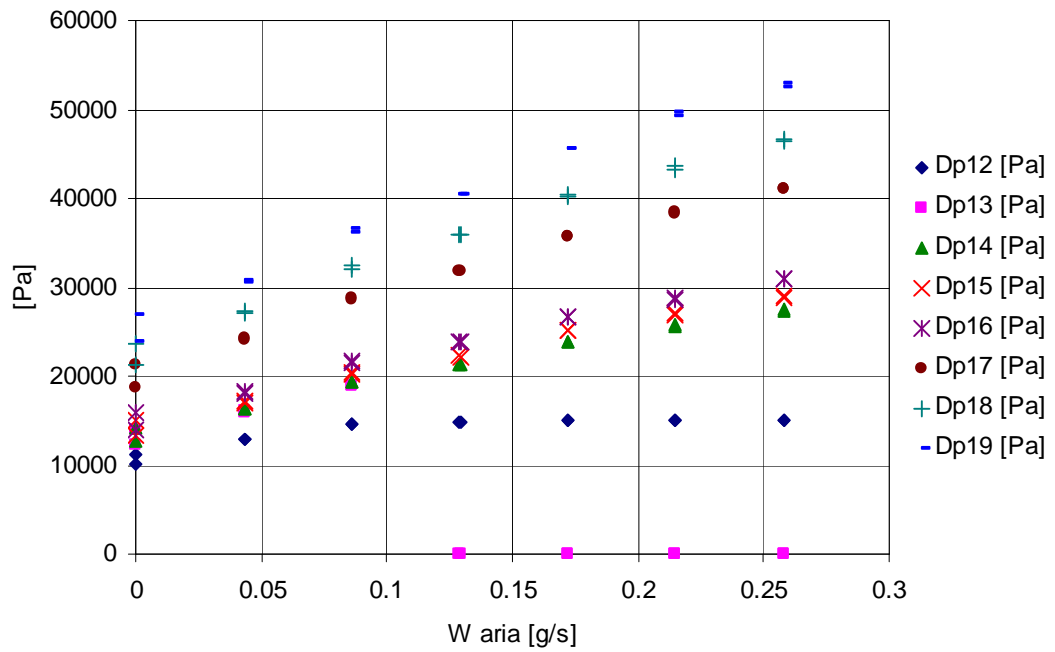


Figura 435: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 0,64$  m con  $W$  acqua = 600 l/h.

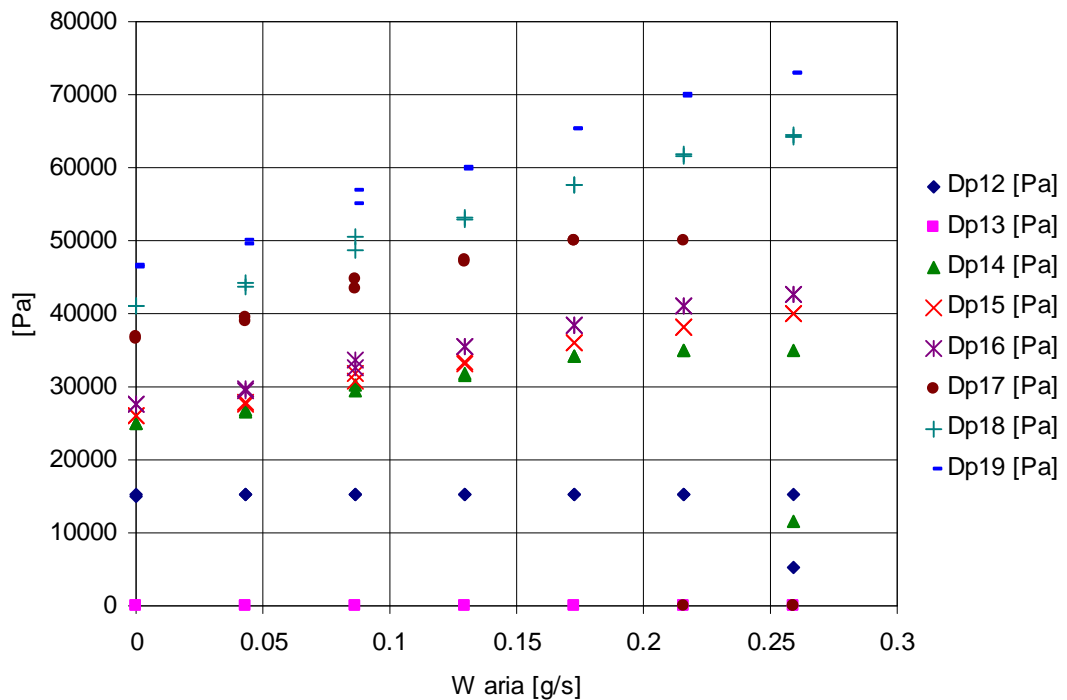
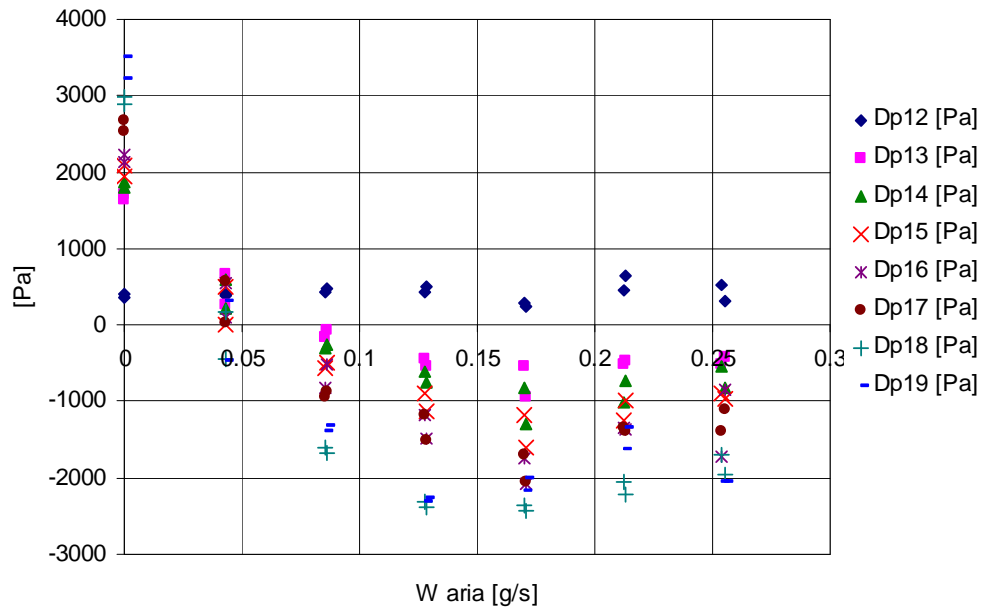
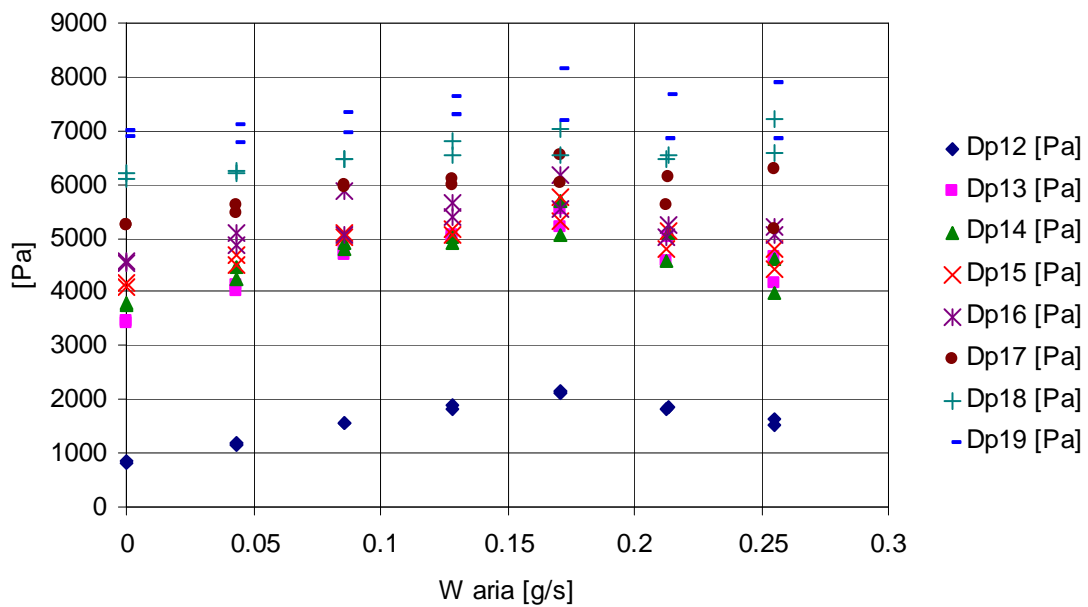


Figura 436: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 0,64$  m con  $W$  acqua = 800 l/h.

**B.1.2 Cadute di pressione misurate elica  $D = 1\text{ m}$**



**Figura 437: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 1\text{ m}$  con  $W\text{ acqua} = 200\text{ l/h}$ .**



**Figura 438: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 1\text{ m}$  con  $W\text{ acqua} = 300\text{ l/h}$ .**

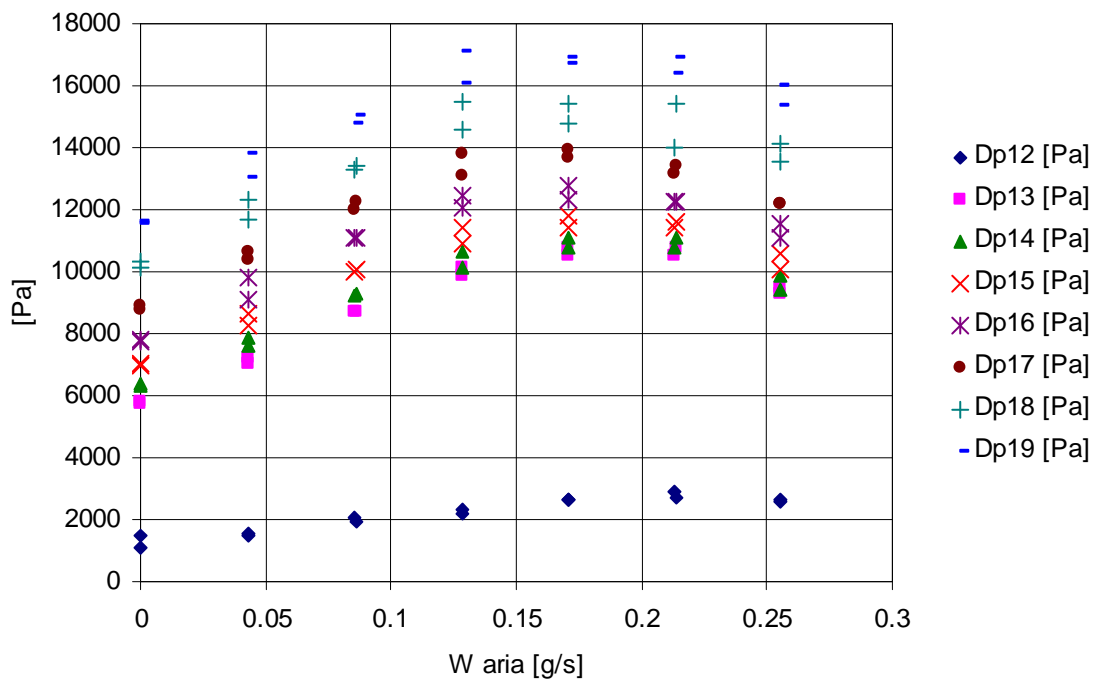


Figura 439: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 1$  m con  $W_{\text{acqua}} = 400$  l/h (1).

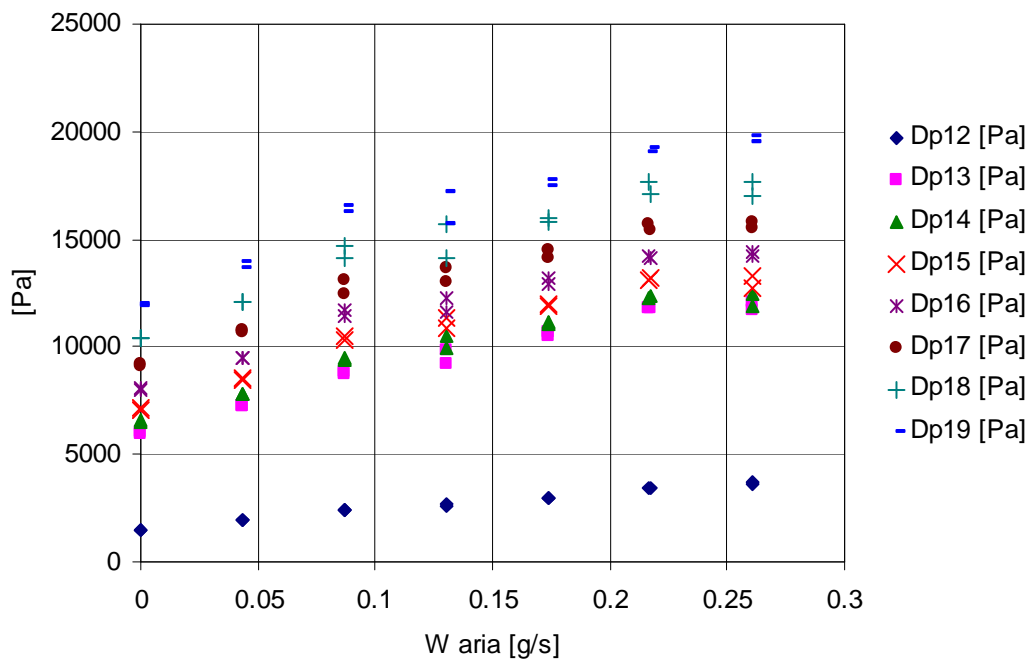


Figura 440: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 1$  m con  $W_{\text{acqua}} = 400$  l/h (2).

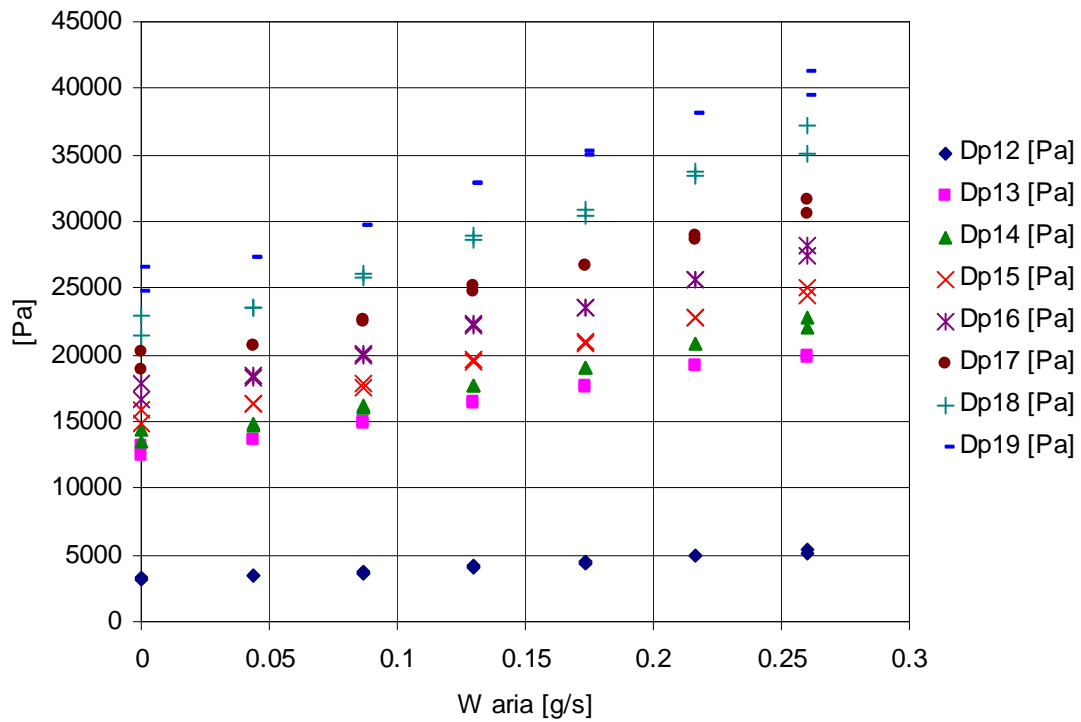


Figura 441: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 1$  m con  $W$  acqua = 600 l/h.

