

POLITECNICO DI MILANO

SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale



Analisi sperimentale di dispositivi di regolazione per flussi criogenici

Relatore: Prof. Stefano MALAVASI
Correlatore: Ing. Giacomo FERRARESE

Tesi di laurea di:
Roberta CAVIGGIA
Matr. 801547

Anno Accademico 2014 - 2015

Sommario

Le applicazioni criogeniche, e il campo della criogenia in generale, stanno vivendo negli ultimi anni un notevole sviluppo grazie alla varietà di ambiti nei quali rivestono un ruolo fondamentale. L'utilizzo sempre più diffuso di fluidi criogenici richiede naturalmente l'impiego di valvole per regolarne i flussi. In mancanza di una normativa di riferimento apposita, la loro progettazione segue ancora oggi quella che regola le comuni valvole destinate all'uso in acqua; approssimazione che questo lavoro di tesi si propone di verificare.

Sono state eseguite prove sperimentali in acqua, usufruendo dell'impianto situato presso il laboratorio di Idraulica del Politecnico di Milano, e successivamente prove comparative in azoto liquido, mediante un impianto di prova, appositamente realizzato per considerare le proprietà e la disponibilità del fluido.

Analizzando i risultati si intende confrontare il comportamento dei due fluidi sotto determinate condizioni, al fine di stabilire se effettivamente i coefficienti propri delle valvole non sono condizionati dal cambio di fluido, oppure se si rende necessario caratterizzare specificamente le valvole criogeniche.

Abstract

Recently, cryogenic field and its applications are involved in a noticeable development thanks to the variety of areas in which they assume a fundamental role. The use of cryogenic fluids necessarily requires flow regulation valves. Due to the lack of specific regulation, cryogenic valves design follows the laws approved for the ones designed for water applications. The aim of this work is to verify the correctness of this approximation.

Experimental tests have been made up with a system located in the Fantoli Laboratory at Politecnico di Milano. Afterwards, comparative tests have been made in liquid nitrogen, using a test installation specifically built in order to consider fluid's properties and availability.

The analysis of the results aims to compare the behaviour of both fluids under certain conditions, in order to prove if coefficient are not conditioned by the fluid change or if it's necessary to precisely settle a bylaw for cryogenics valves.

Indice

1	Introduzione	1
2	Background e stato dell'arte	3
2.1	Criogenia e fluidi criogenici	3
2.1.1	L'azoto	5
2.2	Valvole di regolazione	10
2.2.1	Coefficienti caratteristici	11
2.3	Riferimenti normativi	18
3	Apparato sperimentale	25
3.1	Diaframmi da testare	25
3.2	Impianto di prova per i test con acqua	28
3.3	Impianto di prova per i test con azoto liquido	30
3.3.1	L'impianto di prova	31
3.4	Acquisizione dei dati	37
3.4.1	L'ambiente di sviluppo LabView	42
3.4.2	Realizzazione del software di acquisizione dati	43
4	Validazione dei risultati normati	57
4.1	Condizioni operative	57
4.2	Risultati	59
5	Prove sperimentali in azoto liquido	81
5.1	Condizioni operative	81
5.2	Risultati	83
6	Conclusioni e sviluppi futuri	137
6.1	Conclusioni	137
6.2	Sviluppi futuri	141
A	Valori di densità per l'azoto liquido	143
B	Valori di viscosità per l'azoto liquido	147

C	Calcolo dei volumi di azoto liquido	151
D	Studio della cavitazione	165
	Bibliografia	175

Elenco delle figure

2.1	Curva di cambiamento di stato	8
2.2	Schema tipico di una valvola di regolazione	10
2.3	Andamento qualitativo della portata di un fluido incomprimibile transitante attraverso una generica valvola, al variare della pressione di valle mantenendo costanti le condizioni di monte	12
2.4	Fasi della cavitazione	17
2.5	Schematizzazione dell'impianto di prova indicato dalle normative	19
2.6	Vista in proiezione del piatto forato calibrato	19
2.7	Rendering del piatto forato calibrato	20
3.2	Rendering dei quattro piatti da testare	26
3.1	Vista in proiezione dei piatti forati	27
3.3	Visione generale dell'impianto	28
3.4	Misuratore di portata	29
3.5	Pannello con i misuratori di pressione	29
3.6	Principali valvole dell'impianto	30
3.7	Proiezione assonometrica dell'impianto di prova	31
3.8	Raddrizzatore di flusso	32
3.9	Misuratore di portata Endress Hauser	32
3.10	Sezione di test	33
3.11	Valvola DN40 situata a valle dell'impianto	34
3.12	Fotografia della vasca in cui si prevede di scaricare l'azoto	34
3.13	Fotografia del corpo principale dell'impianto	35
3.14	Rappresentazione quotata in mm dell'impianto	36
3.15	Schema del cablaggio per alimentare gli strumenti e permettere la trasmissione dei segnali all'elaboratore	40
3.16	PID dell'impianto	41
3.17	Icona per la creazione di un <i>task</i> associato alla scheda	43
3.18	Schermata per la definizione delle proprietà del <i>task</i>	44
3.19	Icona per il salvataggio dei dati	45
3.20	Comandi per l'acquisizione e il salvataggio	46

3.21	Icona per la conversione del segnale	47
3.22	Icona per calcolare il valore medio	47
3.23	Block Diagram: Case Structure sui dati di temperatura . . .	48
3.24	Front Panel: parte di interfaccia relativa ai dati di temperatura	48
3.25	Block Diagram: Case Structure sui dati di portata	49
3.26	Front Panel: parte di interfaccia relativa ai dati di portata . .	50
3.27	Block Diagram: Case Structure sui dati di pressione	51
3.28	Front Panel: parte di interfaccia relativa ai dati di pressione .	51
3.29	Block Diagram: Case Structure sui dati di caduta di pressione	52
3.30	Front Panel: parte di interfaccia relativa ai dati di caduta di pressione	53
3.31	Block Diagram	54
3.32	Front Panel	55
4.1	H ₂ O: Rappresentazione dati acquisiti in unità di corrente - $\beta = 0,47$	61
4.2	H ₂ O: Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re	62
4.3	H ₂ O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione	63
4.4	H ₂ O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione	64
4.5	H ₂ O: Rappresentazione dati acquisiti in unità di corrente - $\beta = 0,30$	65
4.6	H ₂ O: $\beta = 0,30$ - Int. 1 - Andamenti delle medie cumulate . .	67
4.7	H ₂ O: $\beta = 0,30$ - Int. 2 - Andamenti delle medie cumulate . .	68
4.8	H ₂ O: $\beta = 0,30$ - Int. 3 - Andamenti delle medie cumulate . .	69
4.9	H ₂ O: $\beta = 0,30$ - Int. 4 - Andamenti delle medie cumulate . .	70
4.10	H ₂ O: $\beta = 0,30$ - Int. 5 - Andamenti delle medie cumulate . .	71
4.11	H ₂ O: Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re	72
4.12	H ₂ O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione	72
4.13	H ₂ O: Rappresentazione dati acquisiti in unità di corrente - $\beta = 0,18$	74
4.14	H ₂ O: Andamenti delle medie cumulate di portata e pressione - Prova 2	74
4.15	H ₂ O: Andamento della media cumulata del coefficiente di flusso - Prova 2	75
4.16	H ₂ O: Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re	76
4.17	H ₂ O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione	76
4.18	H ₂ O: Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re	78
4.19	H ₂ O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione	78

4.20	H ₂ O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione	79
5.1	N ₂ : Prova 1 - Dati acquisiti in unità di corrente	85
5.2	N ₂ : Prova 1.1 - Andamenti delle medie cumulate	86
5.3	N ₂ : Prova 1.2 - Andamenti delle medie cumulate	87
5.4	N ₂ : Prova 2 - Dati acquisiti in unità di corrente	89
5.5	N ₂ : Prova 2.1 - Andamenti delle medie cumulate	91
5.6	N ₂ : Prova 2.2 - Andamenti delle medie cumulate	92
5.7	N ₂ : Prova 2.3 - Andamenti delle medie cumulate	93
5.8	N ₂ : Prova 2.4 - Andamenti delle medie cumulate	94
5.9	N ₂ : Prova 2.5 - Andamenti delle medie cumulate	95
5.10	N ₂ : Prova 2.6 - Andamenti delle medie cumulate	96
5.11	N ₂ : Prova 3 - Dati acquisiti in unità di corrente	98
5.12	N ₂ : Prova 3.1 - Andamenti delle medie cumulate	100
5.13	N ₂ : Prova 3.2 - Andamenti delle medie cumulate	101
5.14	N ₂ : Prova 3.3 - Andamenti delle medie cumulate	102
5.15	N ₂ : Prova 4 - Dati acquisiti in unità di corrente	104
5.16	N ₂ : Prova 4.1 - Andamenti delle medie cumulate	106
5.17	N ₂ : Prova 4.2 - Andamenti delle medie cumulate	107
5.18	N ₂ : Prova 4.3 - Andamenti delle medie cumulate	108
5.19	N ₂ : Prova 4.4 - Andamenti delle medie cumulate	109
5.20	N ₂ : Prova 4.5 - Andamenti delle medie cumulate	110
5.21	N ₂ : Prova 4.6 - Andamenti delle medie cumulate	111
5.22	N ₂ : Prova 5 - Dati acquisiti in unità di corrente	113
5.23	N ₂ : Prova 5.1 - Andamenti delle medie cumulate	114
5.24	N ₂ : Prova 5.2 - Andamenti delle medie cumulate	115
5.25	N ₂ : Prova 6 - Dati acquisiti in unità di corrente	117
5.26	N ₂ : Prova 6.1 - Andamenti delle medie cumulate	118
5.27	N ₂ : Prova 7 - Dati acquisiti in unità di corrente	120
5.28	N ₂ : Prova 7.1 - Andamenti delle medie cumulate	121
5.29	N ₂ : Prova 7.2 - Andamenti delle medie cumulate	122
5.30	N ₂ : Prova 7.3 - Andamenti delle medie cumulate	123
5.31	N ₂ : Prova 7.4 - Andamenti delle medie cumulate	124
5.32	N ₂ : Prova 7.5 - Andamenti delle medie cumulate	125
5.33	N ₂ : Prova 8 - Dati acquisiti in unità di corrente	127
5.34	N ₂ : Prova 8.1 - Andamenti delle medie cumulate	129
5.35	N ₂ : Prova 8.2 - Andamenti delle medie cumulate	130
5.36	N ₂ : Prova 8.3 - Andamenti delle medie cumulate	131
5.37	N ₂ : Prova 8.4 - Andamenti delle medie cumulate	132
5.38	N ₂ : Prova 8.5 - Andamenti delle medie cumulate	133
5.39	N ₂ : $\beta = 0,06$ - Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re	134
5.40	N ₂ : $\beta = 0,18$ - Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re	135
5.41	N ₂ : $\beta = 0,30$ - Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re	135

5.42	N ₂ : $\beta = 0,47$ - Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re	136
6.1	Confronto C_V N ₂ e H ₂ O - $\beta = 0,06$	138
6.2	Confronto C_V N ₂ e H ₂ O - $\beta = 0,18$	139
6.3	Confronto C_V N ₂ e H ₂ O - $\beta = 0,30$	139
6.4	Confronto C_V N ₂ e H ₂ O - $\beta = 0,47$	140
C.1	Perdite di carico del flusso circolante	152
C.2	Particolari geometrici dei tratti tronco-conici	156
C.3	Coefficiente di resistenza localizzata nel divergente	158
D.1	Ricerca dei σ caratteristici della cavitazione - $\beta = 0,47$	166
D.2	Ricerca dei σ caratteristici della cavitazione - filtro passa-alto - $\beta = 0,47$	169
D.3	Ricerca dei σ caratteristici della cavitazione - $\beta = 0,30$	170
D.4	Ricerca dei σ caratteristici della cavitazione - $\beta = 0,18$	170
D.5	Ricerca dei σ caratteristici della cavitazione - $\beta = 0,06$	174