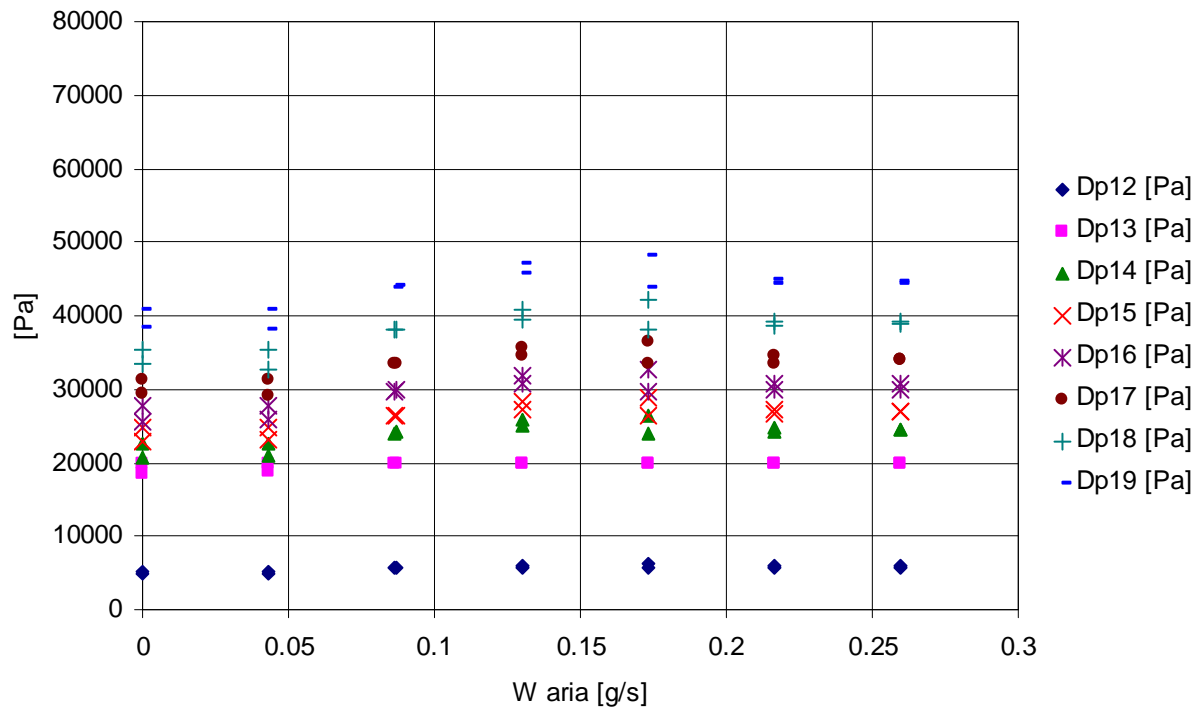
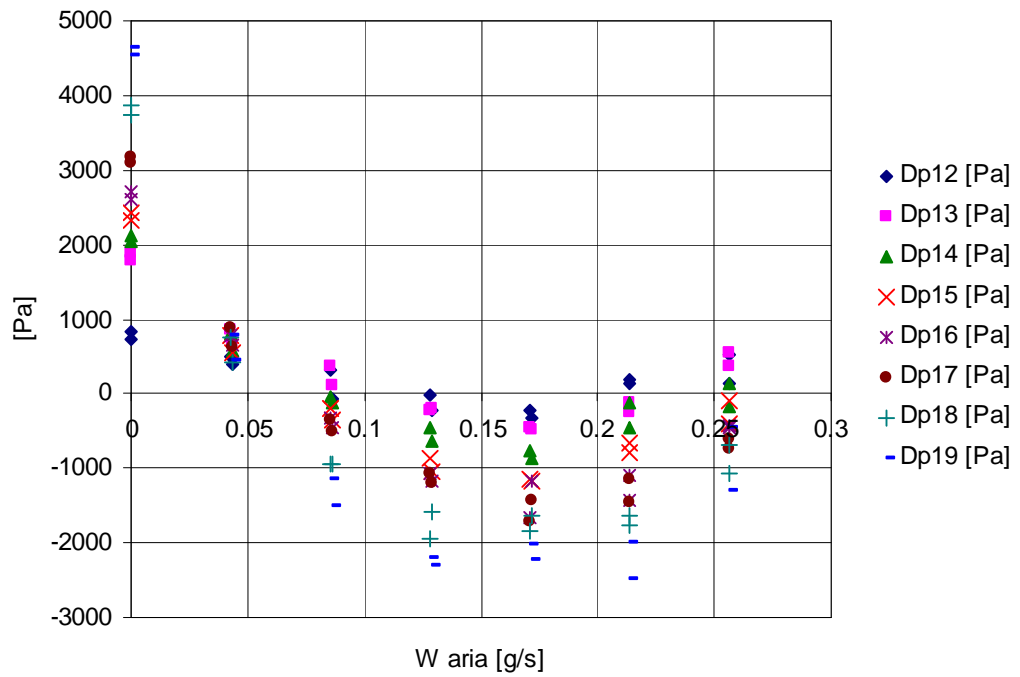
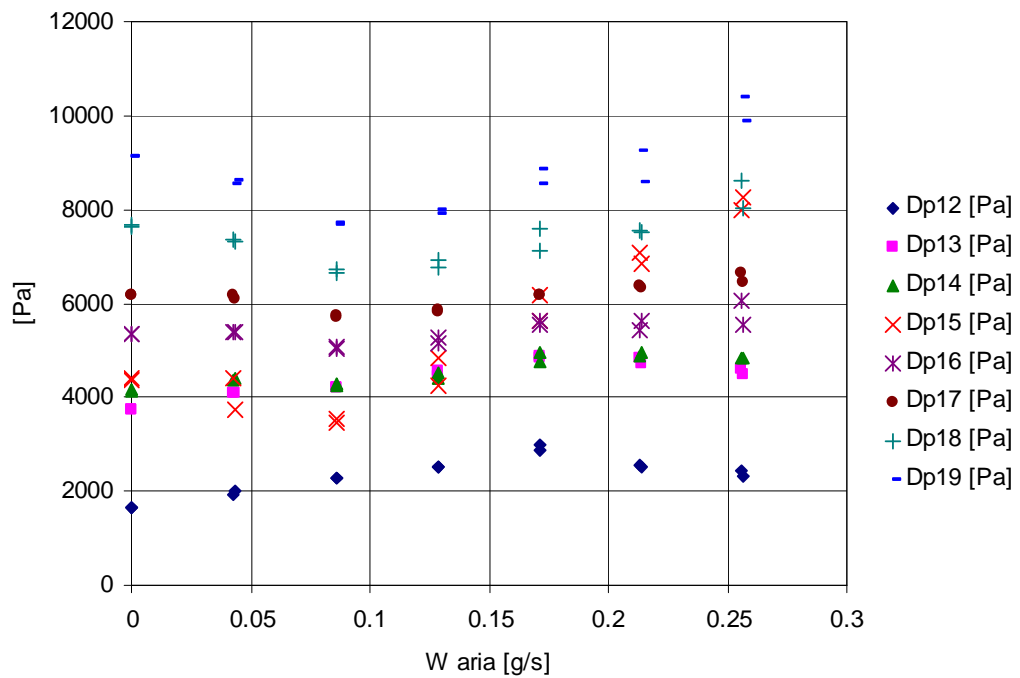


Figura 442: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 1$  m con  $W$  acqua = 800 l/h.

**B.1.3 Cadute di pressione misurate elica  $D = 1,39\text{ m}$**



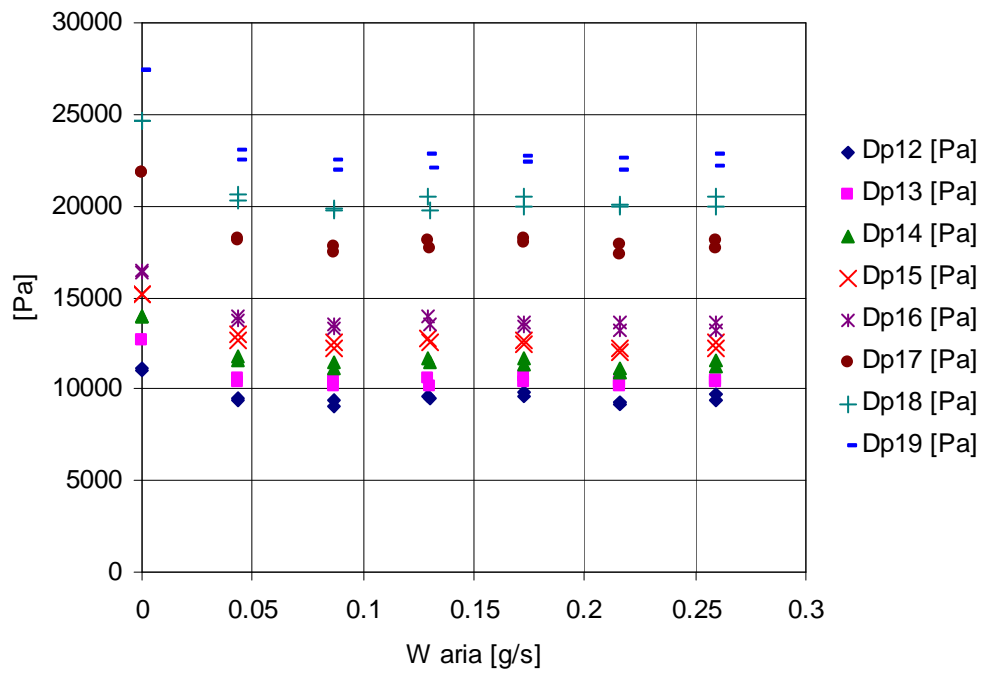
**Figura 443:** Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 1,39\text{ m}$  con  $W\text{ acqua} = 200\text{ l/h}$ .



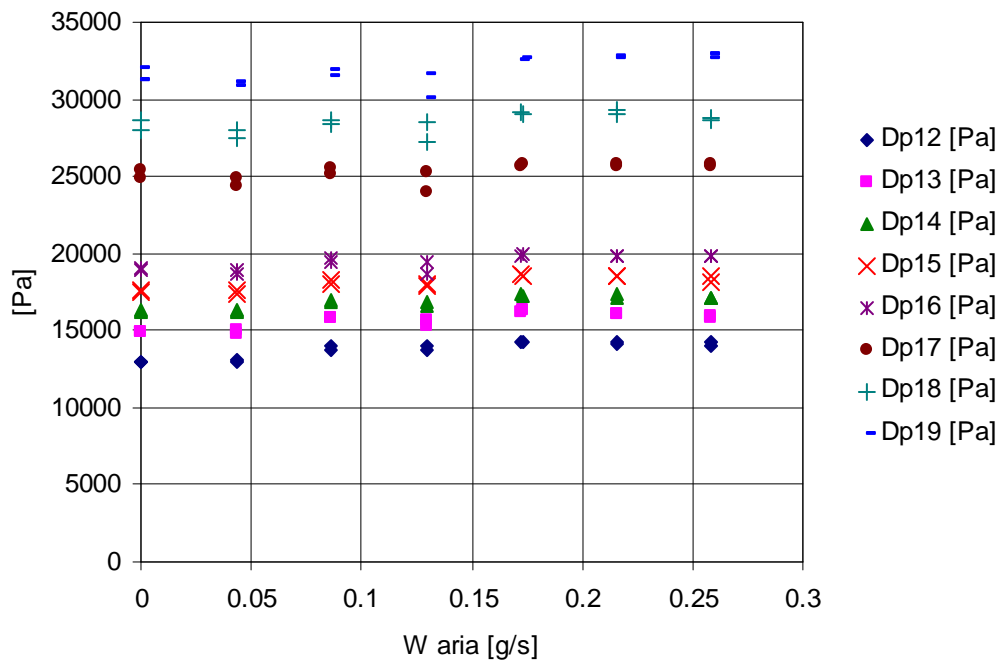
**Figura 444:** Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 1,39\text{ m}$  con  $W\text{ acqua} = 300\text{ l/h}$ .



**B.1.4 Cadute di pressione per attrito elica  $D = 0,64\text{ m}$**



**Figura 445: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 0,64\text{ m}$  con  $W\text{ acqua} = 200\text{ l/h}$ .**



**Figura 446: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 0,64\text{ m}$  con  $W\text{ acqua} = 300\text{ l/h}$ .**

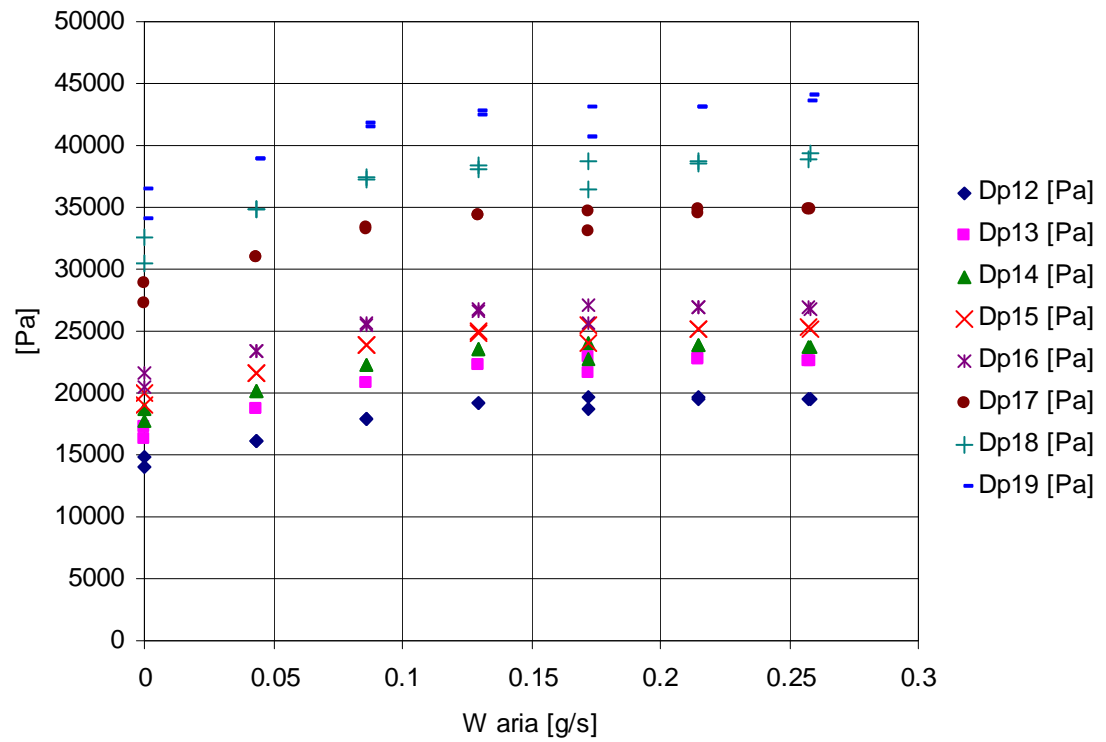


Figura 447: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 0,64$  m con  $W$  acqua = 400 l/h.

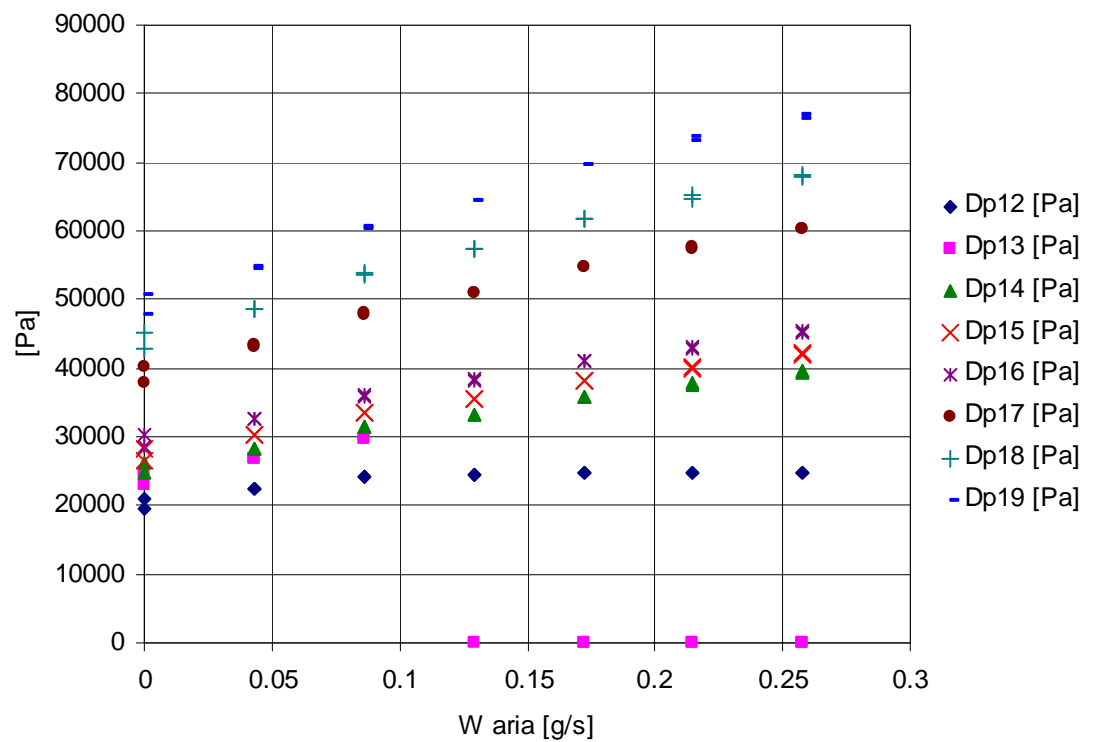


Figura 448: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 0,64$  m con  $W$  acqua = 600 l/h.