Elenco delle tabelle

2.1	Caratteristiche fisiche dell'azoto	7
2.2	Configurazione della sezione di test	21
3.1	Valori di β riferiti ai quattro piatti	26
4.1	H ₂ O: Risultati - $\beta = 0,47$	60
4.2	H ₂ O: Risultati - $\beta = 0,30$	66
4.3	H ₂ O: Risultati - $\beta = 0,18$	73
4.4	H ₂ O: Risultati - $\beta = 0,06$	77
5.1	Prove con azoto liquido	82
5.2	N ₂ : Grandezze caratteristiche - Prova 1	84
5.3	N ₂ : Riepilogo dati della Prova 1	84
5.4	N ₂ : Grandezze caratteristiche - Prova 2	88
5.5	N ₂ : Riepilogo dati della Prova 2	90
5.6	N ₂ : Grandezze caratteristiche - Prova 3	97
5.7	N ₂ : Riepilogo dati della Prova 3	99
5.8	N ₂ : Grandezze caratteristiche - Prova 4	103
5.9	N ₂ : Riepilogo dati della Prova 4	105
5.10	N ₂ : Grandezze caratteristiche - Prova 5	112
5.11	N ₂ : Riepilogo dati della Prova 5	112
5.12	N ₂ : Grandezze caratteristiche - Prova 6	116
5.13	N ₂ : Riepilogo dati della Prova 6	116
5.14	N ₂ : Grandezze caratteristiche - Prova 7	119
5.15	N ₂ : Riepilogo dati della Prova 7	119
5.16	N ₂ : Grandezze caratteristiche - Prova 8	126
5.17	Riepilogo dati della Prova 8	128
5.18	N ₂ : Valori medi del coefficiente di flusso	134
A.1	Valori di densità ρ [kg m ⁻³] per l'azoto liquido($T = 70K \div 86K$)	144
A.2	Valori di densità ρ [kg m ⁻³] per l'azoto liquido($T = 87K \div 103K$)	145
A.3	Valori di densità ρ [kg m ⁻³] per l'azoto liquido($T = 104K \div 119K$)	146

B.1	Valori di viscosità dinamica μ [10^{-5} N s m $^{-2}$] per l'azoto liquido ($T = 70K \div 86K$)	148
B.2	Valori di viscosità dinamica μ [10^{-5} N s m $^{-2}$] per l'azoto liquido ($T = 87K \div 103K$)	149
B.3	Valori di viscosità dinamica μ [10^{-5} N s m $^{-2}$] per l'azoto liquido ($T = 104K \div 119K$)	150
C.1	Caratteristiche fisiche dell'azoto in ingresso e in uscita	154
D.1	Cavitazione - $\beta = 0,47$	167
D.2	Cavitazione - Dati filtrati - $\beta = 0,47$	168
D.3	Cavitazione - $\beta = 0,30$	171
D.4	Cavitazione - $\beta = 0,18$	172
D.5	Cavitazione - $\beta = 0,06$	173
D.6	Cavitazione: risultati ottenuti	173

Capitolo 1

Introduzione

Il concetto cardine di questo progetto è nato quando, insieme ad altri tre colleghi del Politecnico di Milano, abbiamo collaborato con l'azienda Fema srl di Busto Arsizio nell'ambito dell'edizione 2013/2014 della competizione *Mimprendo Italia*. *Mimprendo Italia* è una competizione nazionale che, nell'anno in questione, ha coinvolto un largo numero di aziende e di studenti provenienti da diverse città italiane e atenei. I team universitari avviati sono stati impegnati per sei mesi a sviluppare progetti innovativi con le aziende partner. Il progetto proposto da Fema, che è risultato vincitore, ha avuto come tema la caratterizzazione delle valvole criogeniche, rappresentando così lo studio preliminare a questo lavoro di tesi.

Le principali fasi di questo studio sono riportati di seguito.

- Studio della normativa di riferimento e validazione dei risultati prescritti mediante prove sperimentali.

In questa fase si intende verificare alcuni dati caratteristici forniti da tale normativa mediante prove sperimentali, eseguite sull'impianto situato presso il laboratorio di Idraulica del Politecnico di Milano.

- Riproduzione delle medesime prove sperimentali con azoto liquido.

In un secondo step si intende eseguire prove sperimentali caratterizzate dalle medesime condizioni operative delle prime, ma utilizzando azoto liquido come fluido di riferimento. L'impianto, realizzato appositamente per questo scopo, è situato presso l'azienda *DIEFFE* di Cesano Maderno. L'intento è quello di confrontare i risultati di questa fase con quelli ottenuti dalle prove effettuate presso il laboratorio di Idraulica del Politecnico e compiere le opportune osservazioni.

La prima parte della tesi verte innanzitutto sulla descrizione del fenomeno che si intende studiare. Sono riportate le peculiarità principali e i coefficienti caratteristici delle valvole di regolazione e i punti salienti della normativa di riferimento per le valvole.

La parte successiva descrive gli apparati sperimentali utilizzati per i test con acqua e con azoto liquido. Viene inoltre riportata qualche nozione a proposito dell'acquisizione dati e descritto il software di acquisizione realizzato per tale scopo.

Si passa poi a descrivere le condizioni operative e i risultati ottenuti dalle prove sperimentali in acqua, mirate a validare i risultati riportati in normativa, e in azoto liquido.

Infine si analizzano e confrontano le serie di risultati ottenuti, valutando possibili sviluppi futuri.

Capitolo 2

Background e stato dell'arte

In questo capitolo si descrivono i concetti di criogenia e fluidi criogenici, con particolare attenzione rivolta al fluido protagonista di questo studio, l'azoto liquido. Segue una breve panoramica sul funzionamento delle valvole di regolazione e sui coefficienti che le caratterizzano. Infine sono illustrati i passaggi della normativa di riferimento di maggiore rilevanza.

2.1 Criogenia e fluidi criogenici

Per comprendere al meglio le tematiche affrontate e le procedure seguite nel seguente elaborato, è necessario soffermarsi sui concetti di criogenia e, nello specifico, di fluidi criogenici.

L'Enciclopedia Treccani fornisce la seguente definizione:

”Criogenia: parte della fisica che si occupa di problemi inerenti alla struttura della materia e al suo comportamento alle bassissime temperature (dallo zero assoluto della scala termodinamica fino a poche decine di gradi al di sopra dello zero assoluto), e l'insieme delle tecniche di produzione e utilizzazione di tali temperature.”

Enciclopedia Treccani

Il termine "criogenia" deriva dal greco e letteralmente significa "produzione di freddo ghiacciato"; nonostante il termine sia sinonimo di stato a bassa temperatura, non è ben definito a che punto della scala della temperatura termina la refrigerazione e comincia la criogenia. Gli studiosi del *National Institute of Standard Technology* a Boulder, Colorado hanno deciso di considerare campo della criogenia temperature inferiori ai -180°C (93,15 K). Tutti i gas presenti nell'aria possono essere liquefatti a pressione ambiente abbassandone la temperatura. La frontiera assegnata al campo della criogenia è una ragionevole divisione, in quanto i gas permanenti (come

elio, idrogeno, neon, azoto, ossigeno e aria) permangono allo stato gassoso anche a temperature inferiori a $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$, mentre molti refrigeranti comuni (come ad esempio il freon) hanno punti di ebollizione superiori a $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

L'impiego della criogenia nell'industria moderna sta subendo una notevole espansione e il gran numero di applicazioni industriali ne è la conferma, di seguito sono riportate le più diffuse.

- *Distillazione dell'aria.* Questa è stata forse la prima applicazione industriale della criogenia. Tutti i gas presenti nell'aria possono essere liquefatti a pressione ambiente abbassandone la temperatura.
- *Trasporto di gas naturale.* Il gas naturale, insieme al petrolio e al carbone, è una delle principali fonti di energia sfruttate attualmente: a temperature criogeniche si opera la sua liquefazione, riducendo notevolmente il volume occupato; in questo modo può essere immagazzinato e trasportato in modo agevole.
- *Criopompaggio.* Questa tecnica viene utilizzata per la creazione di ambienti sotto vuoto o per la riduzione del livello di impurità in determinati ambienti o, ancora, per prevenire la contaminazione da oli. Il procedimento consiste nell'aspirazione dell'aria dall'ambiente con una pompa a vuoto, dopodiché la temperatura viene abbassata con una macchina criogenica che fa condensare i gas residui su un radiatore sistemato in modo da non interferire con il processo.
- *Sensori a infrarossi.* Questi dispositivi sono utilizzati per l'osservazione notturna e diurna di oggetti che emettono calore; tra la massima lunghezza d'onda rilevabile e la temperatura di funzionamento del dispositivo sussiste una relazione inversamente proporzionale. Ne consegue che, per osservare oggetti caratterizzati da una temperatura molto bassa, che quindi emettono calore a lunghezze d'onda maggiori, è necessario raffreddare sensibilmente il sensore, fino a temperature criogeniche.
- *Elettronica a semiconduttori.* Molti dei normali apparecchi elettronici con componenti semiconduttori migliorano le loro prestazioni a basse temperature: aumento della velocità di funzionamento, riduzione della potenza necessaria al funzionamento e della velocità di deterioramento, proporzionale alla temperatura.
- *Superconduttività.* A bassissime temperature alcune proprietà fisiche dei corpi cambiano, in particolare alcuni materiali, detti superconduttori, assumono resistenza nulla al passaggio di corrente elettrica al di sotto di una certa temperatura. Questo fenomeno è sfruttato industrialmente per la produzione di intensissimi campi magnetici, molto utilizzati in ricerca e in medicina.

- *Combustibili criogenici.* Alcuni gas, se conservati a temperature talmente basse da consentirne la liquefazione, possono venire impiegati come carburanti. Ad esempio, l'ossigeno e l'idrogeno possono essere utilizzati come carburanti nei missili.
- *Medicina.* Le temperature criogeniche hanno trovato un grande campo d'impiego anche in medicina, dove sono utilizzate sia in tecnologie specifiche, sia all'interno di macchinari più complessi in cui vengono sfruttate alcune caratteristiche dei superconduttori.

Lo studio della criogenia iniziò a svilupparsi nel XIX secolo in seguito agli sforzi compiuti da alcuni scienziati per liquefare i gas permanenti. Nel 1845 il fisico inglese Michael Faraday riuscì a liquefare molti gas permanenti, il procedimento consisteva nel raffreddamento del gas per immersione in un bagno di ghiaccio secco, veniva poi pressurizzato fino alla liquefazione. Sei gas, però, resistevano ad ogni tentativo di liquefazione: questi erano ossigeno, idrogeno, azoto, monossido di carbonio, metano e ossido nitrico. I gas nobili – elio, neon, argon, kripton e xeno – non erano ancora stati scoperti. Dei gas permanenti allora conosciuti, l'ossigeno e l'azoto, i principali costituenti dell'aria, ricevettero maggiore attenzione.

Per molti anni diversi ricercatori lavorarono con l'intento di riuscire a liquefare l'aria. Nel 1877 il francese Louis Cailletet e lo svizzero Raoul Pictet riuscirono a produrre le prime gocce di aria liquida; in seguito, nel 1883 presso l'Università di Cracovia, S. F. von Wroblewski produsse la prima quantità misurabile di ossigeno liquido. Si scoprì così che, a pressione atmosferica, l'ossigeno liquefa a 90 K, e l'azoto a 70 K.