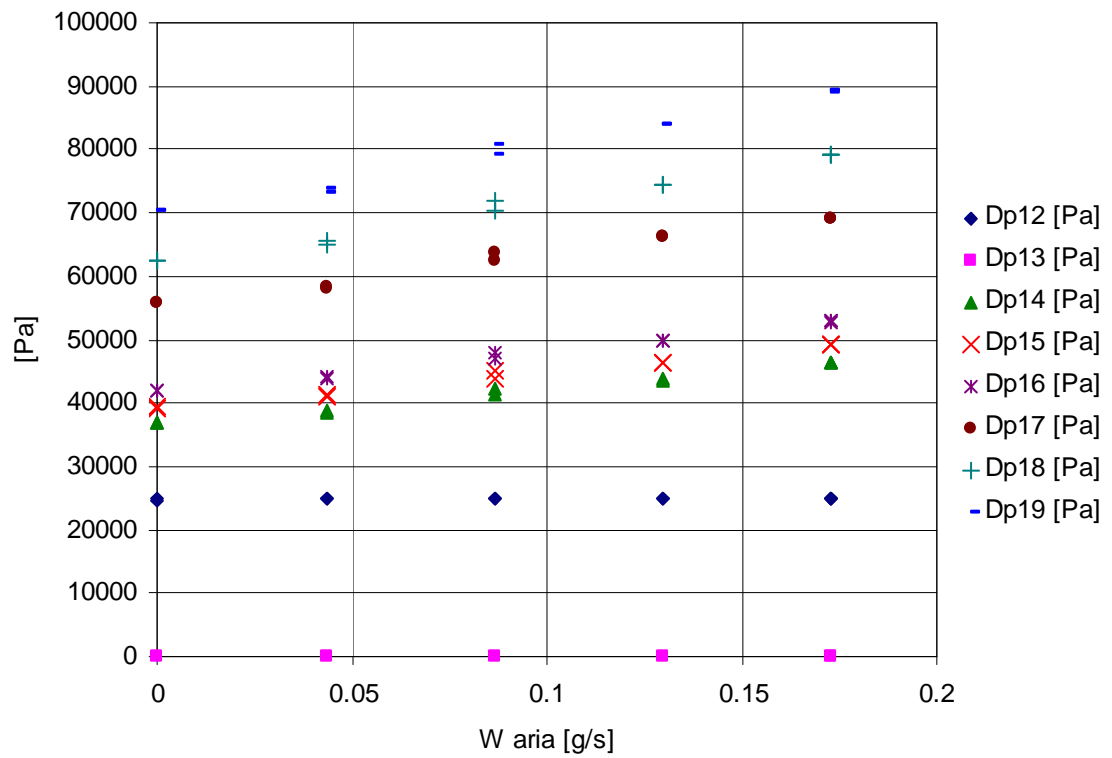
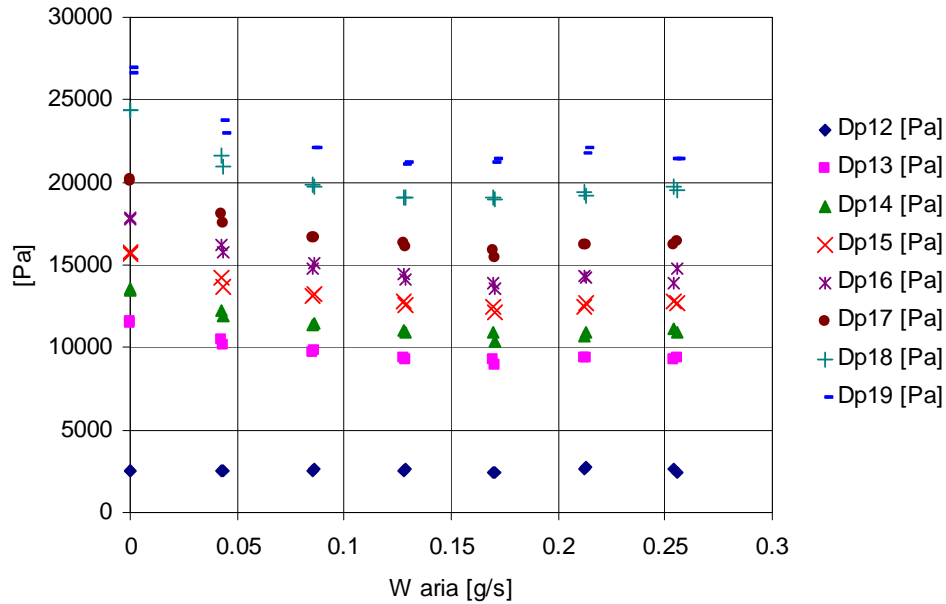
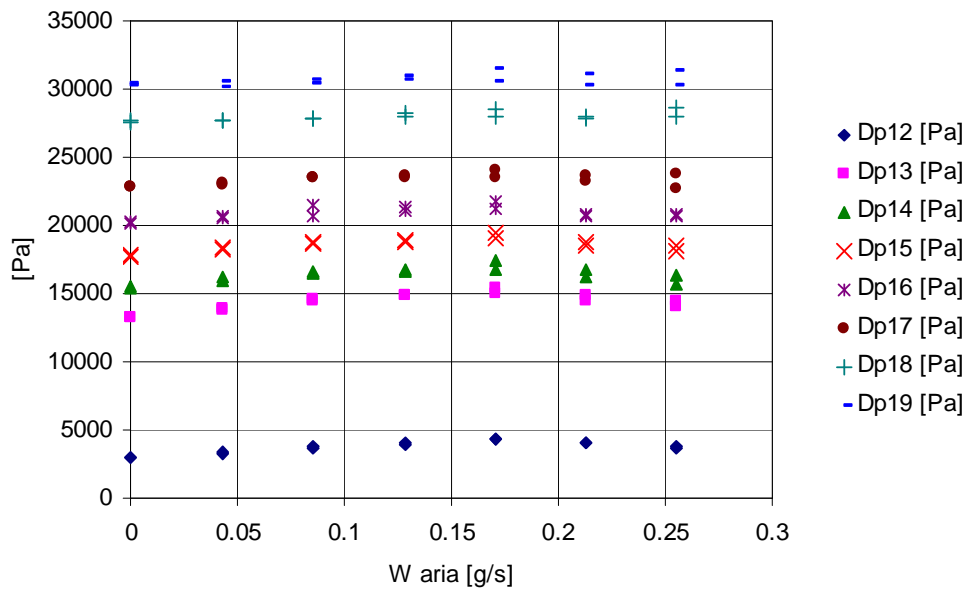


Figura 449: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 0,64$  m con  $W$  acqua = 800 l/h.

**B.1.5 Cadute di pressione per attrito elica  $D = 1$  m**



**Figura 450: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 1$  m con  $W$  acqua = 200 l/h.**



**Figura 451: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 1$  m con  $W$  acqua = 300 l/h.**

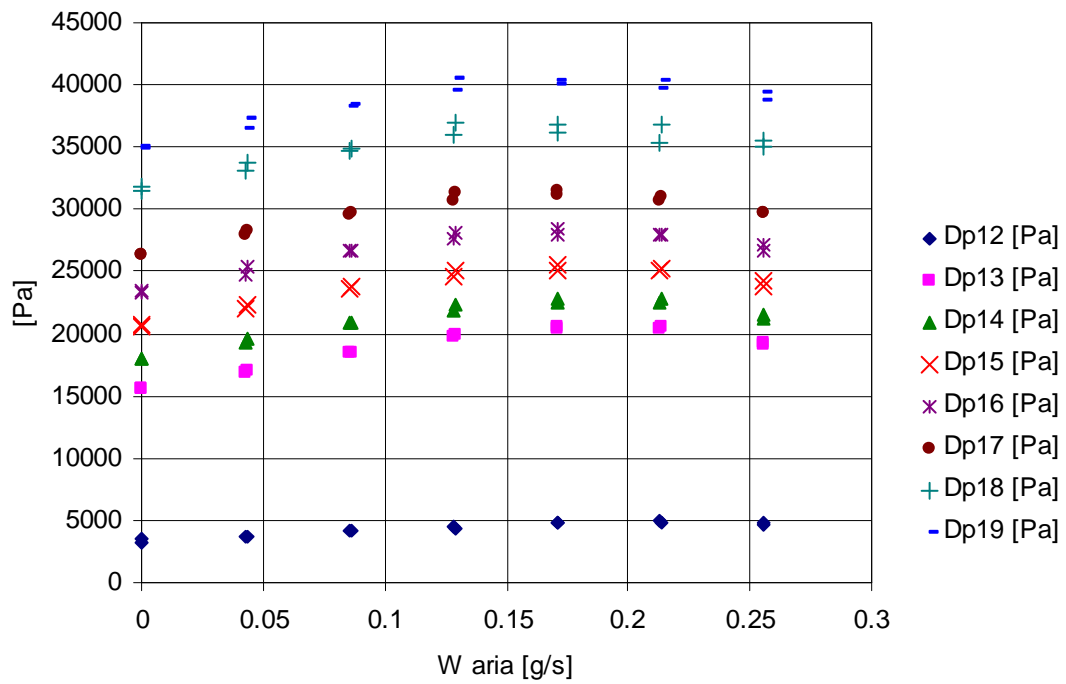


Figura 452: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 1$  m con  $W$  acqua = 400 l/h (1).

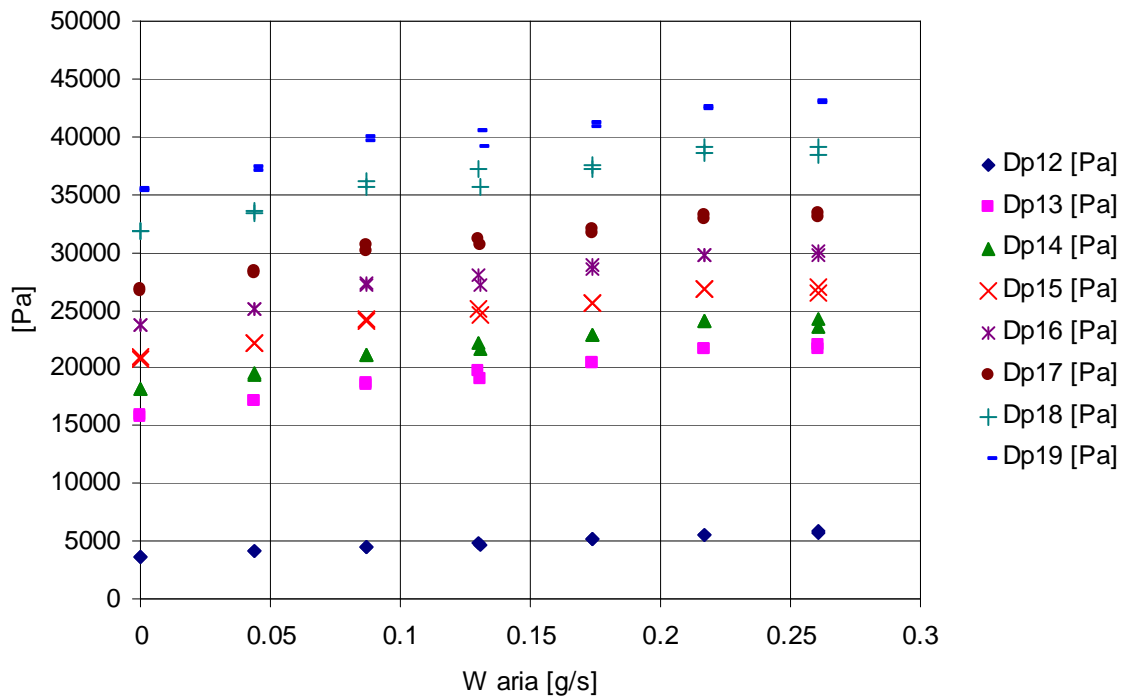


Figura 453: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 1$  m con  $W$  acqua = 400 l/h (2).

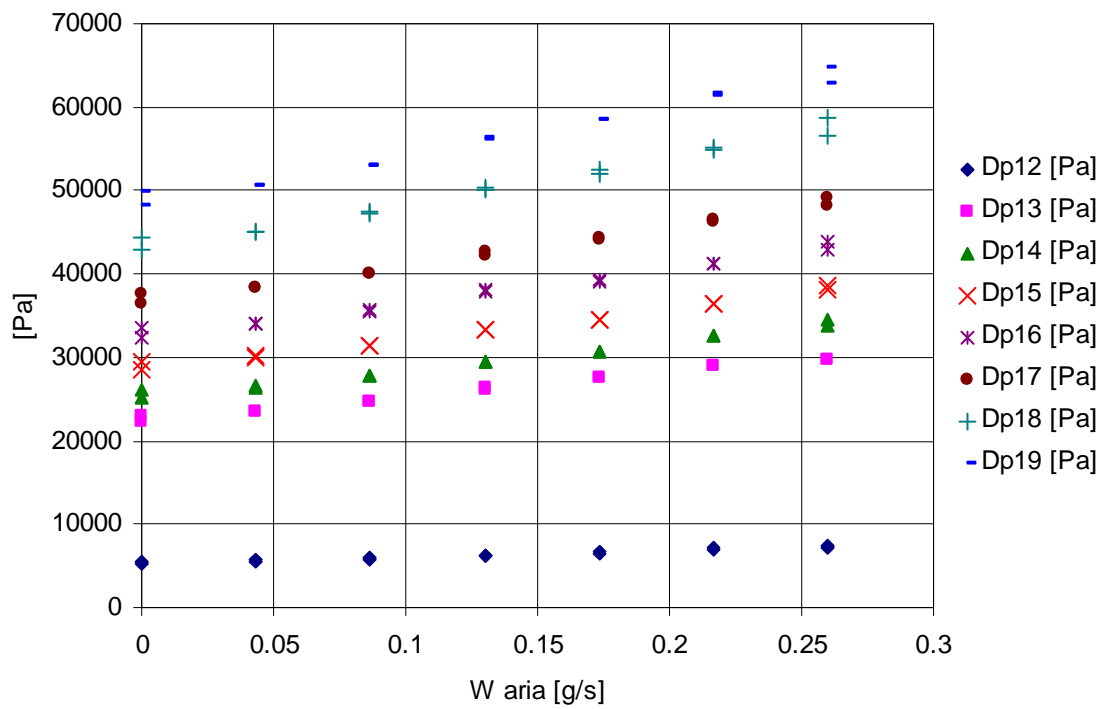


Figura 454: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 1$  m con  $W$  acqua = 600 l/h.

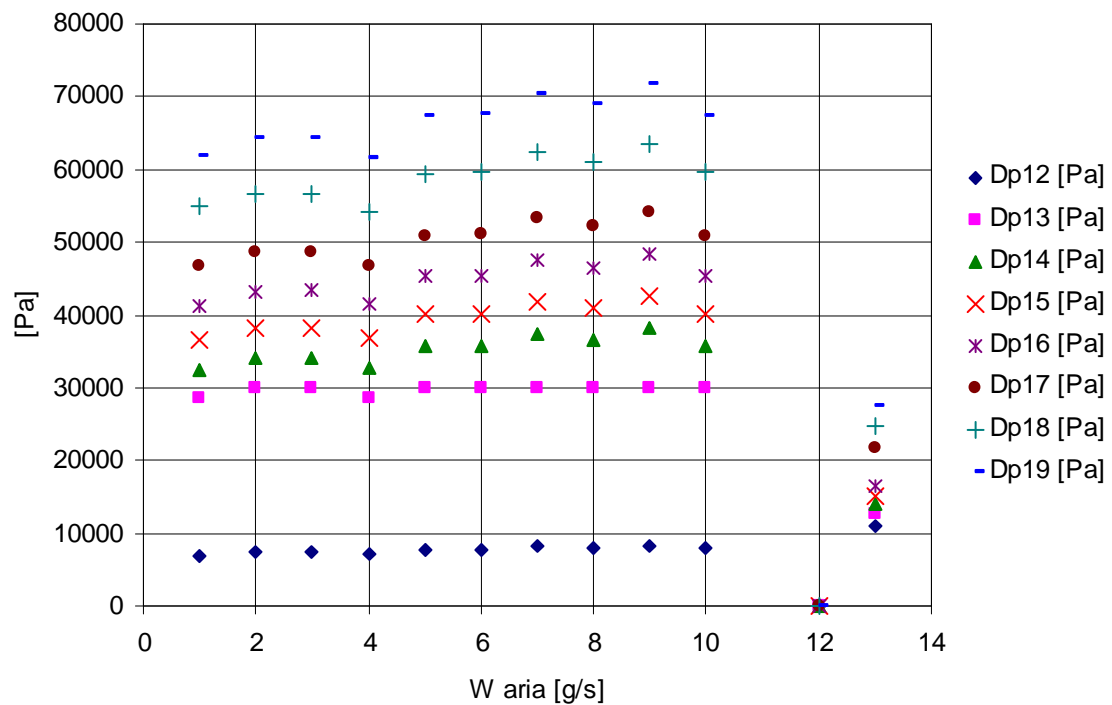
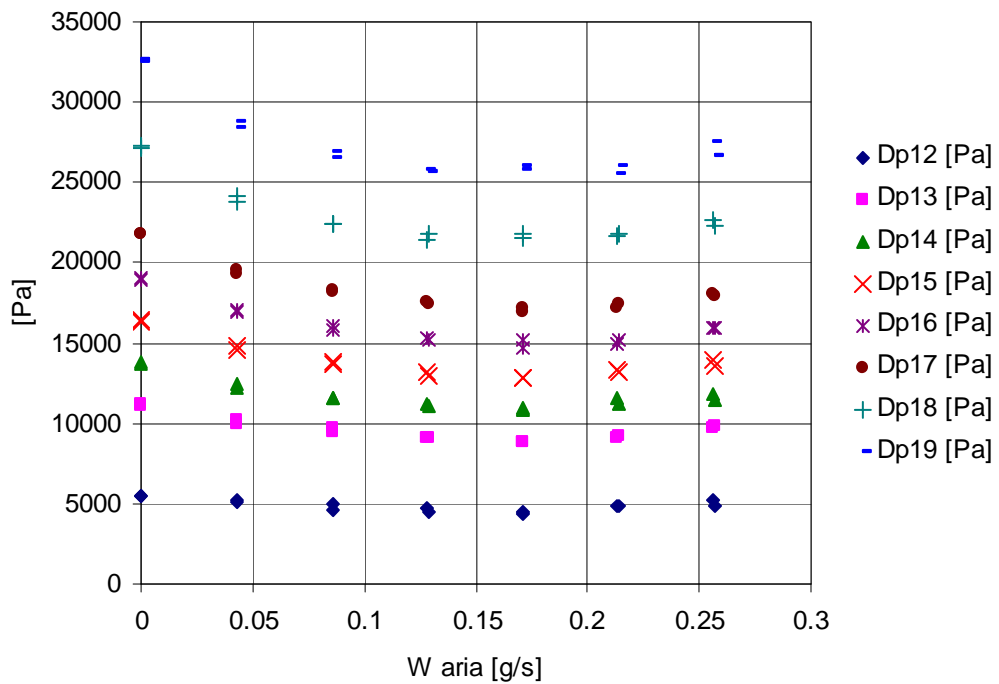
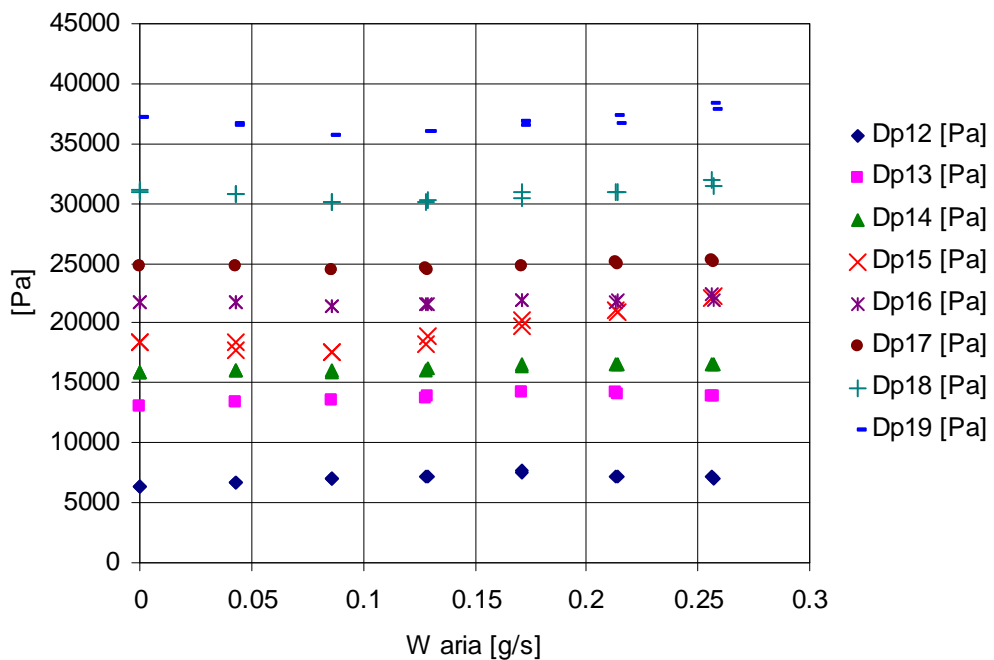


Figura 455: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 1$  m con  $W$  acqua = 800 l/h.

**B.1.6 Cadute di pressione misurate elica  $D = 1,39\text{ m}$**



**Figura 456: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 0,64\text{ m}$  con  $W\text{ acqua} = 200\text{ l/h}$ .**



**Figura 457: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 0,64\text{ m}$  con  $W\text{ acqua} = 300\text{ l/h}$ .**

## B.2 Circuito B prove tipo I

### B.2.1 Cadute di pressione misurate e per attrito elica $D = 0,64\text{ m}$

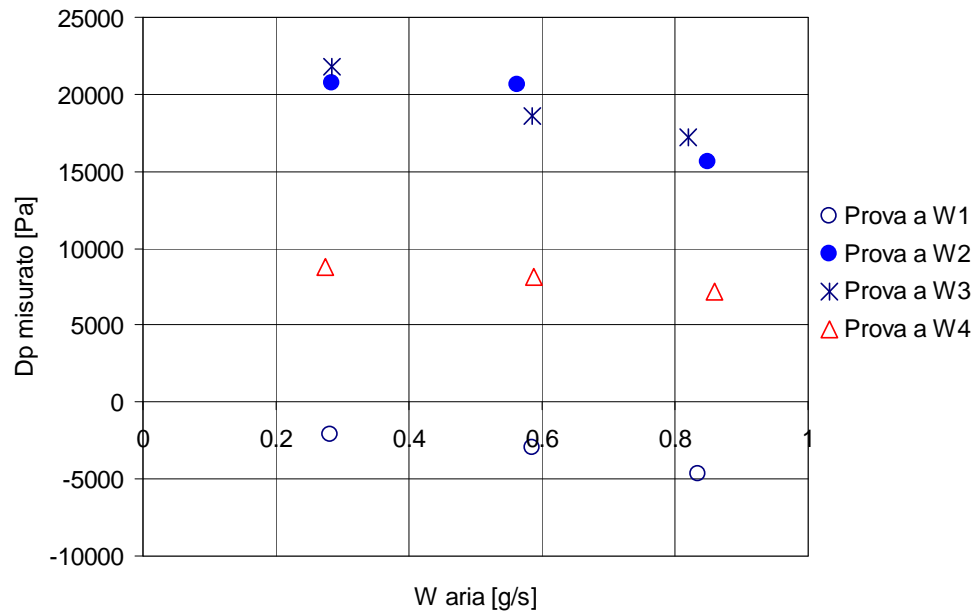


Figura 458: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 0,64\text{ m}$  per le portate testate.

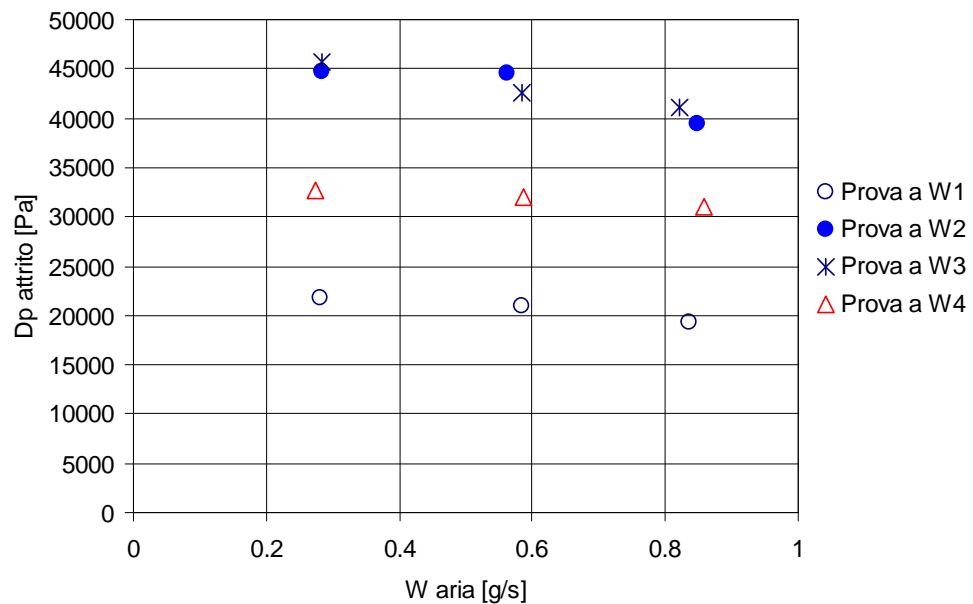
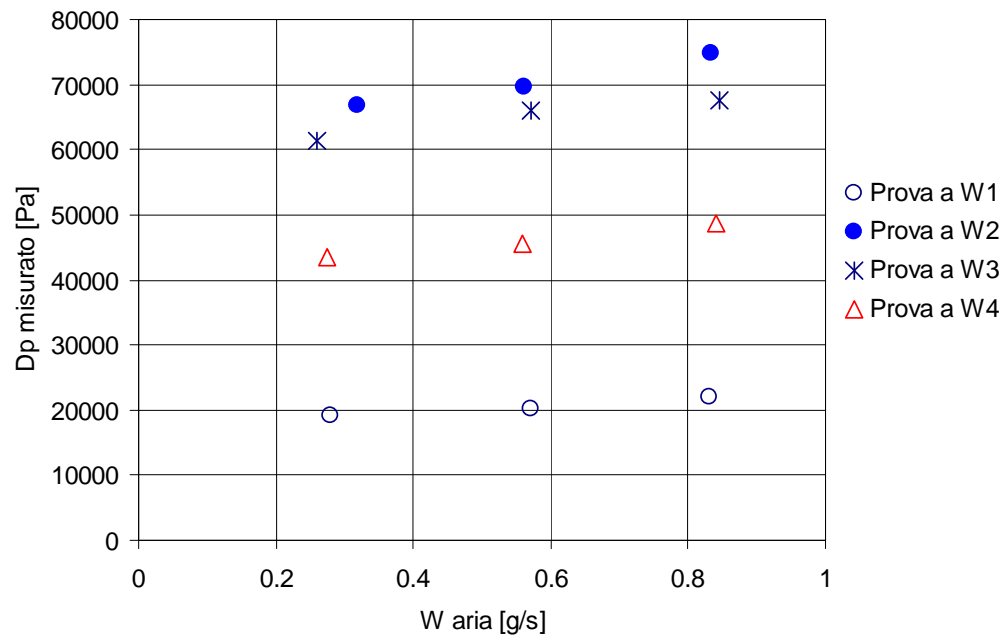


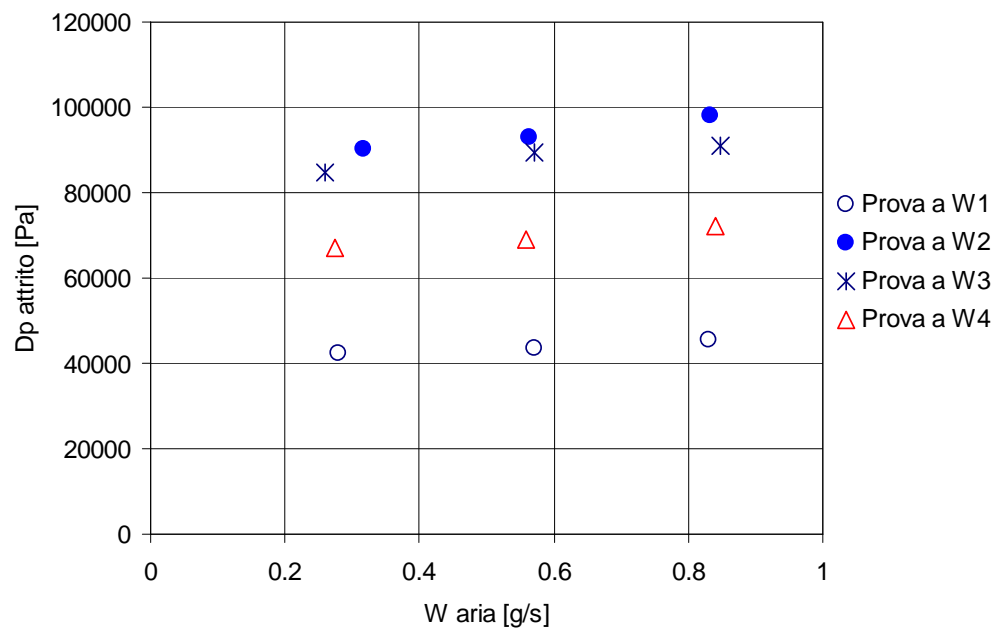
Figura 459: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 0,64\text{ m}$  per le portate testate.



**B.2.2 Cadute di pressione misurate e per attrito elica  $D = 1$  m**

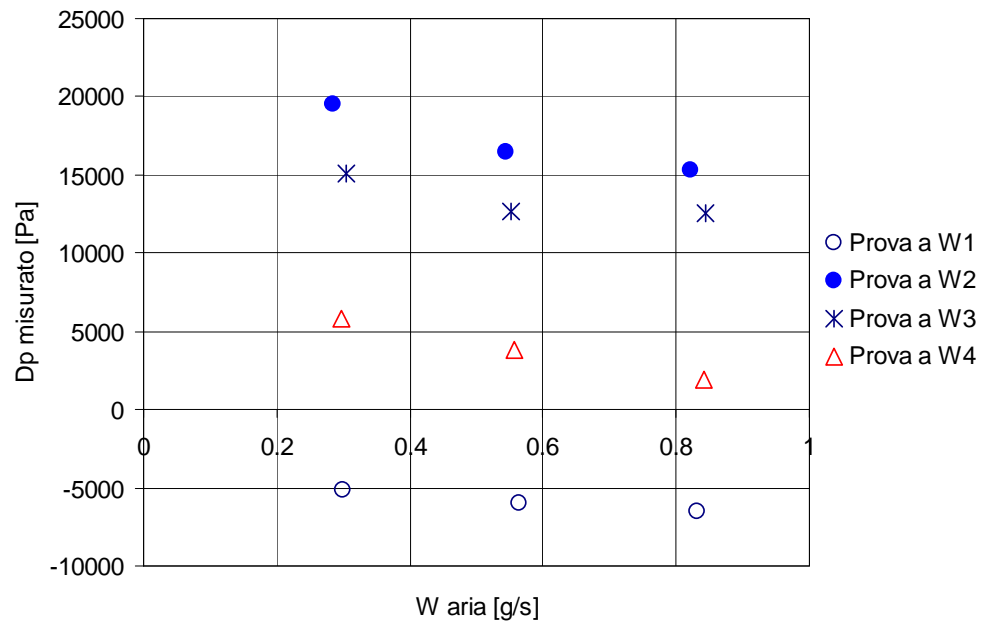


**Figura 460: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 1$  m per le portate testate.**

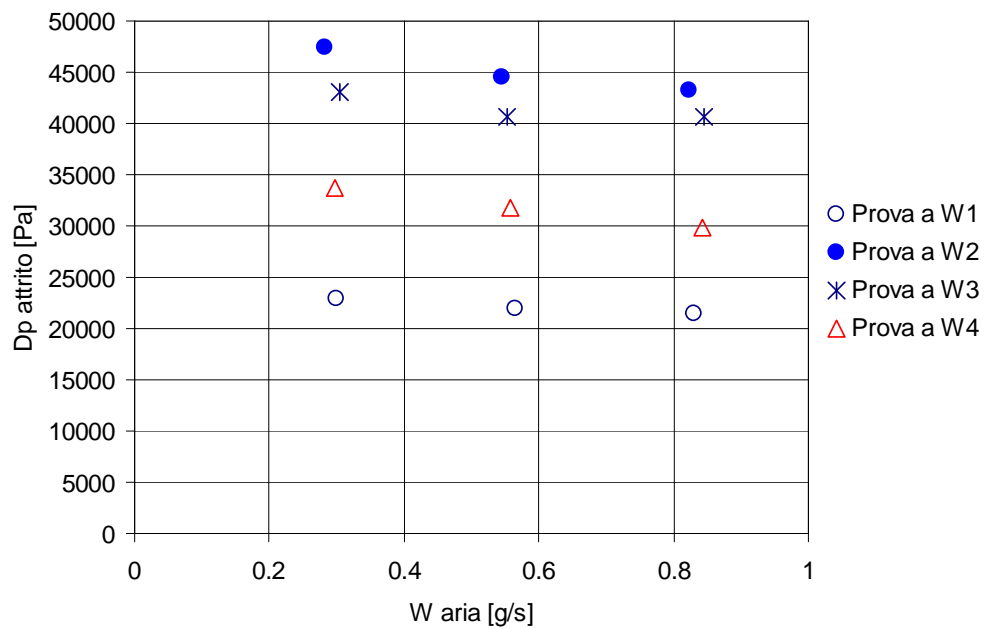


**Figura 461: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 1$  m per le portate testate.**

**B.2.3 Cadute di pressione misurate e per attrito elica  $D = 1,39\text{ m}$**



**Figura 462: Cadute di pressione misurate in bifase nell' elica con  $D = 1,39\text{ m}$  per le portate testate.**



**Figura 463: Cadute di pressione per attrito in bifase nell' elica con  $D = 1,39\text{ m}$  per le portate testate.**

### B.3 Circuito B prove tipo II Caso 1

#### B.3.1 Cadute di pressione misurate e per attrito per portata W1

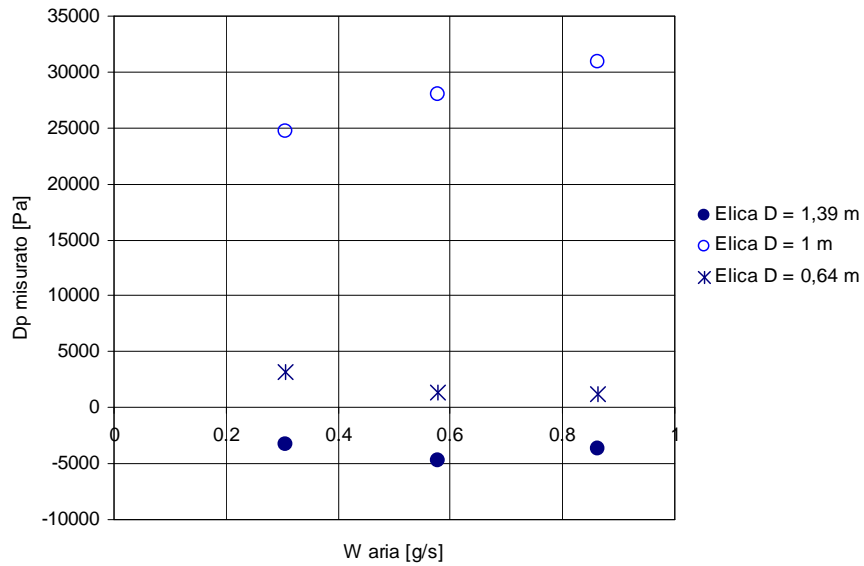


Figura 464: Cadute di pressione misurate in bifase nelle tre eliche per la portata totale W1.