Dopo la liquefazione dell'aria, nel 1898, un chimico scozzese, James Dewar, è riuscito nell'intento di liquefare l'idrogeno (alla temperatura di 20 K).

Verso la fine del 1800 vennero scoperti gas quali argon, kripton e xeno e le rispettive temperature di condensazione, superiori a quella dell'idrogeno, ma inferiori a 173 K.

A questo punto rimaneva soltanto più l'elio: scoperto dapprima nel 1868 nello spettro del Sole e successivamente sulla Terra (1885), l'elio ha il punto di ebollizione più basso di qualsiasi sostanza nota. Nel 1908 il fisico olandese Heike Kamerlingh, riuscì a liquefare l'elio ad una temperatura di 4,2 K.

In rappresentanza dei fluidi criogenici, per il seguente studio è stato considerato l'azoto liquido, largamente diffuso e protagonista di un numero elevato di applicazioni, anche nella quotidianità.

2.1.1 L'azoto

L'azoto è un gas biatomico che costituisce circa il 78% dell'atmosfera terrestre. Oltre che nell'aria, l'azoto si trova nelle proteine che costituiscono tutte

le forme di vita, in alcuni depositi di idrocarburo naturale e in molti composti organici e inorganici. L'azoto è un gas incolore e inodore, non tossico, leggermente solubile in acqua e nella maggior parte degli altri liquidi; è, inoltre, scarso conduttore di calore ed elettricità. Come già accennato, l'azoto ha un punto di ebollizione molto basso, pari a 77,35 K ($-195,98^\circ\text{C}$); se viene ridotto allo stato liquido per compressione, può in seguito essere trasportato sotto pressione e, quando viene liberato, assorbe grandi quantità di calore per poter evaporare. Questa caratteristica rende l'azoto liquido un potente refrigerante. Grazie a questa proprietà e a costi di produzione ragionevoli l'azoto liquido è molto utilizzato per il raffreddamento di apparecchiature scientifiche, la crioconservazione di campioni biologici e vari altri processi nei quali è necessario ottenere o conservare temperature estremamente basse.

Siccome il seguente lavoro si concentra sul dimensionamento di un impianto al cui interno scorre un flusso di azoto liquido, risulta di fondamentale importanza conoscerne le caratteristiche e le equazioni che governano il moto. Tale studio mira, quindi, all'acquisizione di una maggiore confidenza verso questo tipo di fluido e verso il fenomeno che ci si appresta ad analizzare. Si vuole tentare, inoltre, di prevederne il comportamento e eventuali dinamiche che per l'acqua non sarebbe necessario prendere in considerazione. Tale studio è finalizzato all'adozione, se necessario, di opportuni accorgimenti in fase sperimentale. Nello specifico si intende capire se è possibile modellare il moto di un flusso di azoto liquido nello stesso modo in cui si modella il moto di un flusso d'acqua, ossia mediante le equazioni di Navier-Stokes.

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} (\vec{\nabla} \cdot \vec{V})$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial}{\partial y} (\vec{\nabla} \cdot \vec{V})$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial}{\partial z} (\vec{\nabla} \cdot \vec{V})$$

Le equazioni di Navier-Stokes sono equazioni differenziali alle derivate parziali che descrivono il comportamento di un fluido Stokesiano, con l'ipotesi di base che tale fluido possa essere modellato come un continuo.

La tabella 2.1 riporta le principali proprietà fisiche dell'azoto.

Come verrà ampiamente illustrato in seguito, è necessario studiare e comprendere le condizioni che permettono la permanenza allo stato liquido dell'azoto; per fare ciò è molto utile analizzare la curva di cambiamento di stato in funzione della temperatura e della pressione, riportata in figura 2.1.

Siccome l'azoto liquido è un fluido comprimibile è necessario definire i valori di densità e di viscosità dinamica al variare dei due parametri che li condizionano: la pressione e la temperatura. Sebbene si disponga di tali

Tabella 2.1: Caratteristiche fisiche dell'azoto

Fase	Caratteristica	Valore
Gas	Nome	Azoto
	Formula chimica	N_2
	Peso molecolare	28,013
Punto triplo	Temperatura	63,148 K
	Pressione	12,530 kPa
	Calore latente di fusione	25,75 kJ kg ⁻¹
Fase liquida	Densità a 98 kPa	809 kg m ⁻³
	Volume di gas ottenuto da 1 dm ³ di liquido	0,705 m ³
	Temperatura di ebollizione a 101,3 kPa	77,347 K
	Calore latente di ebollizione a 101,3 kPa	198,70 kJ kg ⁻¹
Punto critico	Temperatura	126,20 K
	Pressione	3,3990 MPa
Fase gassosa	Densità a 288 K e 98 kPa	1,147 kg m ⁻³
	Calore specifico a 288 K e 101,3 kPa	1,038 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
	c_p/c_v	1,403
	Conducibilità termica (Condizioni standard)	0,0240 W m ⁻¹ K ⁻¹
	Viscosità (Condizioni standard)	1656 × 10 ⁻⁷ P
	Solubilità in H ₂ O (coefficiente di Bunsen a 293 K e 101,30 kPa)	0,01557

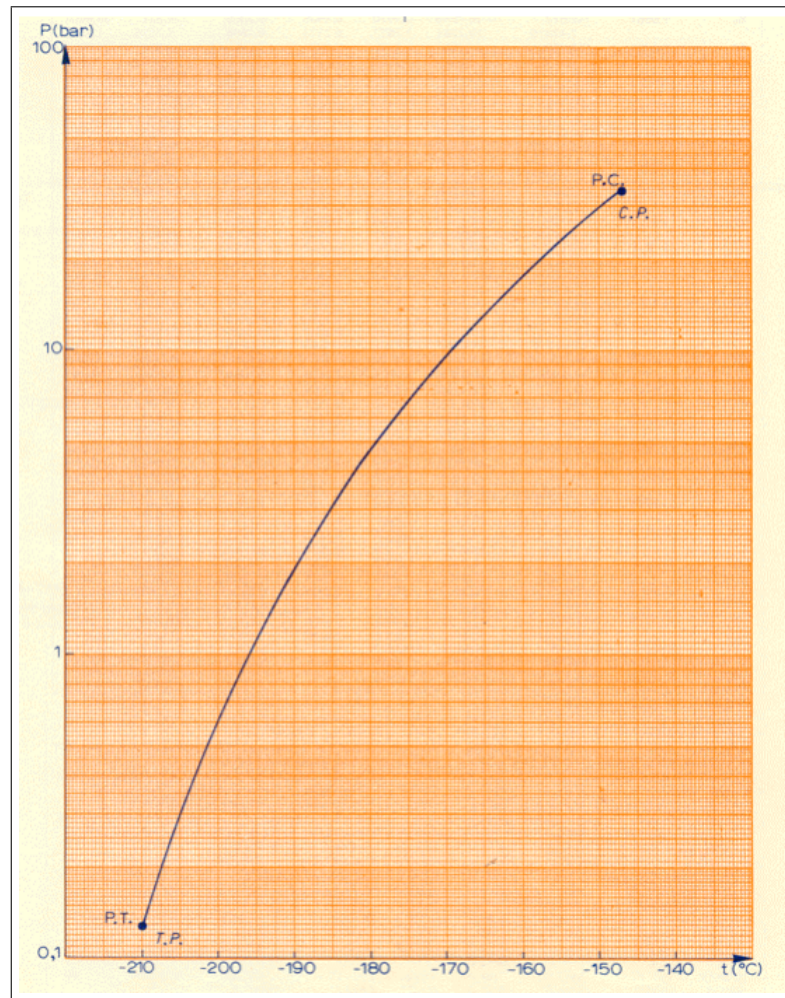


Figura 2.1: Curva di cambiamento di stato

dati [1], questi sono definiti per pochi valori di questi due parametri; prevedendo di lavorare in un range piuttosto limitato di pressione e temperatura sono state create tabelle più 'fitte' con l'ausilio di interpolazioni lineari e polinomiali (v. Appendici A e B). Più avanti nella trattazione si vedrà che tali tabelle torneranno molto utili durante la fase sperimentale.

La pericolosità dell'azoto liquido, anche se viene spesso sottovalutata, è un problema reale nelle situazioni riportate di seguito.

- L'infragilimento dei contenitori dovuto all'errata stima della temperatura di progetto rispetto alle condizioni di utilizzo dell'azoto risulta essere una delle principali cause di incidente.
- Il contatto accidentale del personale con superfici a temperature criogeniche provoca sulla pelle lesioni del tutto simili alle ustioni (l'entità del

danno aumenta con il diminuire della temperatura e con il prolungarsi della durata del contatto).

- L'ultimo rischio, ma certamente quello più elevato in termini di frequenza di accadimenti incidentali, è quello legato al pericolo di asfissia conseguente alla dispersione di azoto in ambienti confinati. E' noto che l'azoto non sia 'intrinsecamente' tossico o nocivo nel senso tradizionale del termine, ma un aumento della sua concentrazione, non rilevabile poiché il gas è incolore e inodore, può causare asfissia a causa della conseguente riduzione della percentuale di ossigeno nell'ambiente.

L'azoto liquido è protagonista in molte applicazioni criogeniche di diversa natura; di seguito sono riportate le maggiormente rilevanti.

- *Biologia.* L'azoto liquido viene adoperato per la conservazione di materiale biologico o di origine biologica per lunghi periodi. Negli ultimi anni, inoltre, stanno aumentando gli studi riguardanti la conservazione criogenica di corpi umani.
- *Industria alimentare.* Nella macinazione di numerosi alimenti l'azoto liquido viene impiegato per assorbire il calore generato dall'attrito, che potrebbe causare l'eccessivo riscaldamento del prodotto provocandone la fusione e la formazione di grumi indesiderati o la degradazione termica. L'azoto liquido viene preferito all'anidride carbonica liquida e ai metodi meccanici nella surgelazione di alimenti di piccole dimensioni per via della maggiore rapidità di raffreddamento che è in grado di garantire e per l'assenza della lieve acidità tipicamente conferita dall'anidride carbonica.
- *Industria chimica.* Anche diversi prodotti chimici subiscono la macinazione a bassa temperatura: si tratta di una tecnica che viene impiegata soprattutto per le materie plastiche, i farmaci e gli insetticidi. Diverse reazioni chimiche in cui compaiono specie particolarmente instabili richiedono un attento controllo della temperatura; in questi casi l'azoto liquido può venire impiegato per il raffreddamento dei reattori.
- *Tecnologie edili.* Nello scavo di tunnel o pozzi in terreni umidi si può adottare l'accorgimento di congelare il terreno al fine di prevenire allagamenti e permettere quindi agli addetti di lavorare in condizioni di maggiore sicurezza.
- *Tecnologie mediche.* Nella chirurgia dermatologica, per il trattamento di numerose patologie, la crioterapia ha dimostrato di essere una buona alternativa al laser o alla chirurgia classica. Insieme all'anidride carbonica, l'azoto liquido è uno dei criogeni più utilizzati anche in questo campo.

- *Informatica.* L'azoto liquido è usato come refrigerante in alcuni sistemi di raffreddamento per computer. Esso, infatti, si presta particolarmente bene al raffreddamento di CPU e GPU sottoposte ad overlocking estremi e tensioni elevate, che altrimenti porterebbero all'aumento esponenziale della temperatura e, a lungo andare, renderebbero inutilizzabile l'hardware.

2.2 Valvole di regolazione

Le valvole di regolazione sono dispositivi meccanici che consentono la modulazione di portata di un fluido (generalmente liquido o gassoso) nei circuiti idraulici introducendo perdite di carico. Tali componenti sono molto diffusi nei processi industriali in quanto permettono il controllo di variabili quali il livello di un liquido, la pressione, la temperatura o la composizione chimica.

In figura 2.2 sono indicati i principali componenti di una generica valvola di regolazione.

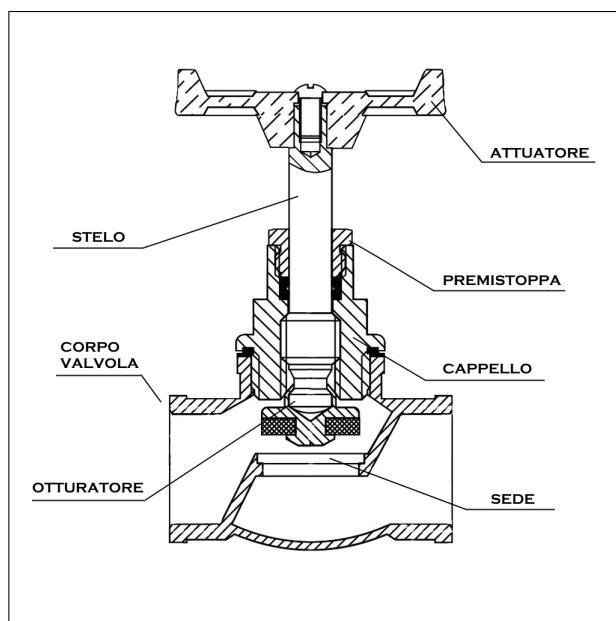


Figura 2.2: Schema tipico di una valvola di regolazione

All'interno del corpo valvola, che costituisce la struttura portante, il passaggio del fluido viene regolato in modo continuo attraverso lo spostamento dell'otturatore rispetto alla sede; quando l'otturatore appoggia sulla sede la valvola è completamente chiusa, quando invece si trova alla sua massima distanza, la valvola è tutta aperta. Questo spostamento avviene tramite lo stelo ed è generato dall'attuatore. La parte superiore del corpo è costituita dal cappello, smontabile per permettere l'ispezione delle parti interne della

valvola; il cappello ha la funzione di guidare lo stelo e contiene un premistoppa che evita la fuoriuscita del fluido. Nel caso di fluidi caratterizzati da temperature estreme si può prevedere che il cappello abbia una forma allungata, in modo da aumentare la distanza tra la sede e l'attuatore.

2.2.1 Coefficienti caratteristici

La scelta e il dimensionamento delle valvole di regolazione influisce molto sulle prestazioni del sistema di controllo: per questo motivo l'idoneità di una particolare valvola rispetto ad un'altra deve essere stabilita, oltre che sulla base di caratteristiche dimensionali, anche e soprattutto valutando le capacità prestazionali della stessa in relazione a quelle richieste. Per fare ciò è necessario mettere in evidenza le caratteristiche di portata proprie della valvola, e quindi esprimere la portata transitante al suo interno per un fluido, e relativo stato fisico, di riferimento. Il parametro, di origine anglosassone, che si utilizza per definire le caratteristiche di portata di una valvola è tradizionalmente il coefficiente di flusso o di portata, C_V .

Il coefficiente di flusso C_V di una valvola è la portata volumetrica, espressa in US gal min^{-1} , di acqua a temperatura compresa nell'intervallo (5 - 40) °C transitante attraverso la valvola per una determinata corsa (parzialmente o totalmente aperta) con una caduta di pressione statica ΔP pari a 1 psi.

$$C_V \left[\frac{\text{US gal}}{\text{min } \sqrt{\text{psi}}} \right] = Q \sqrt{\frac{SG}{\Delta p}} \quad (2.1)$$

Si noti che nella formula del coefficiente di flusso compare anche la densità specifica SG , pari al rapporto tra la densità del fluido utilizzato e quella di riferimento dell'acqua. In generale, quando viene definito il coefficiente di flusso di una valvola al fine di caratterizzarla, il fluido utilizzato è l'acqua, quindi la gravità specifica assume valori tali da permettere l'approssimazione ad un valore unitario.

L'unità di misura utilizzata deriva dalla definizione del coefficiente di flusso nella normativa americana che, come già detto, misura la portata volumetrica in galloni per minuto e la pressione in psi. La normativa europea, invece, si riferisce al coefficiente di flusso K_V , caratterizzato da diverse unità di misura.

Il coefficiente di flusso K_V di una valvola è la portata volumetrica, espressa in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, di acqua a temperatura compresa nell'intervallo (5 - 40) °C transitante attraverso la valvola per una determinata corsa con una caduta di pressione statica ΔP pari a 1 bar.

I due coefficienti sono correlati dalla seguente relazione:

$$K_V \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s } \sqrt{\text{bar}}} \right] = 0,865 C_V \left[\frac{\text{gal}}{\text{min } \sqrt{\text{psi}}} \right] \quad (2.2)$$

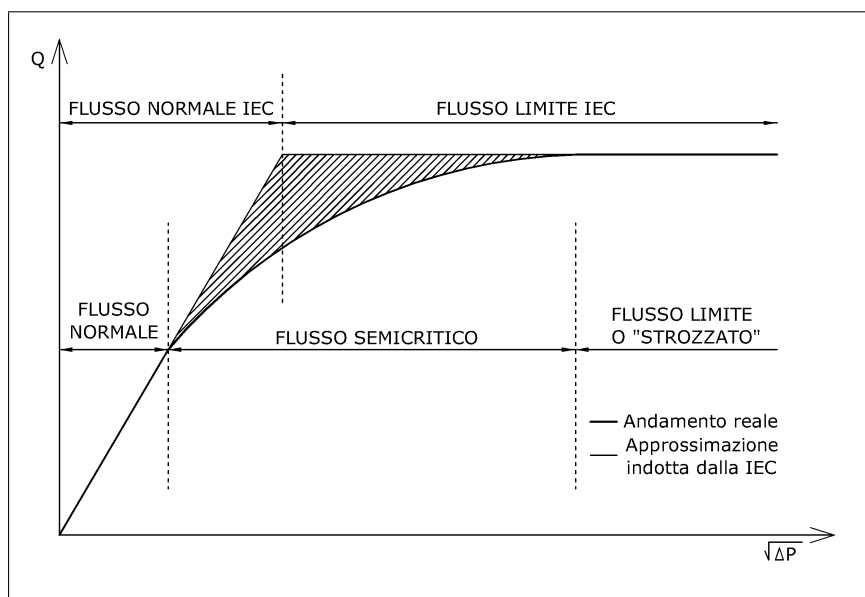


Figura 2.3: Andamento qualitativo della portata di un fluido incomprimibile transigente attraverso una generica valvola, al variare della pressione di valle mantenendo costanti le condizioni di monte

Nelle pagine che seguono ci si riferirà al coefficiente C_V , maggiormente utilizzato.

Il coefficiente di flusso è una funzione monotona non decrescente della corsa relativa dell'otturatore: C_V , infatti, assume valore minimo $C_{V,min}$ e massimo $C_{V,max}$ quando l'otturatore si trova, rispettivamente, in posizione di chiusura e in posizione di completa apertura. Generalmente, parlando di coefficiente di flusso di una valvola, si intende quello relativo alla posizione di massima apertura.

Dallo studio dell'andamento tipico della portata di un fluido incomprimibile transigente attraverso una valvola in funzione della radice quadrata della pressione differenziale, con condizioni di monte costanti (figura 2.3), è possibile definire equazioni di dimensionamento che consentono di determinare il valore dei coefficienti caratteristici della valvola.

Esaminando la curva si nota che si possono distinguere tre zone:

- una prima zona, di *flusso normale*, caratterizzata dalla proporzionalità perfetta tra portata e $\sqrt{\Delta p}$. Tale condizione di flusso si realizza finché la pressione assoluta nella vena contratta p_{vc} è maggiore della pressione assoluta di vaporizzazione del liquido alla temperatura di ingresso nella valvola stessa p_v .
- una seconda zona, di *flusso semi-critico*, in cui la portata aumenta ancora al crescere della caduta di pressione, ma meno che proporzio-

nalmente rispetto alla $\sqrt{\Delta p}$. In questa zona la capacità della valvola di convertire in portata l'incremento della caduta di pressione si riduce per effetto dell'evaporazione che avviene in seno al fluido e della conseguente cavitazione.

- una terza zona, di *flusso limite* caratterizzata dal fatto che la portata resta costante nonostante l'ulteriore incremento della $\sqrt{\Delta p}$. Significa che in vena contratta si sono raggiunte le condizioni di massima evaporazione.

Le equazioni di dimensionamento, indicate nella norma IEC 60534-2-1 [5], operano un'approssimazione, evidenziata dalla zona tratteggiata della figura 2.3, trascurando la zona di flusso semicritico. L'approssimazione introdotta è giustificata dalla ricerca di una maggiore semplicità e dal fatto che, nella pratica, non è importante descrivere con precisione la diminuzione dell'incremento di portata nella zona tratteggiata. Tra l'altro, per la maggioranza delle applicazioni, tale zona di funzionamento è, per quanto possibile, da evitare in quanto sempre associata a problemi di vibrazione, di rumore e danneggiamenti meccanici legati alla cavitazione.

Altro parametro importante nella caratterizzazione delle valvole è il coefficiente di recupero F_L : questo parametro indica la capacità di una valvola di riconvertire l'energia cinetica posseduta dal fluido in vena contratta in energia meccanica di pressione. Nella vena contratta che si forma a valle della valvola, infatti, la pressione del fluido è minima, mentre è massima l'energia cinetica; nel tratto successivo si registra una diminuzione dell'energia cinetica, che viene convertita in energia di pressione (si verifica quindi un aumento della pressione). In generale il coefficiente di recupero F_L non dipende dalle proprietà del fluido, ma solo dalla geometria interna della valvola.

Il coefficiente di recupero può essere espresso come segue:

$$F_L = \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{P_1 - p_{vc}}} \quad (2.3)$$

dove P_1 e P_2 rappresentano rispettivamente le pressioni a monte e a valle della valvola, mentre p_{vc} è quella della vena contratta.

Quando un liquido passa attraverso un'area a sezione ridotta, come ad esempio una valvola di regolazione, la velocità aumenta al massimo e la pressione diminuisce al minimo. Quando il flusso supera la restrizione, la velocità torna al valore originale, mentre la pressione è ripristinata solo parzialmente, creando una pressione differenziale nell'apparecchiatura. Esiste un punto nel percorso del flusso in cui si crea la cosiddetta "vena contratta", in cui l'area di flusso e la pressione sono al valore minimo e la velocità è al valore massimo.

Poiché p_{vc} è sempre minore, o al limite pari a P_2 , F_L è sempre minore o uguale a 1. Tanto più è basso tale coefficiente tanto maggiore è l'attitudine

della valvola a riconvertire l'energia cinetica in energia di pressione (valvola ad alto recupero). Tanto più tale coefficiente è alto (prossimo a 1), tanto maggiore è l'attitudine della valvola a dissipare l'energia in attrito, anziché per vortici, con conseguente minor riconversione dell'energia cinetica in energia di pressione (valvola a basso recupero).