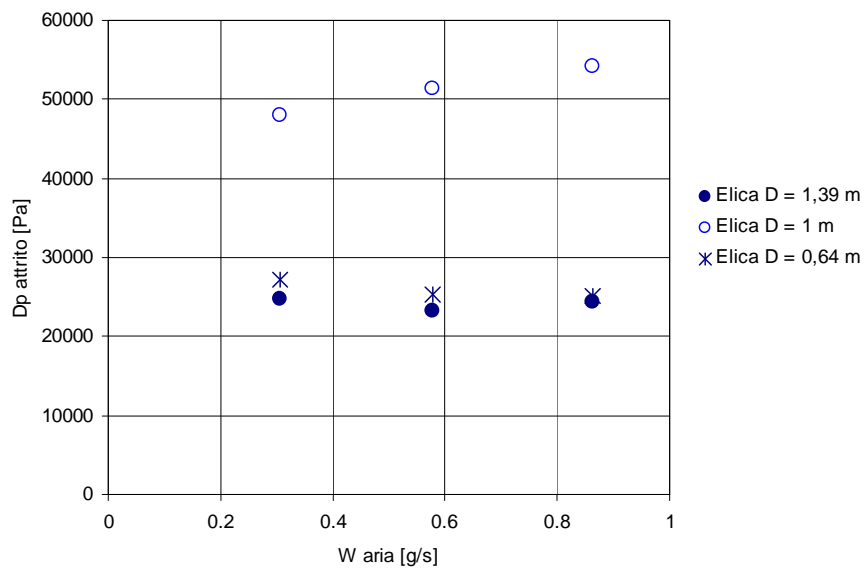
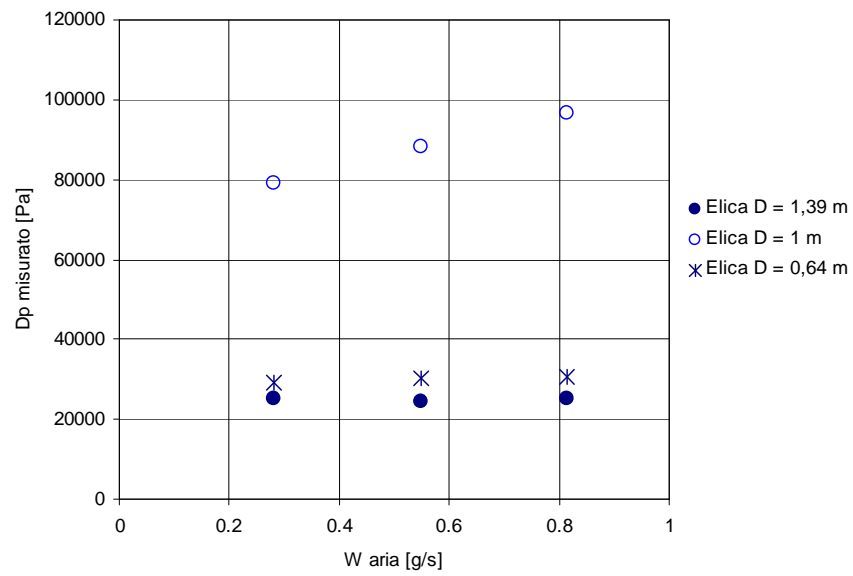
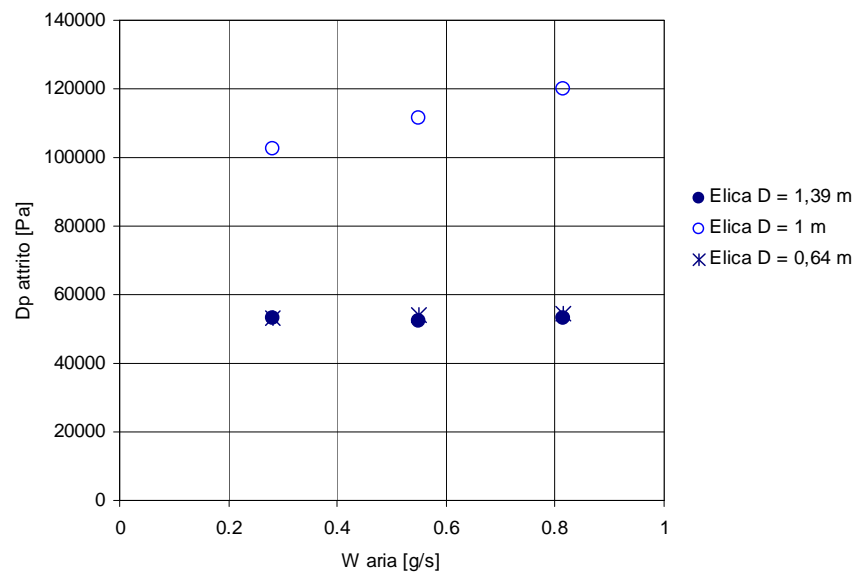


Figura 465: Cadute di pressione per attrito in bifase nelle tre eliche per la portata totale W1.

**B.3.2 Cadute di pressione misurate e per attrito per portata W2**

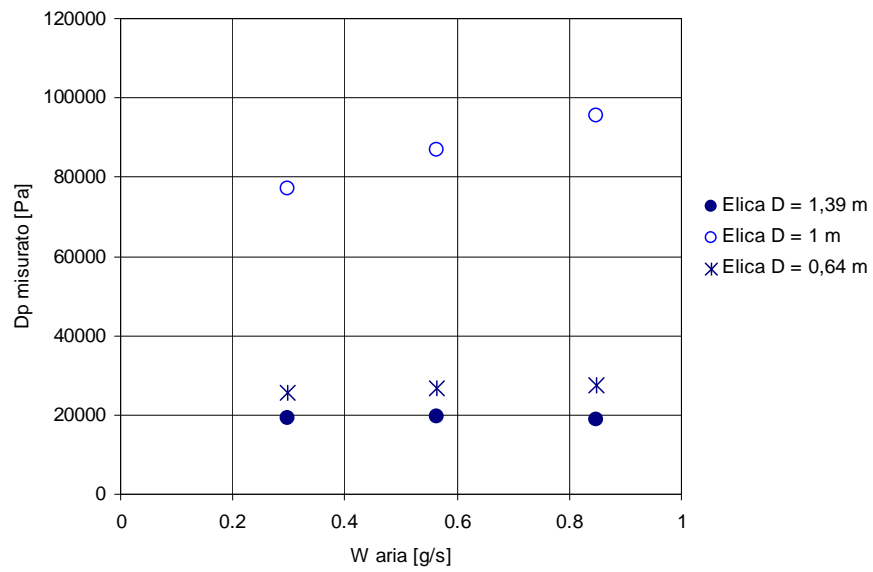


**Figura 466: Cadute di pressione misurate in bifase nelle tre eliche per la portata totale W2.**

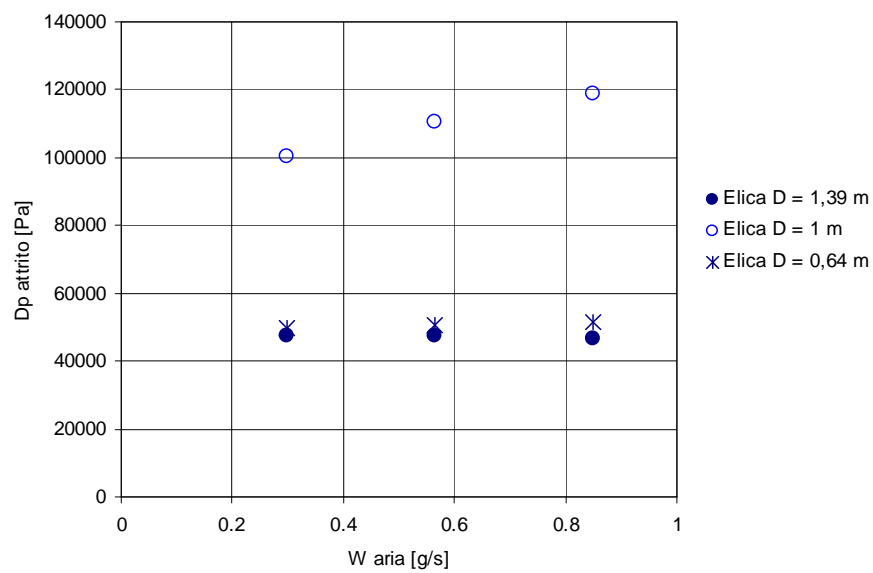


**Figura 467: Cadute di pressione per attrito in bifase nelle tre eliche per la portata totale W2.**

**B.3.3 Cadute di pressione misurate e per attrito per portata W3**

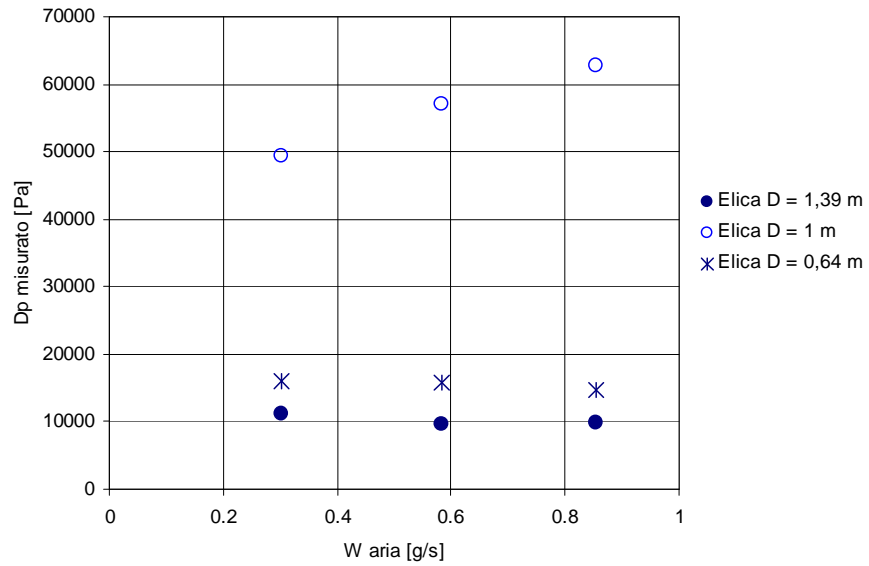


**Figura 468: Cadute di pressione misurate in bifase nelle tre eliche per la portata totale W3.**

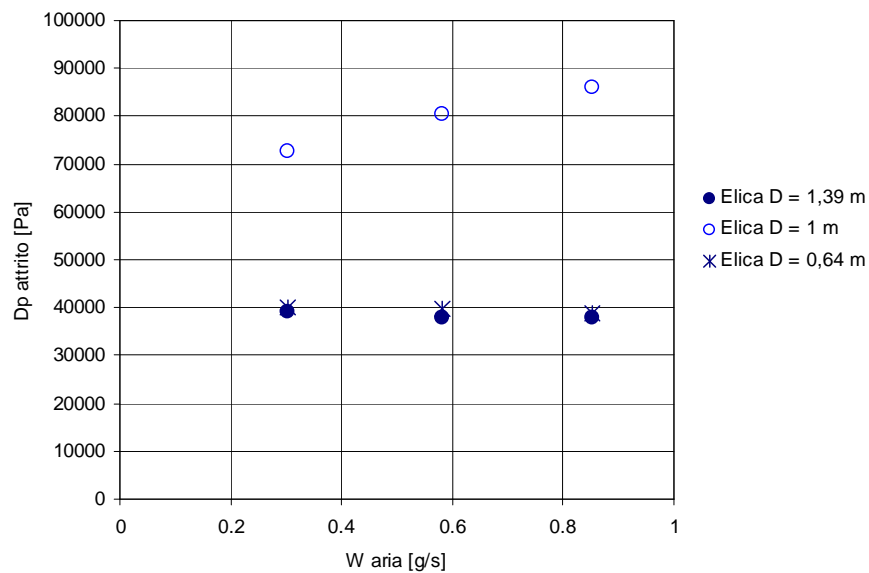


**Figura 469: Cadute di pressione per attrito in bifase nelle tre eliche per la portata totale W3.**

**B.3.4 Cadute di pressione misurate e per attrito per portata W4**



**Figura 470: Cadute di pressione misurate in bifase nelle tre eliche per la portata totale W4.**



**Figura 471: Cadute di pressione per attrito in bifase nelle tre eliche per la portata totale W4.**

## Appendice C Immagini dei *flow pattern* Elica D = 0,64 m

### C.1 Osservazioni ad altezza $\Delta Z$ di 510 mm

#### C.1.1 Prova con portata d'acqua pari a 200 l/h



Figura 472: Portata d'aria pari a 50 l/h.



Figura 473: Portata d'aria pari a 100 l/h [testa].



**Figura 474:** Portata d'aria pari a 100 l/h [coda].



**Figura 475:** Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].



**Figura 476:** Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].





**Figura 477: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**



**Figura 478: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



**Figura 479: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**



**Figura 480: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**



**Figura 481: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**



**Figura 482: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**

***C.1.2 Prova con portata d'acqua pari a 300 l/h***



**Figura 483: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 484: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 485: Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].**



**Figura 486: Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].**



**Figura 487: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**



**Figura 488: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



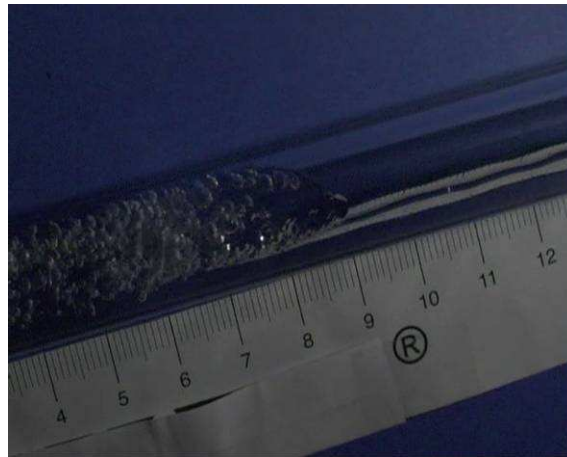
**Figura 489: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**



**Figura 490: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**



**Figura 491: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**



**Figura 492: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**

***C.1.3 Prova con portata d'acqua pari a 400 l/h***



**Figura 493: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 494: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 495: Portata d'aria pari a 150 l/h.**



**Figura 496: Portata d'aria pari a 200 l/h.**



**Figura 497: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**



**Figura 498: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**



**Figura 499: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**



**Figura 500: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**



*C.1.4 Prova con portata d'acqua pari a circa 600 l/h*



**Figura 501: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 502: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 503: Portata d'aria pari a 150 l/h.**



**Figura 504: Portata d'aria pari a 200 l/h.**



**Figura 505: Portata d'aria pari a 250 l/h.**



**Figura 506: Portata d'aria pari a 300 l/h.**

*C.1.5 Prova con portata d'acqua pari a circa 800 l/h*



**Figura 507: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 508: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 509: Portata d'aria pari a 150 l/h.**



**Figura 510: Portata d'aria pari a 200 l/h.**



**Figura 511: Portata d'aria pari a 250 l/h.**



**Figura 512: Portata d'aria pari a 300 l/h.**

## Appendice D Immagini dei *flow pattern* Elica D = 1 m

### D.1 Osservazioni ad altezza $\Delta Z$ di 510 mm

#### D.1.1 Prova con portata d'acqua pari a 200 l/h



Figura 513: Portata d'aria pari a 50 l/h.



Figura 514: Portata d'aria pari a 100 l/h [testa].



**Figura 515: Portata d'aria pari a 100 l/h [coda].**



**Figura 516: Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].**



**Figura 517: Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].**



**Figura 518:** Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].



**Figura 519:** Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].



**Figura 520:** Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].



**Figura 521: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**



**Figura 522: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**



**Figura 523: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**



*D.1.2 Prova con portata d'acqua pari a 300 l/h*



**Figura 524: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 525: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 526: Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].**



**Figura 527: Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].**



**Figura 528: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**



**Figura 529: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



**Figura 530: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**



**Figura 531: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**



**Figura 532: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**



**Figura 533: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**

***D.1.3 Prova con portata d'acqua pari a 400 l/h***



**Figura 534: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 535: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 536: Portata d'aria pari a 150 l/h.**



**Figura 537: Portata d'aria pari a 200 l/h.**



**Figura 538: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**



**Figura 539:** Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].

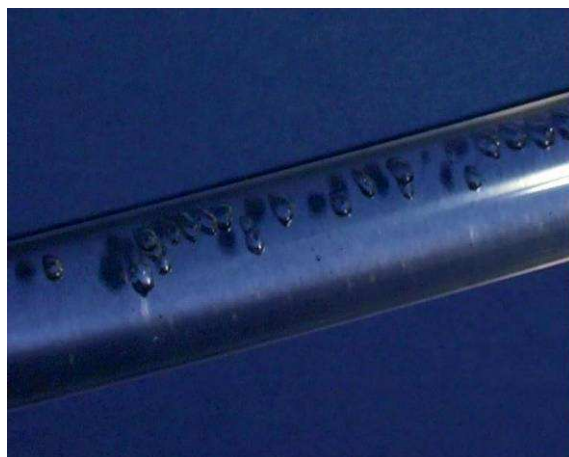


**Figura 540:** Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].



**Figura 541:** Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].

*D.1.4 Prova con portata d'acqua pari a circa 800 l/h*



**Figura 542: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 543: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 544: Portata d'aria pari a 150 l/h.**



**Figura 545: Portata d'aria pari a 200 l/h.**



**Figura 546: Portata d'aria pari a 250 l/h.**



**Figura 547: Portata d'aria pari a 300 l/h.**

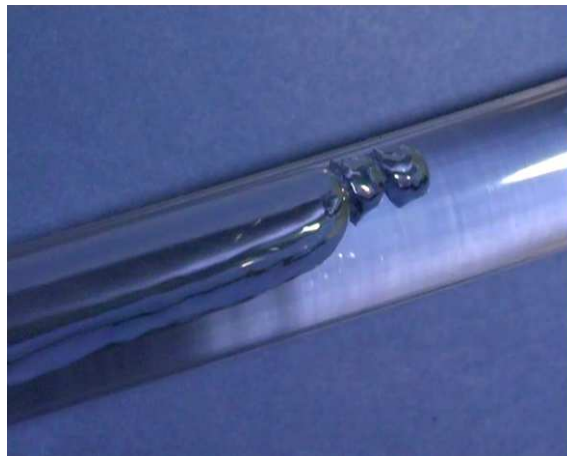


## D.2 Osservazioni ad altezza $\Delta Z$ di 1280 mm

### D.2.1 Prova con portata d'acqua pari a 200 l/h



**Figura 548:** Portata d'aria pari a 50 l/h.



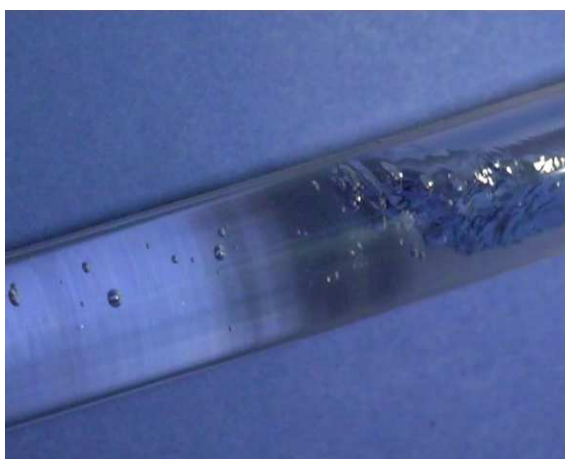
**Figura 549:** Portata d'aria pari a 100 l/h [testa].