E' importante notare che finché la pressione in vena contratta p_{vc} rimane superiore alla pressione di saturazione p_v del fluido in ingresso, l'influenza del coefficiente di recupero F_L è praticamente nulla; assume invece un'importanza determinante quando ci si avvicina alla condizione di possibile cavitazione, che può essere evitata o meno a seconda che si selezioni una valvola ad alto o a basso recupero.

Poiché non è agevole rilevare con la necessaria precisione la pressione in vena contratta, il coefficiente di recupero viene determinato in condizioni critiche, ossia quando si verifica che una diminuzione della pressione a valle della valvola (e quindi un aumento della perdita di carico) non comporta più un aumento della portata del flusso; quest'ultima, in queste condizioni, viene assunta come Q_{max} .

Partendo, quindi, dalle equazioni 2.1 e 2.3 si ricava la seguente equazione:

$$Q = F_L \cdot C_V \cdot \sqrt{\frac{P_1 - p_{vc}}{SG}}$$

Si introduce ora un altro coefficiente, F_F , che rappresenta il rapporto tra la pressione apparente in vena contratta nelle condizioni di flusso di saturazione o limite e la pressione di vaporizzazione del fluido alla temperatura di ingresso.

$$F_F = \frac{p_{vc}}{p_v}$$

Siccome p_{vc} dipende dalla pressione di saturazione si può scrivere

$$p_{vc} = F_F \cdot p_v$$

Data la condizione per cui viene definito il coefficiente F_F , la portata Q assume il valore di Q_{max} e il coefficiente di recupero F_L si può ricavare con la seguente formula:

$$F_L = \frac{Q_{max}}{C_v} \cdot \sqrt{\frac{SG}{P_1 - F_F \cdot p_v}}$$

Considerando infine la portata in $l s^{-1}$ e la pressione in bar, è necessario riscrivere la formula utilizzando un fattore correttivo:

$$F_L = \frac{Q_{max}}{0,865 \cdot C_v} \cdot \sqrt{\frac{SG}{P_1 - F_F \cdot p_v}} \quad (2.4)$$

Facendo l'ipotesi che il fluido nelle condizioni di saturazione sia un liquido finemente disperso nel suo vapore, con una velocità unica per i due stati fisici in equilibrio termodinamico tra di loro, per la determinazione di F_F si può utilizzare la seguente espressione:

$$F_F = 0,96 - 0,28\sqrt{\frac{p_v}{221,2}} \quad (2.5)$$

Un fenomeno molto importante da tenere in considerazione quando si lavora con valvole, ma non solo, è la cavitazione.

La cavitazione è un fenomeno fisico che riguarda esclusivamente i liquidi, consiste nella formazione di bolle di vapore all'interno del fluido che poi implodono producendo un rumore caratteristico.

In riferimento al grafico 2.3 lo strozzamento del flusso, che si verifica quando si interrompe il normale rapporto tra flusso e aumento della caduta di pressione, si può verificare proprio come risultato della cavitazione.

Quando ci si trova nelle condizioni di vena contratta a causa del passaggio del fluido attraverso un'area a sezione ridotta, la pressione locale può scendere ad un valore pari o inferiore alla pressione di vapore del liquido, formando cavità di vapore. Dopo la vena contratta la pressione del liquido torna ad un valore pari o inferiore a quello della pressione di valle e, se questa è superiore alla pressione di vapore, le cavità di vapore collassano.

La dinamica del processo è molto simile a quella dell'ebollizione. La principale differenza tra cavitazione e ebollizione è che nell'ebollizione, a causa dell'aumento di temperatura, la tensione di vapore sale fino a superare la pressione del liquido, creando quindi una bolla meccanicamente stabile, perché piena di vapore alla stessa pressione del liquido circostante. Nella cavitazione, invece, è la pressione del liquido a scendere improvvisamente, mentre la temperatura e la pressione di vapore restano costanti. Questo è il motivo per cui la bolla creatasi per cavitazione resiste solo finché non esce dalla zona di bassa pressione idrostatica: appena ritorna in una zona del fluido in quiete, la pressione di vapore non è sufficiente a contrastare la pressione idrostatica e la bolla da cavitazione implode immediatamente.

In genere la cavitazione è un fenomeno indesiderato e fonte di problemi: non solo le valvole, ma sono innumerevoli i dispositivi per cui la cavitazione provoca una notevole perdita di efficienza, emissione di rumore e danneggiamento dei componenti. Il collasso delle bolle da cavitazione, infatti, genera una grande quantità di rumore e un urto meccanico molto intenso, ma può anche condurre ad un attacco chimico selettivo alla superficie del materiale.

Alla luce delle indicazioni fornite, risulta chiaro che è molto importante, quando si lavora con una valvola, conoscere le condizioni per cui si verifica il fenomeno della cavitazione: per questo motivo è definito un coefficiente caratteristico, σ , che permette di stabilire quando il fenomeno inizia a ve-

rificarsi e lo stato di avanzamento dello stesso. Tale coefficiente si calcola utilizzando la seguente formula:

$$\sigma = \frac{P_1 - p_v}{P_1 - P_2} \quad (2.6)$$

A volte il limite operativo di certe valvole viene considerato in corrispondenza delle condizioni per cui è possibile determinare il coefficiente di recupero F_L mediante la formula 2.4. In realtà, se una valvola viene azionata in tali condizioni, nella corrente si è già formato del vapore e sussiste un livello significativo di cavitazione. Ne consegue che la condizione per cui la portata circolante è pari a Q_{max} non può essere considerata come indicatrice del limite operativo della valvola (fanno eccezione alcune valvole appositamente progettate).

E' importante precisare, però, che l'indice σ permette di distinguere le varie fasi della cavitazione, ma non fornisce alcuna informazione circa le prestazioni di una valvola per una determinata applicazione ad un determinato livello di cavitazione (diverse valvole, infatti, possono tollerare diversi livelli di cavitazione).

I valori caratteristici del coefficiente σ dipendono dal tipo di applicazione e di valvola utilizzata. La normativa ISA-RP75.23-1995 [7] definisce 4 livelli di cavitazione.

- *Incipient cavitation*: rappresenta la prima fase della cavitazione, dove cominciano a formarsi piccole bolle di vapore. E' identificata dal coefficiente σ_i .
- *Constant cavitation*: questa fase è caratterizzata da un rumore che può essere udito e rilevato mediante la misura delle vibrazioni. E' identificata dal coefficiente σ_c .
- *Incipient damage*: a questo punto la cavitazione è sufficiente da creare i primi danni.
- *Choking cavitation*: in questa fase la formazione di vapore è tale da limitare la velocità del flusso attraverso la valvola ad un valore massimo (figura 2.3). Un ulteriore aumento di portata è possibile solo aumentando la pressione d'ingresso della valvola.
- *Maximum vibration cavitation*: durante questa fase si registrano i valori di picco di vibrazione. E' identificata dal coefficiente σ_{mv} .

In figura 2.4 è riportato il legame tra il coefficiente σ e l'accelerazione del fluido su piano bilogaritmico. Le fasi sopra riportate sono individuate nel grafico da punti angolosi che separano intervalli di linearità.

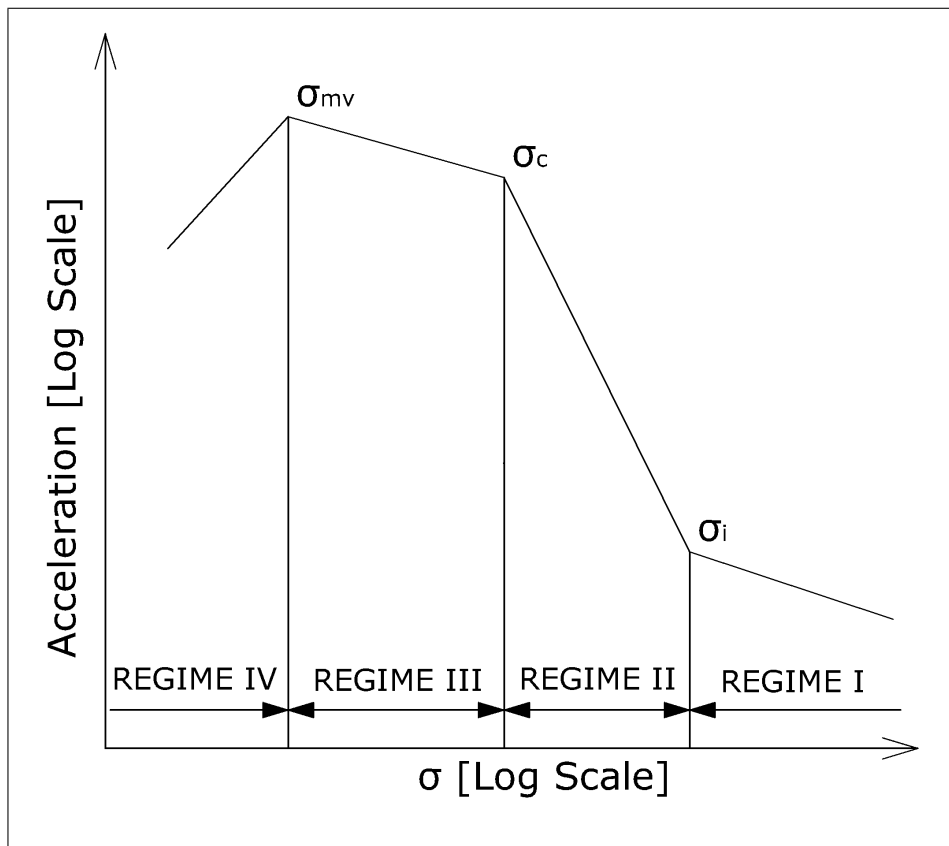


Figura 2.4: Fasi della cavitazione

2.3 Riferimenti normativi

La procedura seguita durante l'esecuzione del lavoro presentato in queste pagine si basa in larga parte su due specifiche normative americane: la ISA-RP75.23-1995, "*Considerations for Evaluating Control Valve Cavitation*"[7] e la ISA-S75.02-1996, "*Control Valve Capacity Test Procedures*"[6].

La ISA-RP75.23 detta la procedura di taratura di un impianto per testare valvole di regolazione, prescrivendo la perdita di carico di un flusso d'acqua che scorre all'interno di una condotta in pressione, attraverso un piatto forato a spigolo vivo; fornisce, inoltre, i valori dei coefficienti che caratterizzano il fenomeno della cavitazione, che si verifica a valle del piatto in suddetto impianto.

La ISA-S75.02 stabilisce la procedura per definire la capacità di una valvola di regolazione e i relativi coefficienti di flusso, sia per fluidi incomprimibili che per fluidi comprimibili, mediante l'utilizzo del medesimo impianto.

In figura 2.5 è rappresentata una schematizzazione di come deve essere realizzato un impianto di prova conforme alle normative appena citate. Queste impongono che siano presenti i seguenti dispositivi:

- L'elemento da sottoporre a test;
- La sezione di prova;
- Due valvole di regolazione, di monte e di valle, che permettano di regolare i livelli di pressione e il flusso transitante;
- Un dispositivo di misurazione del flusso transitante;
- Due prese di pressione, di monte e di valle, e relativi dispositivi di misurazione;
- Un sensore di temperatura;
- Apposita strumentazione per la rilevazione della cavitazione (accelerometro);

L'elemento da sottoporre a test può essere una qualsiasi valvola o combinazione di valvole, riduttori o altri dispositivi che necessitano di essere testati. E' però fondamentale dapprima tarare tale impianto. Il provino che è stato utilizzato è, quindi, quello definito dalla ISA-RP75.23, per cui sono noti i risultati e che permette di verificare l'idoneità dell'impianto ai test su valvole di regolazione. L'elemento in questione è un piatto con foro calibrato, dalla geometria definita (figure 2.6 e 2.7).

Per permettere una corretta giunzione tra gli elementi, il tratto di tubo a monte e a valle dell'elemento da testare deve potersi connettere correttamente con il provino stesso; nel caso specifico del piatto con foro calibrato

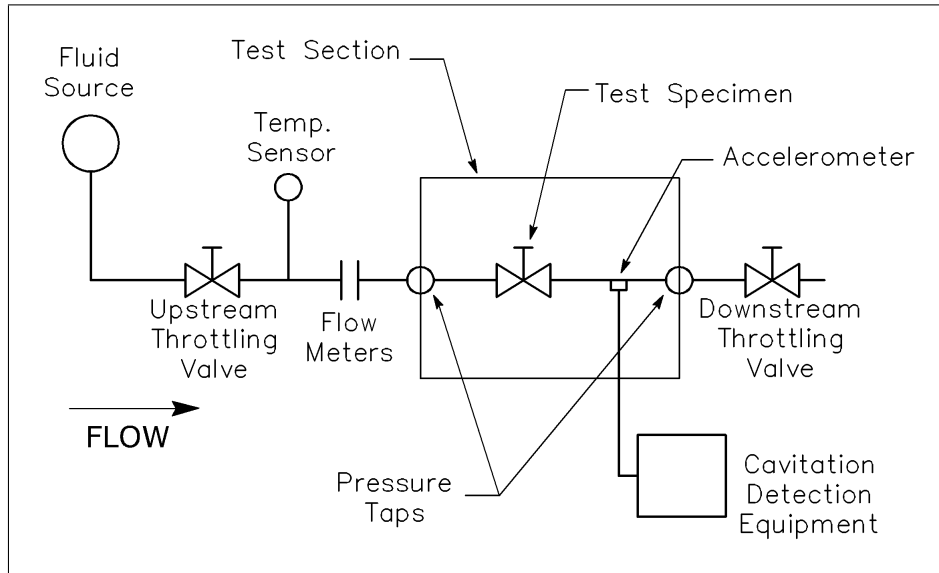


Figura 2.5: Schematizzazione dell'impianto di prova indicato dalle normative

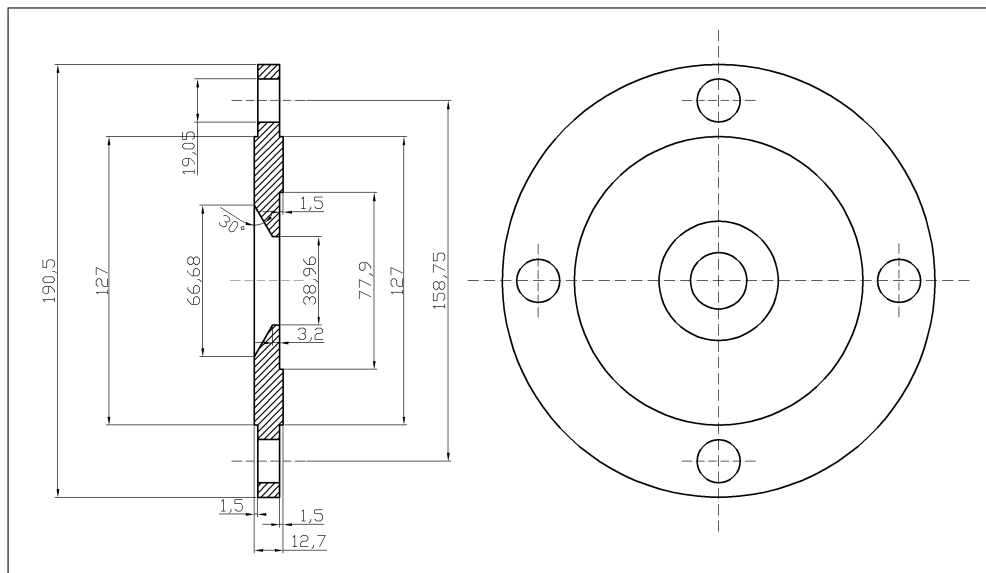


Figura 2.6: Vista in proiezione del piatto forato calibrato

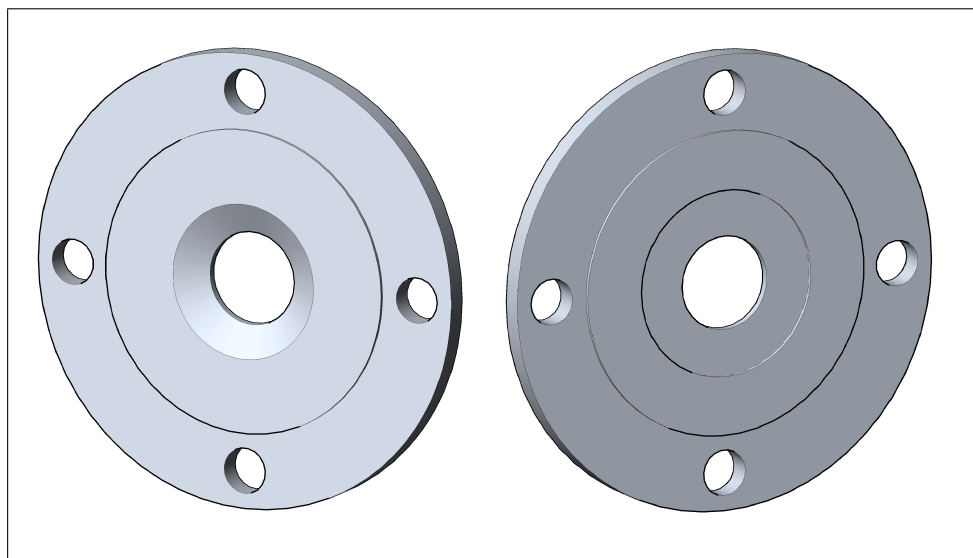


Figura 2.7: Rendering del piatto forato calibrato

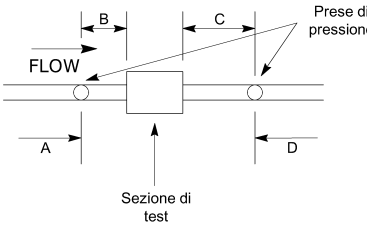
il tratto di tubo deve essere caratterizzato da un diametro pari a 3" e flange classe 150. La normativa prevede la possibilità di testare corpi valvola o altri dispositivi a una scala minore, ma una buona modellazione richiede di porre attenzione alla similitudine geometrica e a rapporti significativi quali il numero di Reynolds e il numero di Mach, importante nel caso di fluidi comprimibili.

Sempre dal punto di vista della geometria le normative impongono dei vincoli riguardo la posizione delle prese di pressione e la lunghezza dei tratti di tubazione dritta a monte e a valle delle stesse; tali vincoli sono riassunti nella tabella 2.2.

La normativa definisce alcune caratteristiche che devono possedere suddetti strumenti.

- Il misuratore di portata deve essere in grado di registrare valori che si discostino massimo del 2% rispetto al valore reale, la risoluzione e la ripetibilità delle misurazioni, inoltre, devono essere contenute nello 0,5%.
- Le misurazioni di pressione possono essere affette da un errore che non deve superare il 2% rispetto ai valori reali; la pressione a monte del provino, inoltre, deve essere mantenuta quanto più possibile costante ($\pm 5\%$).
- Gli errori relativi alle temperature rilevate non devono superare i 2 F.
- L'accelerometro deve essere posizionato perpendicolarmente all'asse del tubo a valle del provino e rigidamente connesso alla parete dello

Tabella 2.2: Configurazione della sezione di test

Lunghezza minima di tubazione dritta				Configurazione
A	B	C	D	
18*	2	6	1	
diametri	diametri	diametri	diametro	

* Tale distanza può essere ridotta a 8 diametri se è presente un raddrizzatore di flusso.

stesso. L'esatta posizione dovrebbe essere determinata iterativamente procedendo per tentativi; tuttavia, una buona soluzione è rappresentata dal suo posizionamento ad una distanza pari ad un diametro nominale del tubo a valle della connessione col provino. Sebbene non sia in questo caso richiesta una precisione elevata (5%) si consiglia, al fine di assicurare risultati coerenti con l'intero range di frequenze che devono essere analizzate ((5 - 50)kHz), l'utilizzo di un accelerometro caratterizzato da una frequenza di risonanza piuttosto alta (> 100 kHz). Per facilitare l'analisi dei dati, inoltre, è possibile utilizzare un filtro passa-alto che permetta di differenziare il rumore a bassa frequenza, dovuto dall'ambiente ed alla turbolenza del moto, dal rumore ad alta frequenza, caratteristico della cavitazione.

In base a quanto già esposto a proposito del coefficiente di flusso C_V si può notare che risulta di facile determinazione a partire dai dati acquisiti da prove sperimentali effettuate secondo le normative [7] e [6]. Nelle righe che seguono sono riportate alcune indicazioni da seguire durante l'esecuzione di tali prove.

- All'interno della sezione di test non possono essere presenti riduttori o altri dispositivi non presenti nella 2.2.
- Il numero di prove utili a definire il coefficiente di efflusso deve essere pari almeno a tre, ciascuna caratterizzata da una perdita di carico sufficientemente distanziata dalle altre, rimanendo all'interno del range in cui l'acqua permane allo stato liquido. A titolo di esempio la normativa propone tre casi:

- appena prima dell'insorgenza della cavitazione o, se questa non viene raggiunta, per la massima portata disponibile;
- nelle condizioni per cui si registra una perdita di carico pari a metà di quella rilevata nella prova precedente;
- nelle condizioni per cui si registra una perdita di carico pari a un decimo di quella rilevata nella prima prova.

- La velocità del flusso non deve superare il valore di $13,7 \text{ m s}^{-1}$.

Rispettando le condizioni fin qui esposte la normativa impone che, combinando i dati rilevati secondo la formula 2.1 di pag. 11, ormai nota, il coefficiente di flusso relativo al provino presentato sia:

$$C_V = (52 \pm 5\%) \frac{US \text{ gal}}{\min \sqrt{psi}} \quad (2.7)$$

Per quanto riguarda invece la determinazione del coefficiente di recupero F_L è necessario individuare la massima portata Q_{max} ; di seguito è riportata la procedura per rilevarla.

- Si esegue una prima prova in cui la valvola di regolazione posta a valle dell'impianto è completamente aperta; prefissata un pressione di monte, si rilevano i valori di portata e caduta di pressione.
- Si esegue una seconda prova cercando di mantenere la caduta di pressione attorno ad un valore pari al 90% di quello registrato durante la prima prova, con la stessa pressione di monte.
- Se la portata rilevata non si scosta più del 2% dal valore registrato durante la prima prova, risulta definito il valore di Q_{max} , in caso contrario la procedura deve essere ripetuta aumentando la pressione di monte.

Rispettando le condizioni fin qui esposte la normativa impone che il coefficiente di recupero relativo al provino presentato sia:

$$F_L = 0,86 \pm 5\% \quad (2.8)$$

Per determinare i coefficienti σ , caratteristici della cavitazione, è necessario che la valvola situata a valle della sezione di test sia posizionata in modo che si verifichi la condizione di cavitazione, o che comunque vi sia prossima. E' inoltre raccomandata una pressione di monte pari a 6,9 bar; in ogni caso questa deve rimanere fissa durante l'esecuzione dei test, potendo variare al massimo del 5%. Sotto tali condizioni vengono registrati i dati di pressione e accelerazione. Al fine di ottenere una maggiore precisione nel rilevamento della perdita di carico a cavallo del provino è consigliato l'uso di

un trasmettitore differenziale di pressione. E' necessario eseguire un certo numero di prove, chiudendo progressivamente la valvola di valle, in modo da diminuire la caduta di pressione a cavallo del piatto.