**Figura 550: Portata d'aria pari a 100 l/h [coda].**



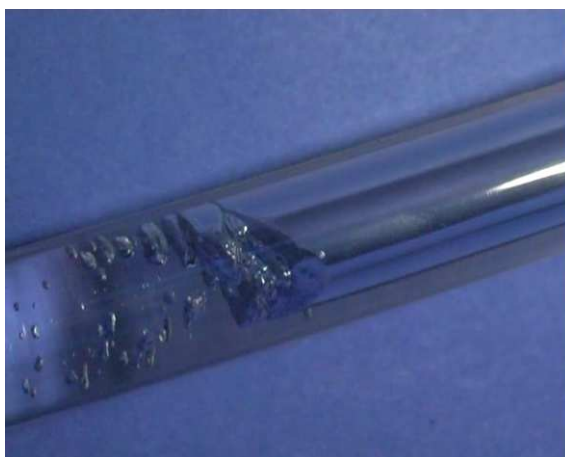
**Figura 551: Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].**



**Figura 552: Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].**



**Figura 553: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**



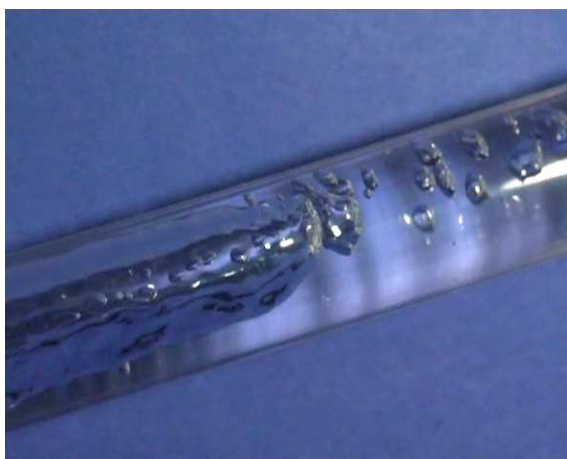
**Figura 554: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



**Figura 555: Portata d'aria a 250 l/h [testa].**



**Figura 556: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**



**Figura 557: Portata d'acqua pari a 300 l/h [testa].**

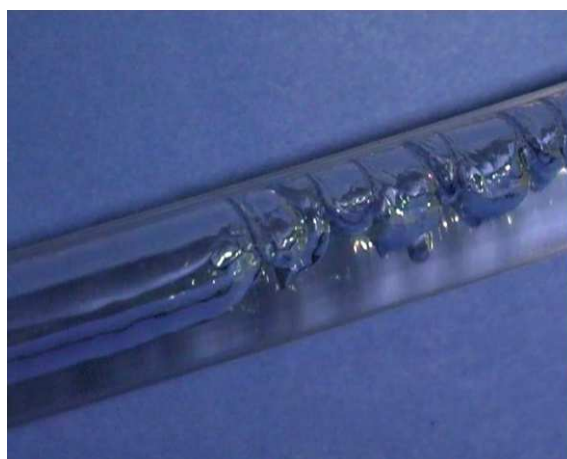


**Figura 558: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**

*D.2.2 Prove con portata d'acqua pari a 300 l/h*



**Figura 559: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 560: Portata d'aria 100 l/h.**



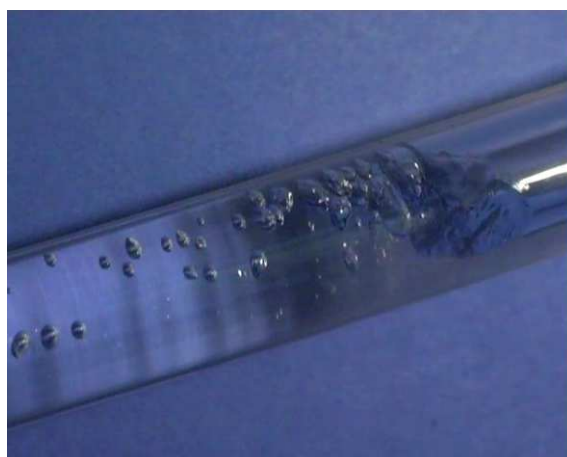
**Figura 561: Portata d' aria pari a 150 l/h [testa].**



**Figura 562: Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].**



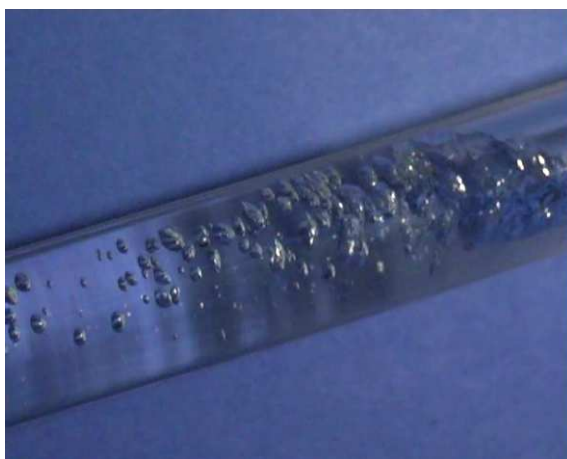
**Figura 563: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**



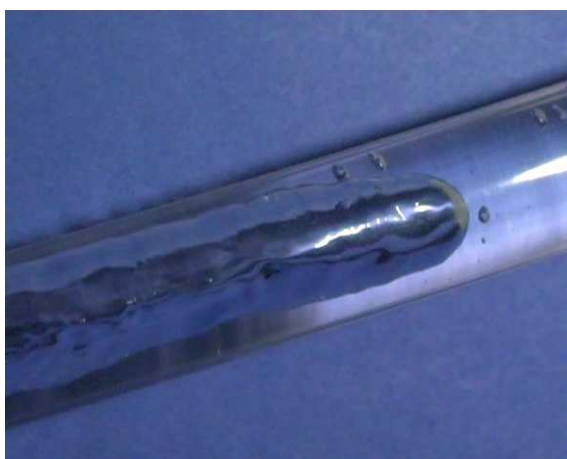
**Figura 564: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



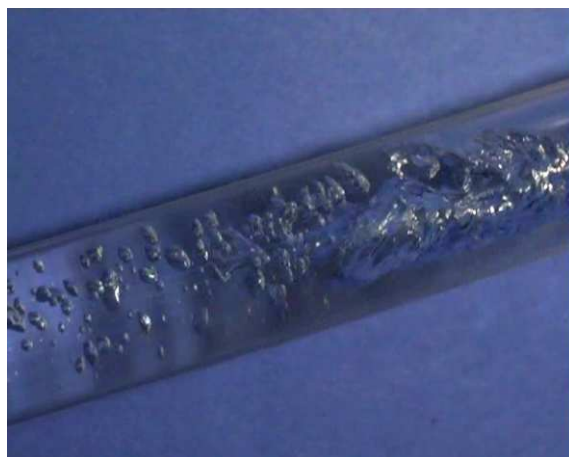
**Figura 565: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**



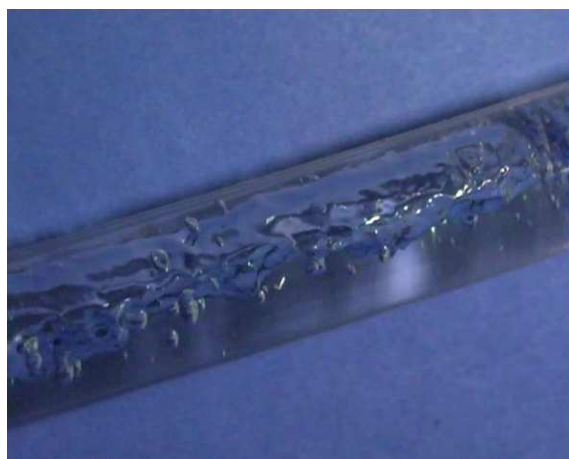
**Figura 566: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**



**Figura 567: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**



**Figura 568: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**



**Figura 569: Portata d'aria pari a 300 l/h [zona centrale].**



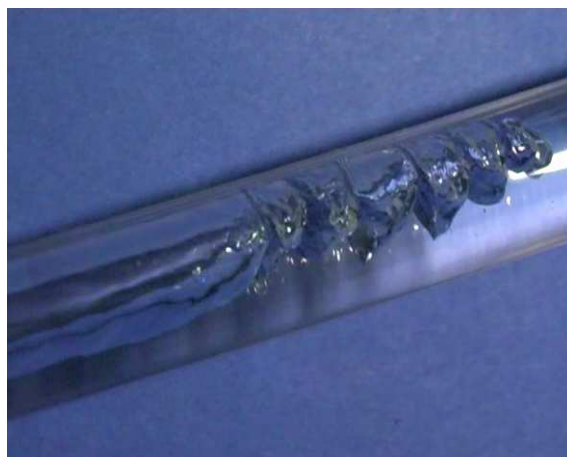
*D.2.3 Prova con portata d'acqua pari a 400 l/h*



**Figura 570: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



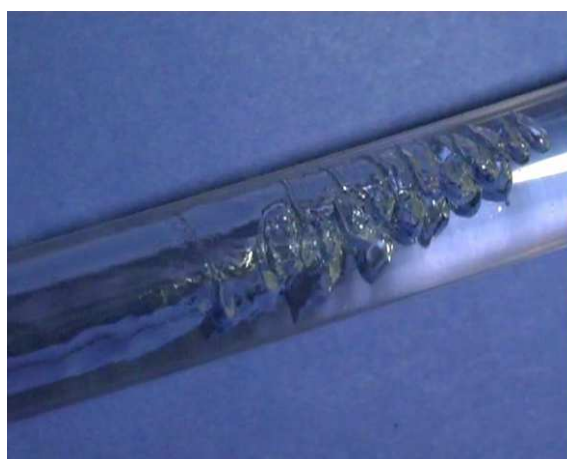
**Figura 571: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 572: Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].**



**Figura 573: Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].**



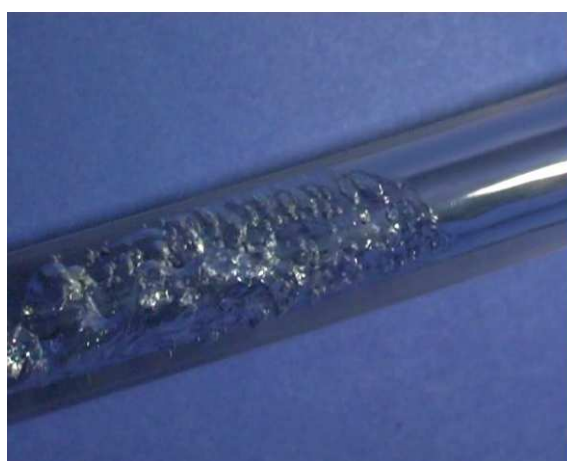
**Figura 574: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**



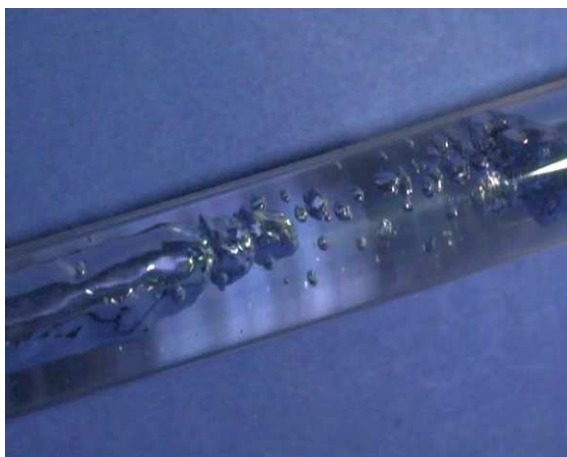
**Figura 575: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



**Figura 576: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**



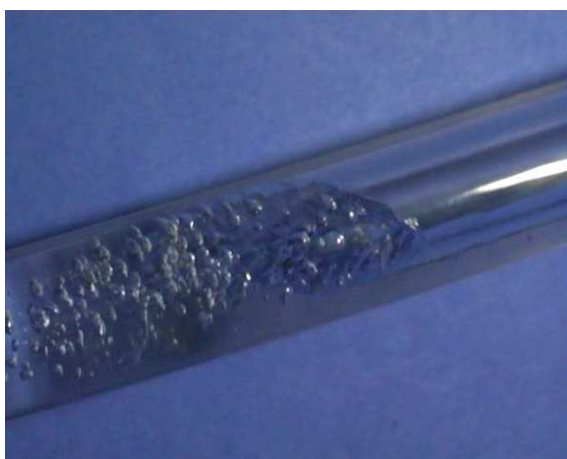
**Figura 577: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**



**Figura 578: Portata d'aria pari a 250 l/h.**



**Figura 579: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**

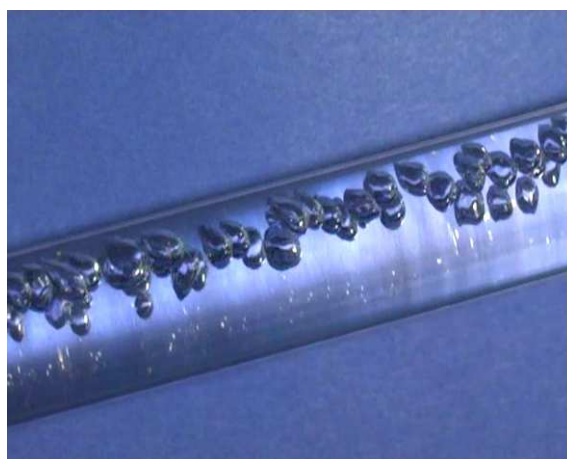


**Figura 580: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**

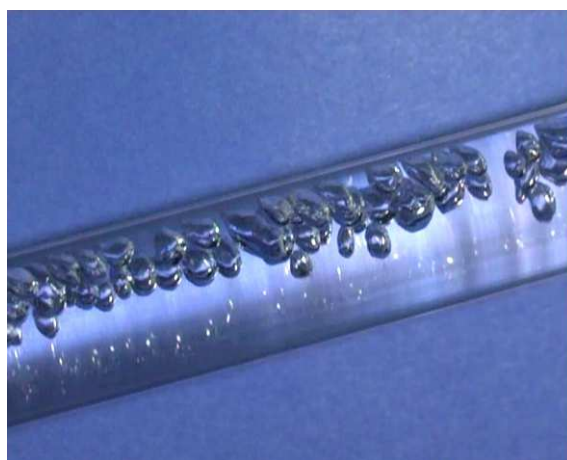
*D.2.4 Prove con portata d'acqua pari a circa 800 l/h*



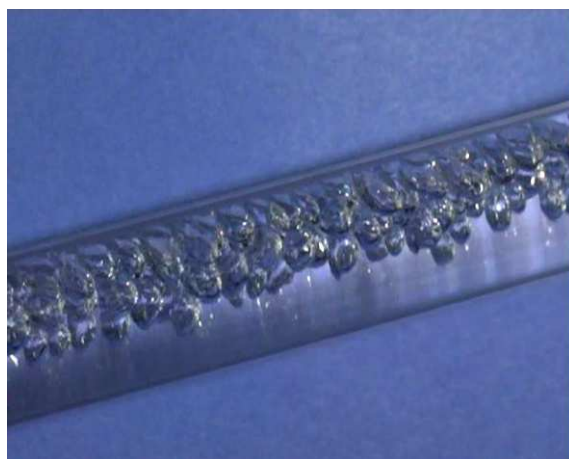
**Figura 581: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



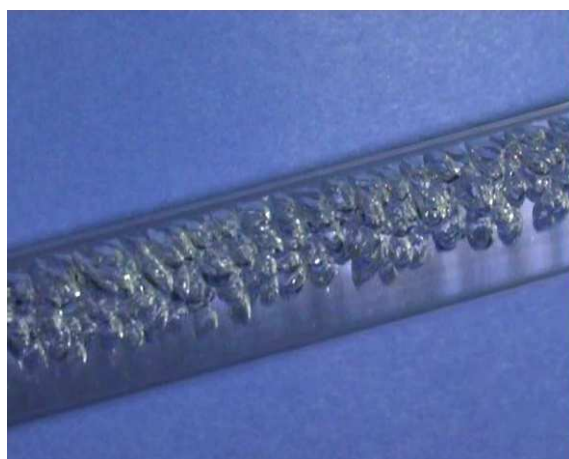
**Figura 582: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 583: Portata d'aria pari a 150 l/h.**



**Figura 584: Portata d'aria pari a 200 l/h.**



**Figura 585: Portata d'aria pari a 250 l/h.**



**Figura 586: Portata d'aria pari a 300 l/h.**

### D.3 Osservazioni ad altezza $\Delta Z$ di 2080 mm

#### D.3.1 Portata d'acqua pari a 200 l/h



Figura 587: Portata d'aria pari a 50 l/h.



Figura 588: Portata d'aria pari a 100 l/h [testa].



Figura 589: Portata d'aria pari a 100 l/h [coda].



**Figura 590: Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].**

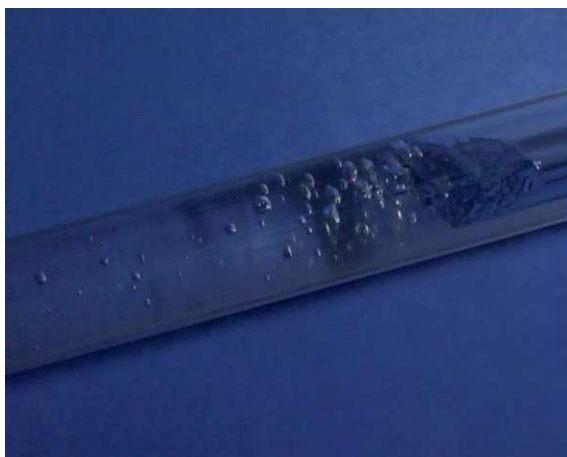


**Figura 591: Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].**



**Figura 592: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**





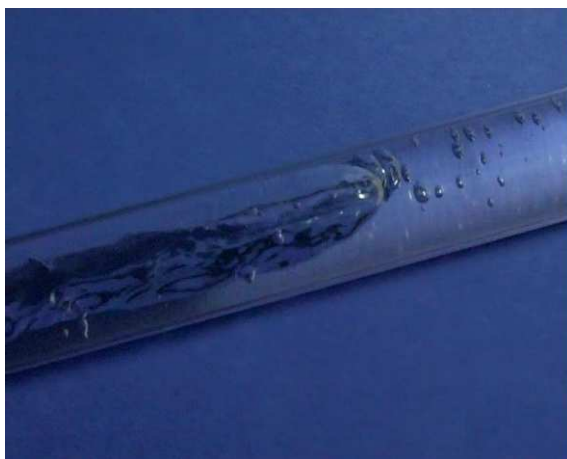
**Figura 593: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



**Figura 594: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**



**Figura 595: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**



**Figura 596: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**



**Figura 597: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**

*D.3.2 Portata d'acqua pari a 300 l/h*



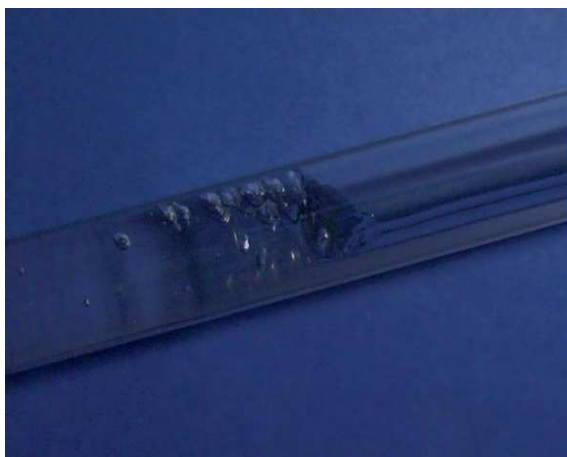
**Figura 598: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 599: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 600: Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].**



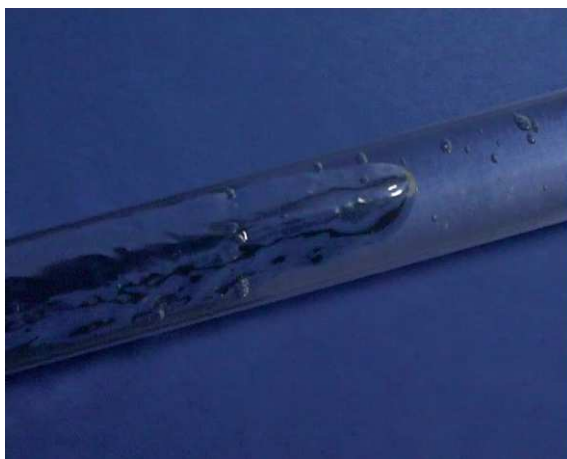
**Figura 601: Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].**



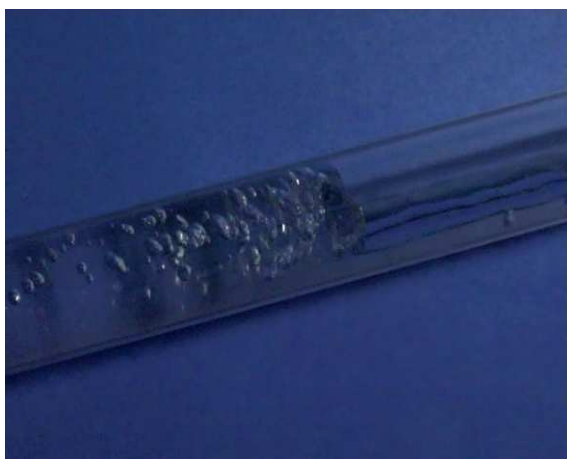
**Figura 602: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**



**Figura 603: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



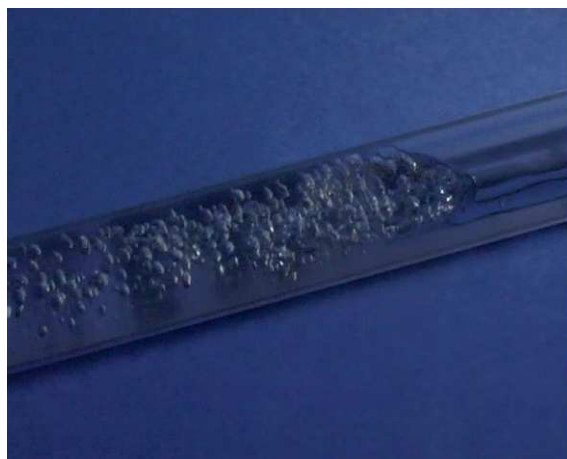
**Figura 604:** Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].



**Figura 605:** Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].



**Figura 606:** Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].



**Figura 607: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**

### *D.3.3 Portata d'acqua pari a 400 l/h*



**Figura 608: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 609: Portata d'aria pari a 100 l/h [testa].**



**Figura 610:** Portata d'aria pari a 100 l/h [coda].



**Figura 611:** Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].



**Figura 612:** Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].



**Figura 613: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**



**Figura 614: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



**Figura 615: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**





**Figura 616: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**

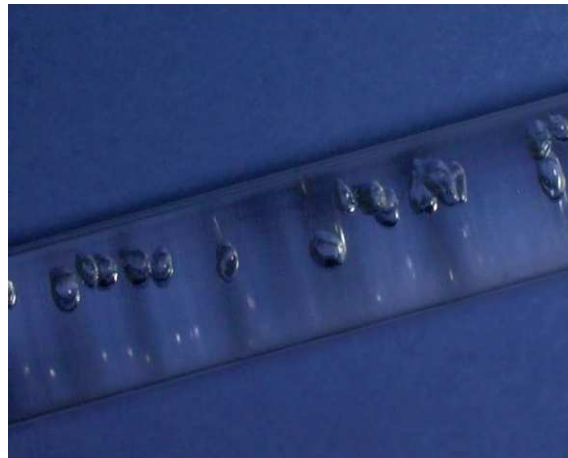


**Figura 617: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**

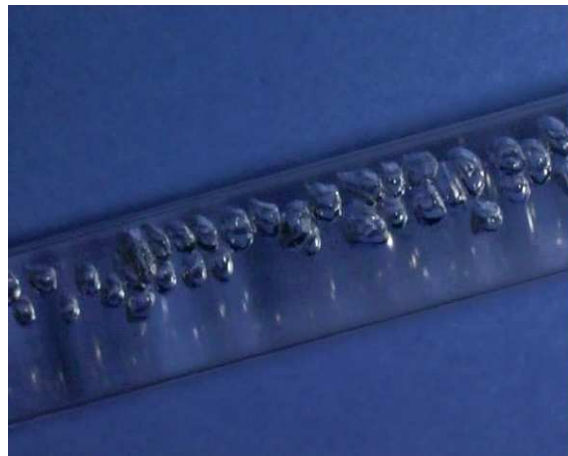


**Figura 618: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**

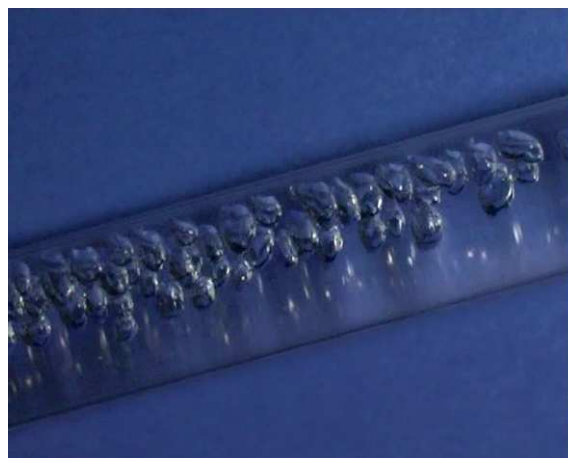
*D.3.4 Portata d'acqua pari a 800 l/h*



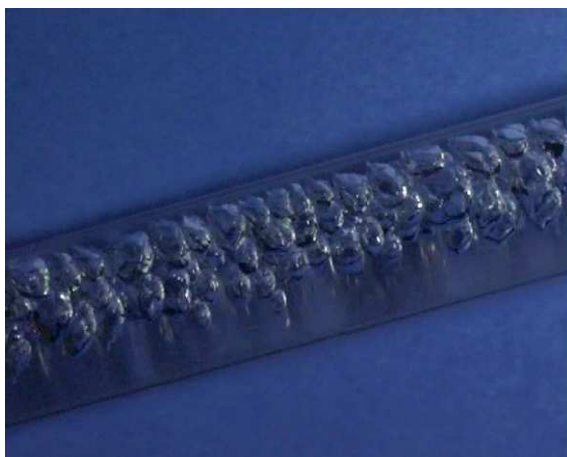
**Figura 619: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 620: Portata d'aria pari a 100 l/h.**



**Figura 621: Portata d'aria pari a 150 l/h.**



**Figura 622: Portata d'aria pari a 200 l/h.**



**Figura 623: Portata d'aria pari a 250 l/h.**



**Figura 624: Portata d'aria pari a 300 l/h.**

## Appendice E Immagini dei *flow pattern* Elica D = 1,39 m

### E.1 Osservazioni ad altezza $\Delta Z$ di 510 mm

#### E.1.1 Prova con portata d'acqua pari a 200 l/h

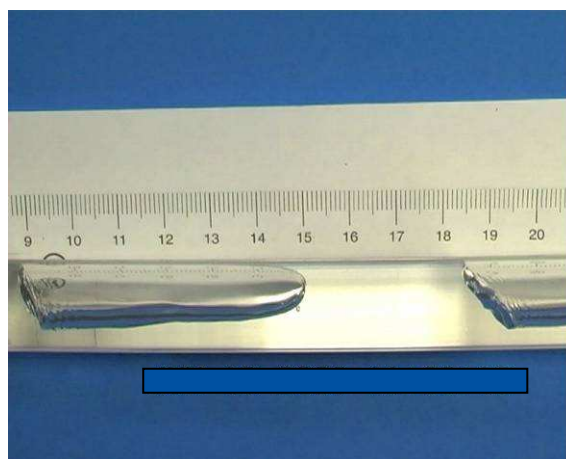


Figura 625: Portata d'aria pari a 50 l/h.

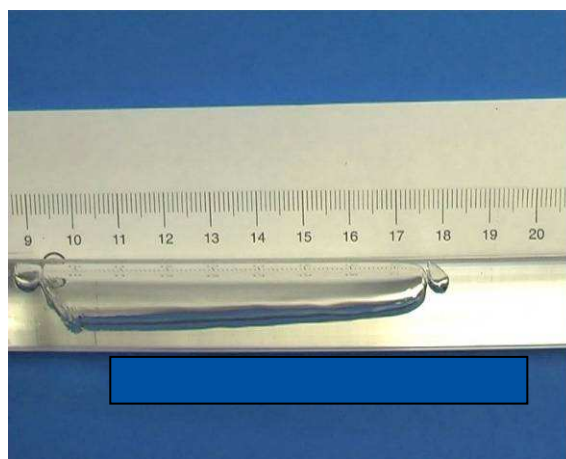
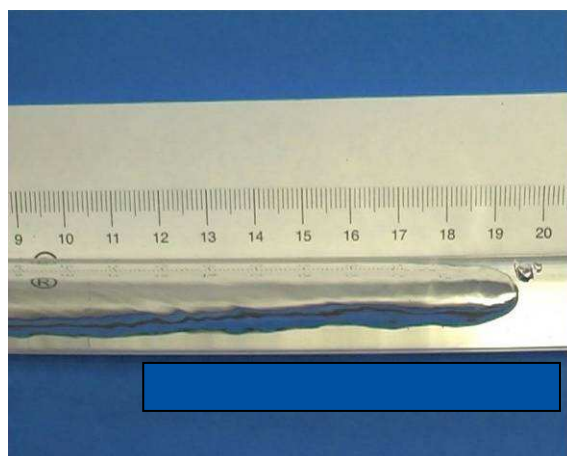
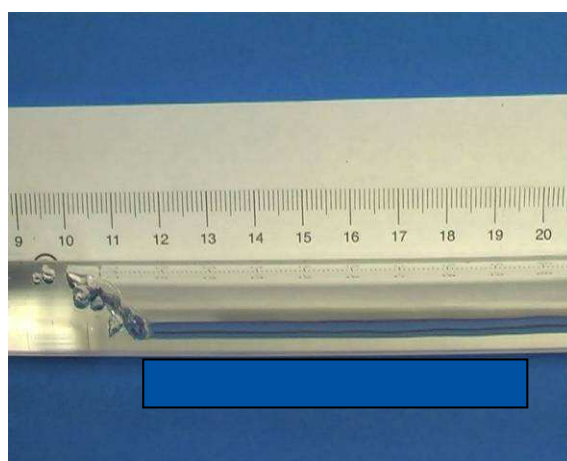


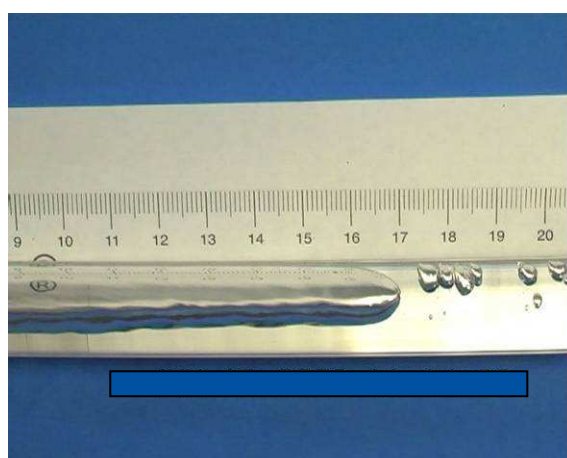
Figura 626: Portata d'aria pari a 100 l/h.



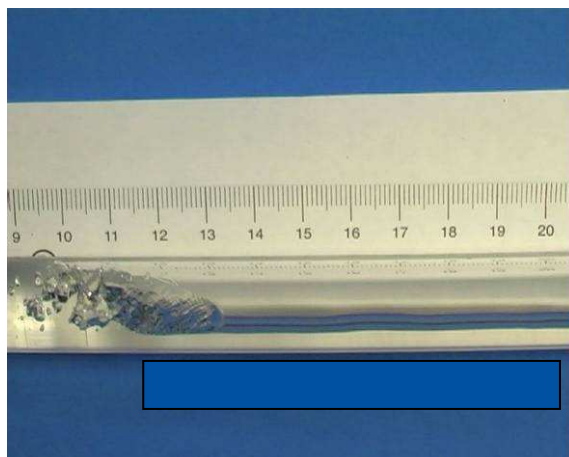
**Figura 627: Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].**



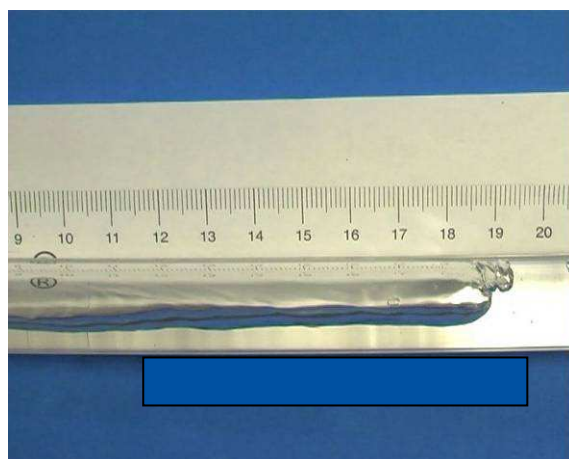
**Figura 628: Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].**



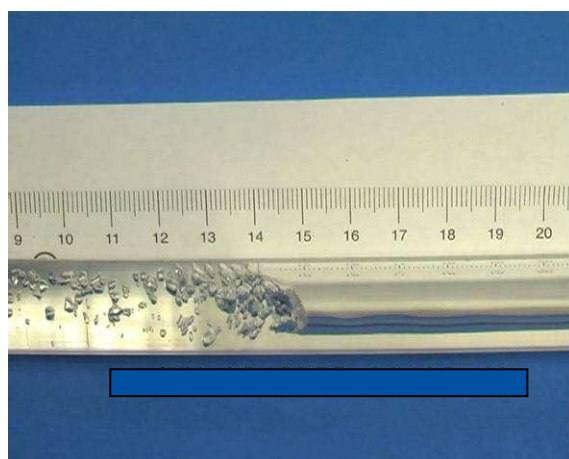
**Figura 629: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**