Una volta ricavato il valore di σ per ogni prova e la rispettiva accelerazione, tali dati devono essere riportati in un grafico bilogarithmico $Log(\sigma) - Log(Acc)$ per verificare l'andamento di figura 2.4.

Rispettando le condizioni fin qui esposte la normativa impone che i coefficienti σ_i , σ_c e σ_{mv} relativi al provino presentato siano:

$$\sigma_i = 2,7 \pm 5\% \quad (2.9)$$

$$\sigma_c = 2,3 \pm 5\% \quad (2.10)$$

$$\sigma_{mv} = 1,4 \pm 5\% \quad (2.11)$$

Capitolo 3

Apparato sperimentale

Si procede ora a descrivere gli apparati sperimentali utilizzati per effettuare i due tipi di prove introdotte, in acqua e in azoto liquido, e il programma di acquisizione dati realizzato con il software *Labview*.

Durante le prime fasi dello studio non erano ancora note le possibili condizioni operative relative alle prove in azoto, quali i valori di pressione a monte e a valle dell'impianto, le capacità dei serbatoi e il volume di azoto liquido disponibili. Queste incertezze hanno condotto alla realizzazione di altri provini che permettessero il passaggio di una portata inferiore rispetto a quella che transiterebbe utilizzando il piatto con foro calibrato.

3.1 Diaframmi da testare

I provini da testare sono stati realizzati cercando di mantenere fede alla geometria del piatto con foro calibrato: si tratta di tre piatti caratterizzati da un diametro del foro progressivamente minore.

- Piatto con foro Φ pari a 25 mm
- Piatto con foro Φ pari a 15 mm
- Piatto con foro Φ pari a 5 mm

Nelle figure 3.1 e 3.2 sono riportate le viste in proiezione e i rendering dei quattro provini da testare durante la fase sperimentale: da quello normato, con diametro del foro maggiore (39 mm), fino a quello con diametro del foro minore.

Per identificare i vari piatti nella trattazione, si utilizzerà il coefficiente β , pari al rapporto tra il diametro del foro e il diametro della tubazione:

$$\beta = \frac{d_f}{D}$$

La tabella 3.1 riporta i valori di β caratteristici di ogni piatto.

Tabella 3.1: Valori di β riferiti ai quattro piatti

D [mm]	β [-]
39	0,47
25	0,30
15	0,18
5	0,06

L'utilizzo di questi nuovi provini è giustificato dal fatto che, se si è in grado di verificare i risultati forniti dalla normativa con il piatto di riferimento, allora anche i dati risultanti dalle prove effettuate con gli altri piatti si possono considerare attendibili. Si può quindi ritenere significativo il confronto tra il comportamento dei flussi di acqua e azoto liquido anche utilizzando questi provini.

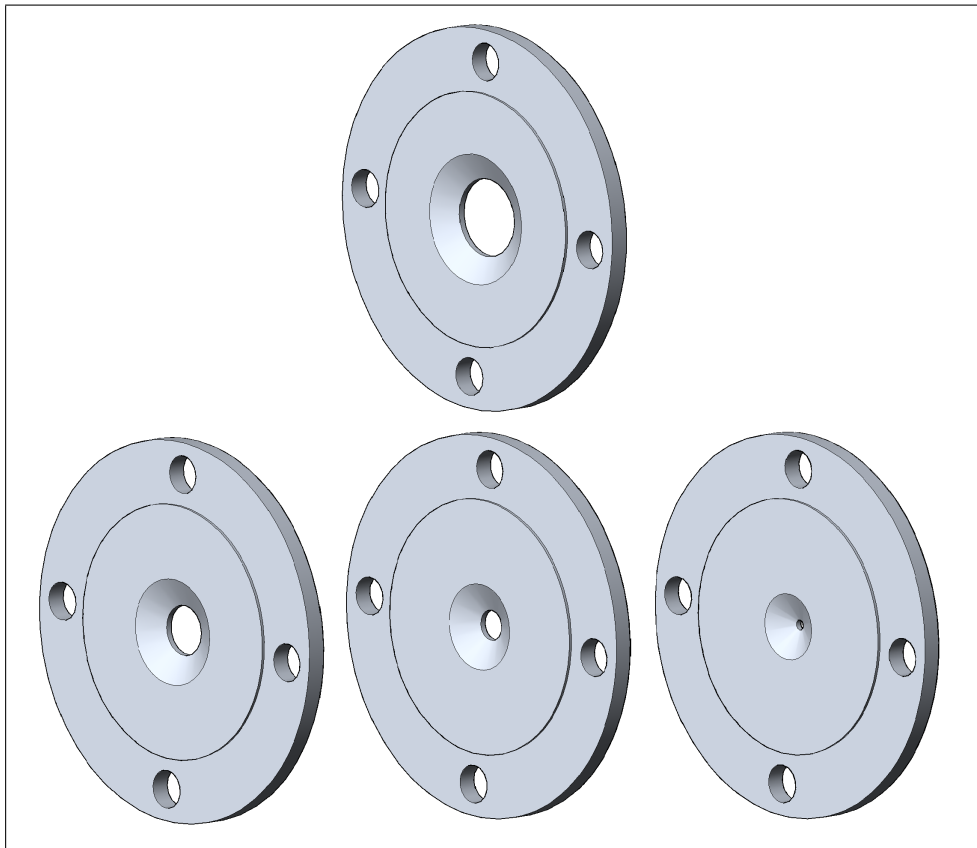


Figura 3.2: Rendering dei quattro piatti da testare

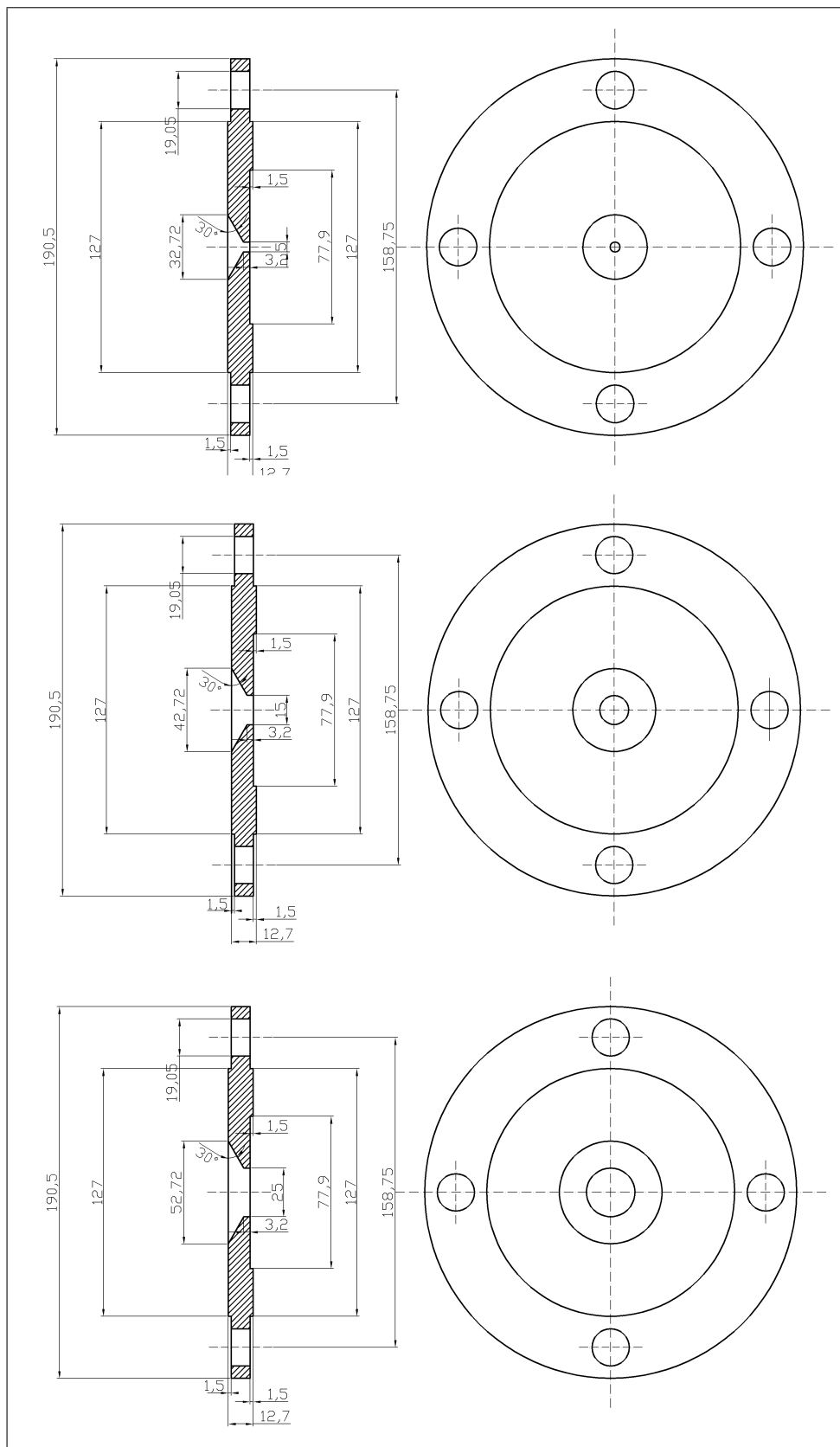


Figura 3.1: Vista in proiezione dei piatti forati

3.2 Impianto di prova per i test con acqua

L'impianto di prova utilizzato per verificare i dati si chiama *b Valve*; situato all'interno del laboratorio di Idraulica del Politecnico di Milano, si sviluppa su due piani, piano terra e piano interrato.

La figura 3.3 è una foto dell'impianto al piano terra, con indicato il verso di scorrimento dell'acqua. Si può notare la presenza dell'alimentazione dal tubo proveniente dal serbatoio a gravità e l'inizio del tubo di scarico, che termina al piano inferiore ed è mantenuto in pressione annegandolo sotto la superficie dell'acqua della vasca di scarico (a superficie libera e livello costante). L'alimentazione dell'impianto può essere effettuata per gravità, prelevando acqua da un serbatoio a superficie libera con livello d'acqua costante, situato al primo piano del laboratorio, oppure, nel caso tale sistema non sia sufficiente, tramite un gruppo pressione, che si serve di un altro serbatoio a superficie libera e livello costante. Quando è in funzione l'alimentazione a gravità il valore di pressione relativa nei tubi dell'impianto al piano terra (prima di ogni eventuale dispositivo di dissipazione) è pari a 1,2 bar.