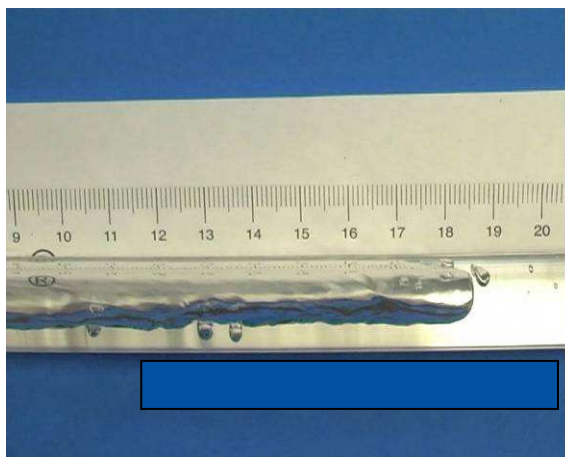
**Figura 630: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



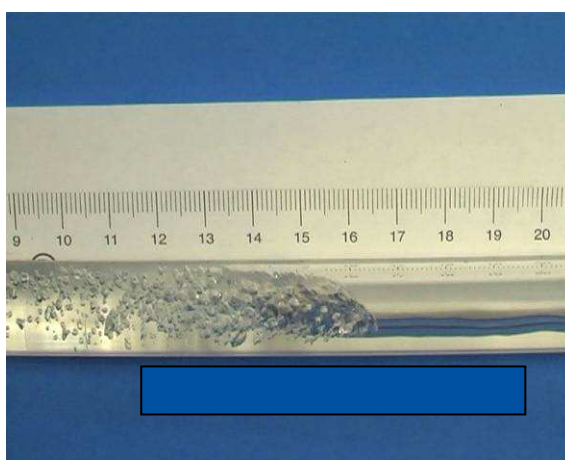
**Figura 631: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**



**Figura 632: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**

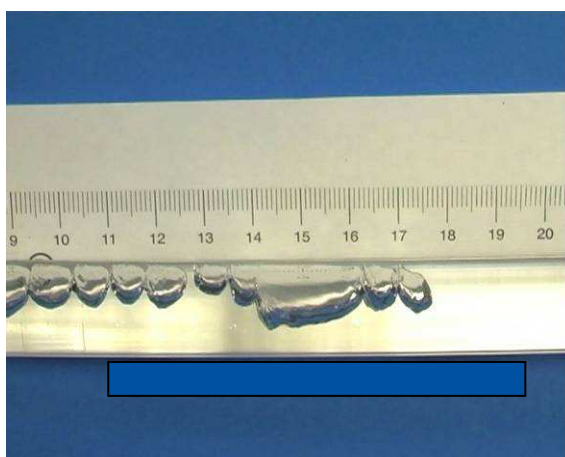


**Figura 633: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**

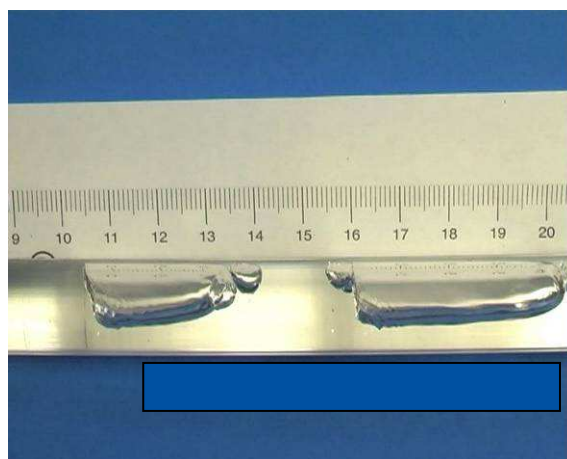


**Figura 634: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**

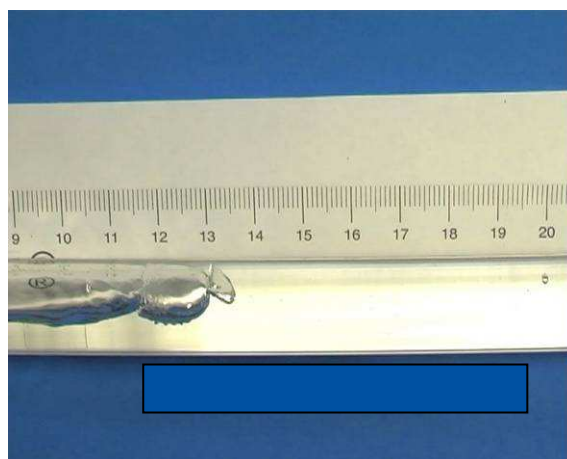
*E.1.2 Prova con portata d'acqua pari a 300 l/h*



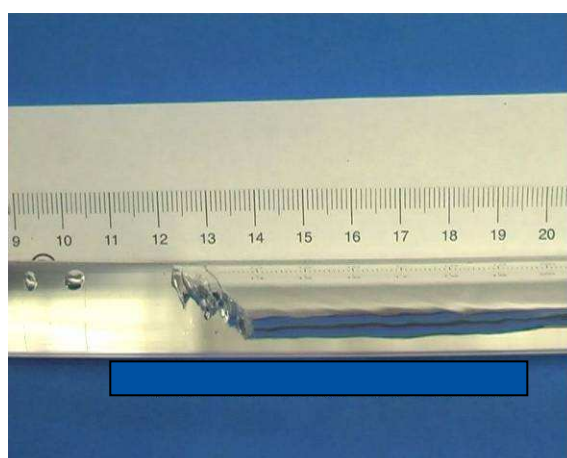
**Figura 635: Portata d'aria pari a 50 l/h.**



**Figura 636: Portata d'aria pari a 100 l/h.**

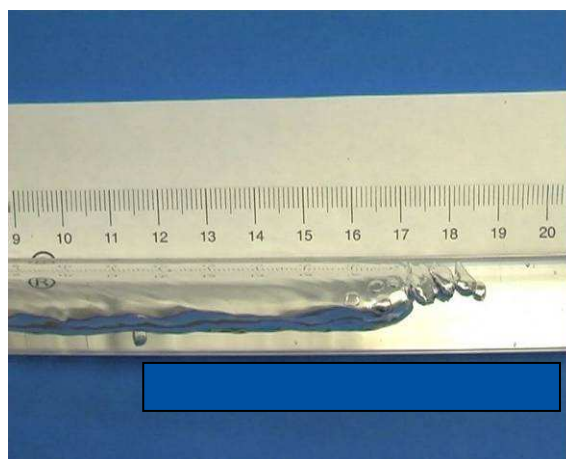


**Figura 637: Portata d'aria pari a 150 l/h [testa].**

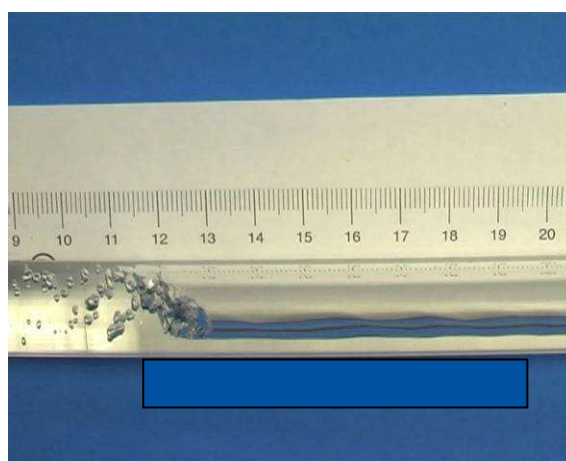


**Figura 638: Portata d'aria pari a 150 l/h [coda].**

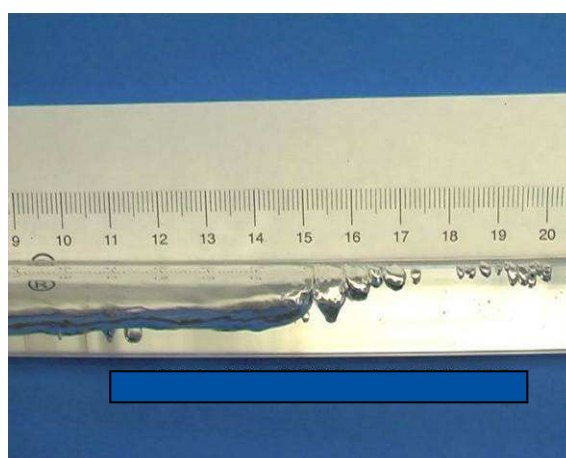




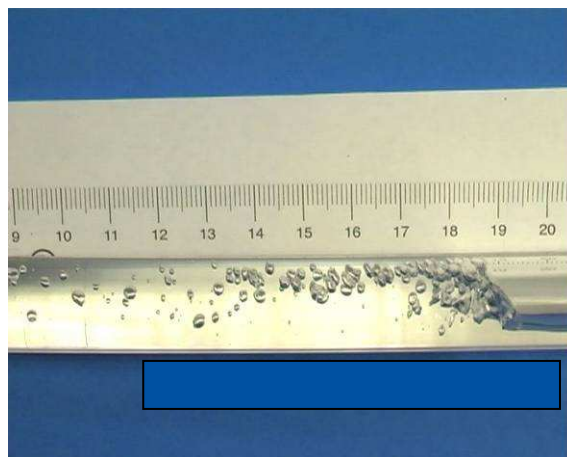
**Figura 639: Portata d'aria pari a 200 l/h [testa].**



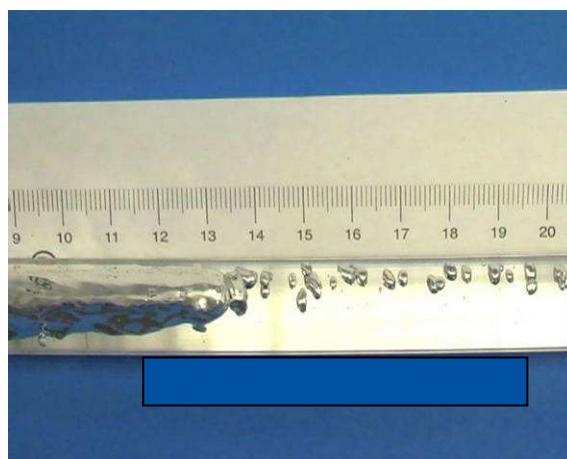
**Figura 640: Portata d'aria pari a 200 l/h [coda].**



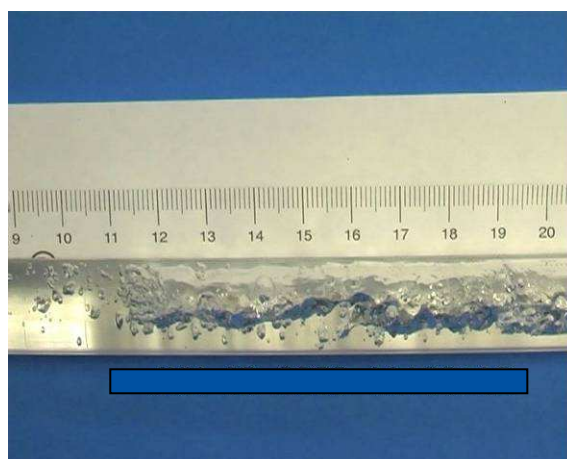
**Figura 641: Portata d'aria pari a 250 l/h [testa].**



**Figura 642: Portata d'aria pari a 250 l/h [coda].**



**Figura 643: Portata d'aria pari a 300 l/h [testa].**



**Figura 644: Portata d'aria pari a 300 l/h [coda].**

---

## Bibliografia.

- [1] M. Carelli et al., “IRIS: Final Technical Progress Report”, *STD-ES-03-40*, Westinghouse, November 2003
- [2] K.Yamamoto, T. Akita, H. Ikeuchi, Y. Kita, “Experimental study of the flow in a helical circular tube”, *Fluid Dynamics Research*, vol.16, pp.237-249,1995.
- [3] H. Ju, Z. Huang, Y. Xu, B. Duan, Y.Yu, “Hydraulic Performance of Small Bending Radius Helical Coil- Pipe” , *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.38, No. 10, pp.826-831, 2001.
- [4] R.C. Xin, A. Awwad, Z. Dong, M.A. Ebadian, H.M., Soliman, “An Investigation and Comparative Study of the Pressure Drop in Air-Water Two-Phase Flow in Vertical Helicoidal pipes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp.735-743, 1996.
- [5] L. Guo, Z. Feng, X. Chen, “An Experimental Investigation of the Frictional pressure Drop of Steam-Water Two-Phase Flow in Helical coils”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.44, pp.2601-2610, 2001
- [6] L. Zhao, L. Guo, B. Bai, Y. Hou, X. Zhang, “Convective Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow Characteristics inside a Small Horizontal Helically Coiled Tubing Once-Through Steam Generator”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.46, pp.4779-4788, 2003.
- [7] A. Cioncolini, L.Santini, “An Experimental Investigation Regarding the Laminar to Turbulent Flow Transition in helically Coiled pipes”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol.30, pp.367-380, 2006.
- [8] Y. Murai, S. Yoshikawa, S. Toda, M. Ishikawa, F. Yamamoto, “Structure of air-water two-phase flow in helically coiled tubes”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 236, pp.94-106, 2006.
- [9] P.B. Whalley, “Air-water Two-phase Flow in a Helically coiled tube”, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 6, pp. 345-356, 1980.

- 
- [10] R.C. Xin, A. Awwad, Z. Dong, M.A. Ebadian, H.M., "An experimental study of single-phase and two-phase flow pressure drop in annular helicoidal pipes", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 18, No.5, pp.482-488, 1996.
- [11] L. Guo, Z. Feng, X. Chen, "Pressure drop oscillation of steam-water two phase flow in a helically coiled tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 44, pp. 1555-1564, 2001.
- [12] G.F. Hewitt, S. Jayanti, "Prediction of film inversion in two-phase flow in coiled tubes", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 236, pp 497-511, 1992.
- [13] M.D. Carelli et al., "The design and safety features of the IRIS reactor", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 230, pp. 151-167, 2004.
- [14] D.G. Prabhaanjan, G.S.V. Raghavan, T.J. Rennie, "Comparison of heat transfer rates between a straight tube heat exchanger and a helically coiled heat exchanger", *International communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 29, no. 2, pp. 185-191, 2002.
- [15] H. Ju, Z. Huang, Y. Xu, B. Duan, Y. Yu, "Hydraulic Performance of Small Bending Radius Helical Coil-Pipe", *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 38, no. 10, pp.826-831, 2001.
- [16] A. Awwad, R.C. Xin, Z.F. Dong, M.A. Ebadian, H.M. Soliman, "Measurement and correlation of the pressure drop in air-water two-phase flow in horizontal helicoidal pipes", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 21, no. 4, pp 607-619, 1995.
- [17] Ujhidy, J. Németh, J Szépvölgyi, "Fluid flow in tubes with helical elements", *Chemical Engineering and Processing*, vol. 32, pp. 1-7, 2003.
- [18] G. Yang, Z.F. Dong, M.A. Ebadian, "Laminar forced convection in a helicoidal pipe with finite pitch", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 38, no. 5, pp. 853-862, 1995.
- [19] G. Yand, M.A. Ebadian, "Turbulent forced convection in a helicoidal pipe with substantial pitch", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 39, no. 10, pp 2015-2022, 1996.

- 
- [20] H. Ito, "Flow in Curved Pipes", *JSME International Journal*, vol. 30, no.262, pp. 543-552, 1987.
- [21] M. Germano, "The Dean equations extended to a helical pipe flow", *Journal of Fluid Mechanics*, vol.203, pp. 289-305, 1989.
- [22] S. Ali, "Pressure drop correlations for flow through regular helical coil tubes", *Fluid Dynamics Research*, vol.28, pp. 295-310, 2001.
- [23] K. Yamamoto, S. Yanase, T. Yoshida, "Torsion effect on the flow in a helical pipe", *Fluid Dynamics Research*, vol.14, pp 259–273, 1994.
- [24] .G. Collier, J.R. Thome, "Convective Boiling and Condensation", *Clarendon Press, Oxford, New York*, 1996.
- [25] H. Ito, "Friction factors for turbulent flow in curved pipes", *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs*, D81, 123-132, 1959.
- [26] L.Haoues, A.Olekhnovitch, A.Teyssedou, "Influence of the void friction profile on the distribution parameter C0 for a bubbly gas – liquid flow in horizontal round pipe", *Nuclear Engineering and Design*, vol.238, pp. 1155-1158, 2008.
- [27] Melkamu A. Woldesemayat, Afshin J. Ghajar, "Comparison of void fraction correlations for different flow patterns in horizontal and upward inclined pipes", *International Journal of Multiphase Flow*, vol.33, pp. 347-370, 2007.
- [28] G. R Rippel, C. R. Eidt, and H. B. Joran, "Two-phase flow in a coiled tube". *Ind. Eng. Chem.*, vol.5, pp.32-39, 1966.
- [29] S. Banerjee, E. Rhodes, and D. S. Scott, "Studies on concurrent gas-liquid flow in helically coiled tubes. I Flow patterns, pressure drop, and holdup", *Can. J. Chem. Eng.*, vol.47, pp.445-453, 1969.
- [30] D. Papini M. Colombo A. Cammi, M. Ricotti, "Prove sperimentali per canali in parallelo e relative zone di instabilità", 2010.
- [31] S. Kakac B. Bon "A Review of two-phase flow dynamic instabilities in tube boiling systems", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008.

- 
- [32] L. Santini A. Cioncolini C. Lombardi, M. Ricotti, “Two-phase pressure drops in a helically coiled steam generator”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007.
- [33] M. Germano, “On the effect of torsion on a helical pipe flow”, *Journal of Fluid Mechanics*, 1982.
- [34] Guo Yun S.Z. Qiu G.H. Su, D.N. Jia, “Theoretical investigations on two phase flow instability in parallel multichannel system”, *Annals of nuclear energy*, 2008.
- [35] Benbella A. Shannak, “Frictional pressure drop of gas liquid two-phase flow in pipes”, *Nuclear Engineering and Design*, 2008.