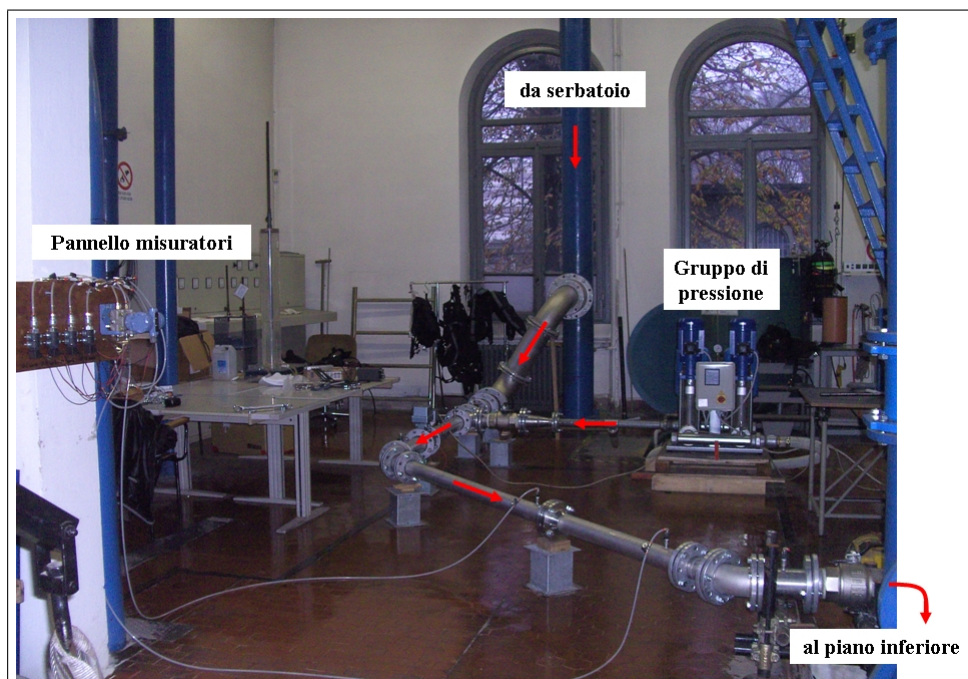


Figura 3.3: Visione generale dell'impianto

La strumentazione di misura dell'impianto *b Valve* si compone di:

- misuratore di portata magnetico Toshiba Maddalena, modello 335/379 DN100 (figura 3.4);

- trasmettitore di pressione relativa P8 (0 - 10) barG (figura 3.5);
- trasmettitore di pressione relativa P8 (0 - 2) barG (figura 3.5);
- trasmettitore di pressione assoluta P8 (0 - 10) barA (figura 3.5);
- trasmettitore di pressione assoluta P8 (0 - 2) barA (figura 3.5);
- trasduttore differenziale di pressione P-BADP con fondo scala regolabile fino a 20 bar (figura 3.5);
- accelerometro.

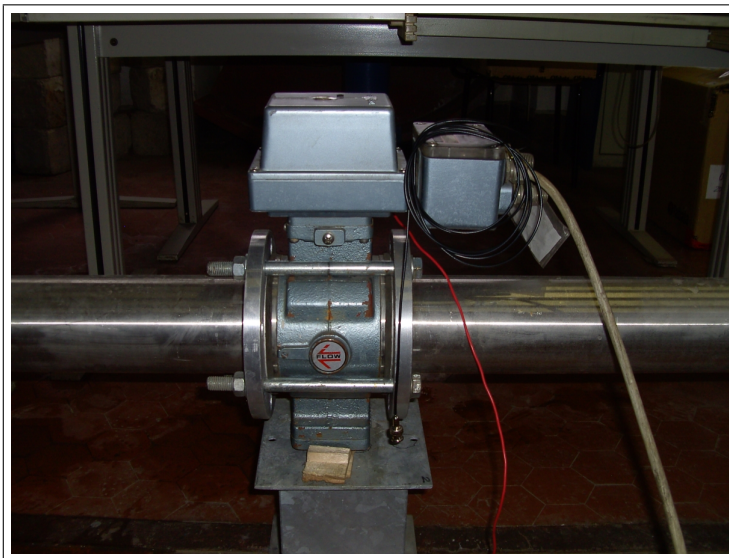


Figura 3.4: Misuratore di portata

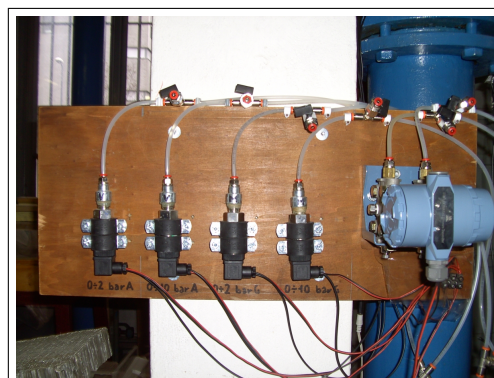


Figura 3.5: Pannello con i misuratori di pressione

Sull'impianto sono presenti quattro valvole a sfera dello stesso tipo, nelle seguenti posizioni:

- sullo snodo di alimentazione per regolare il flusso in arrivo dal gruppo pressione (figura 3.6);
- sullo snodo di alimentazione per regolare il flusso in arrivo dal sistema a gravità (figura 3.6);
- a valle del dispositivo di test;
- prima dello scarico.



(a) Valvole sullo snodo di alimentazione



(b) Valvola a valle della sezione di test

Figura 3.6: Principali valvole dell'impianto

L'impianto è costituito per la quasi totalità in acciaio inox AISI 304. La linea fissa dell'impianto ha un diametro pari 4", è poi presente una parte variabile rappresentante la sezione di test che, per questo specifico caso di studio, ha un diametro di 3". Ovviamente, a monte e a valle della sezione di test sono presenti un convergente e un divergente per connettere i tronchi di tubo con diverso diametro.

Tale impianto, quindi, è predisposto per eseguire le prove in questione.

3.3 Impianto di prova per i test con azoto liquido

Come già riportato, l'impianto di prova per i test che prevedono azoto liquido come fluido di riferimento è stato realizzato appositamente per questo scopo dall'azienda *Fema* di Busto Arsizio ed è situato presso l'azienda *DIEFFE* di Cesano Maderno, dove si sono svolte le prove.

3.3.1 L'impianto di prova

Per la realizzazione di tale impianto sono ovviamente state seguite le indicazioni riportate nella norma [7].

In figura 3.7 è riportata una visione assonometrica dell'impianto realizzato; di seguito sono descritte tutte le parti che lo compongono.

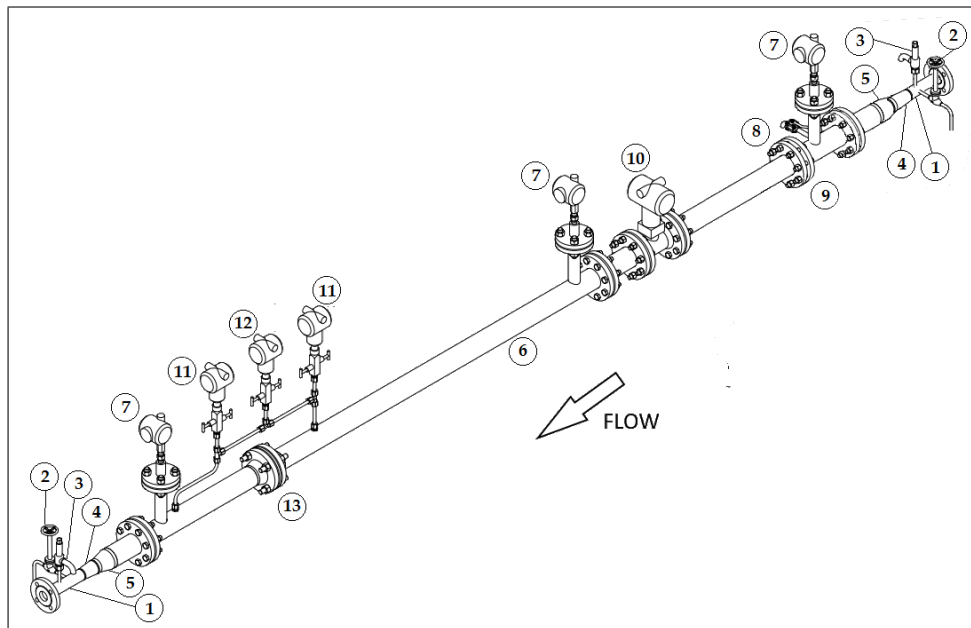


Figura 3.7: Proiezione assonometrica dell'impianto di prova

Le parti iniziale e finale sono costituite da tronchi di tubo in acciaio inossidabile, di diametro esterno pari a 48,3 mm e spessore pari a 2 mm (1). Su di esse sono installate una valvola di scarico DN8 (2) e una valvola di sicurezza (3). Per congiungere la prima e l'ultima parte con la linea principale sono stati installati, da ciascun lato, due tratti di tubo a forma tronco-conica che permettono di aumentare il diametro della tubazione nel primo tratto e di ridurlo nel tratto finale. Il primo permette che il diametro esterno aumenti fino a 60,3 mm conducendo lo spessore a 3,05 mm (4), mentre il secondo (5) aumenta ulteriormente il diametro esterno fino al diametro del tubo che costituisce la linea principale (6), pari a 88,9 mm.

Procedendo verso valle il primo strumento che si trova sulla linea principale è un trasmettitore di temperatura Yokogawa, mod. YTA-110 [21] (7); tale strumento è stato appositamente tarato in modo da misurare temperature comprese tra i $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e i $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'aumento di temperatura dell'azoto liquido rappresenta un aspetto molto importante del problema, in quanto bisogna assolutamente evitare che il flusso evapori, e quindi che si formi del gas

all'interno dell'impianto: per tenere sotto controllo questo parametro lungo la linea principale sono disposti altri due trasmettitori di temperatura.

Al fine di evitare un aumento di temperatura tale da permettere il passaggio allo stato gassoso dell'azoto, la linea principale dell'impianto è stata coibentata applicando attorno al tubo uno strato di polistirene espanso con barriera al vapore in alluminio.



Figura 3.8: Raddrizzatore di flusso

La figura 3.7 mostra la presenza, vicino al trasmettitore di temperatura, di una valvola di sfiato (8), utile per liberare l'impianto da gas situati all'interno (aria o azoto gassoso).

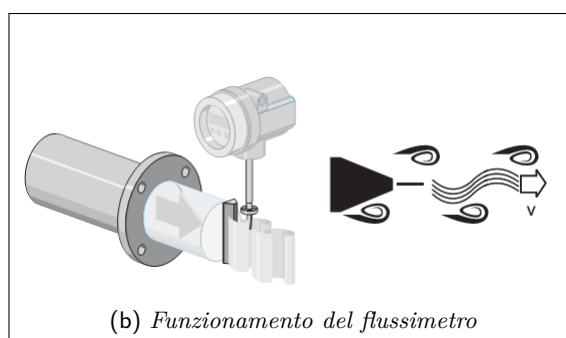
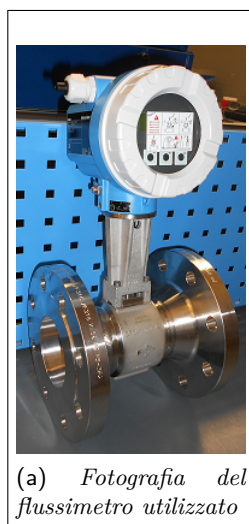


Figura 3.9: Misuratore di portata Endress Hauser

Subito a valle è presente un raddrizzatore di flusso (9) (figura 3.8), indispensabile data l'impossibilità, per questioni di spazio, di disporre dell'intero

tratto di tubazione dritta previsto [19, p. 18].

Si trova poi il misuratore di portata Endress Hauser, mod. Proline Prowirl 72F (10) [19], con fondo scala pari a $38,4 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$.

Tale strumento è caratterizzato dal funzionamento a vortici: quando un fluido scorre ed incontra una barra generatrice, si formano in alternanza dei vortici, che si distaccano da entrambi i lati con senso di rotazione opposto, ognuno dei quali genera una bassa pressione locale (figura 3.9).

Le fluttuazioni di pressione sono rilevate dal sensore e convertite in impulsi elettrici; siccome i vortici sono generati con regolarità entro i limiti applicativi del misuratore, la frequenza di generazione degli stessi è direttamente proporzionale alla portata volumetrica.

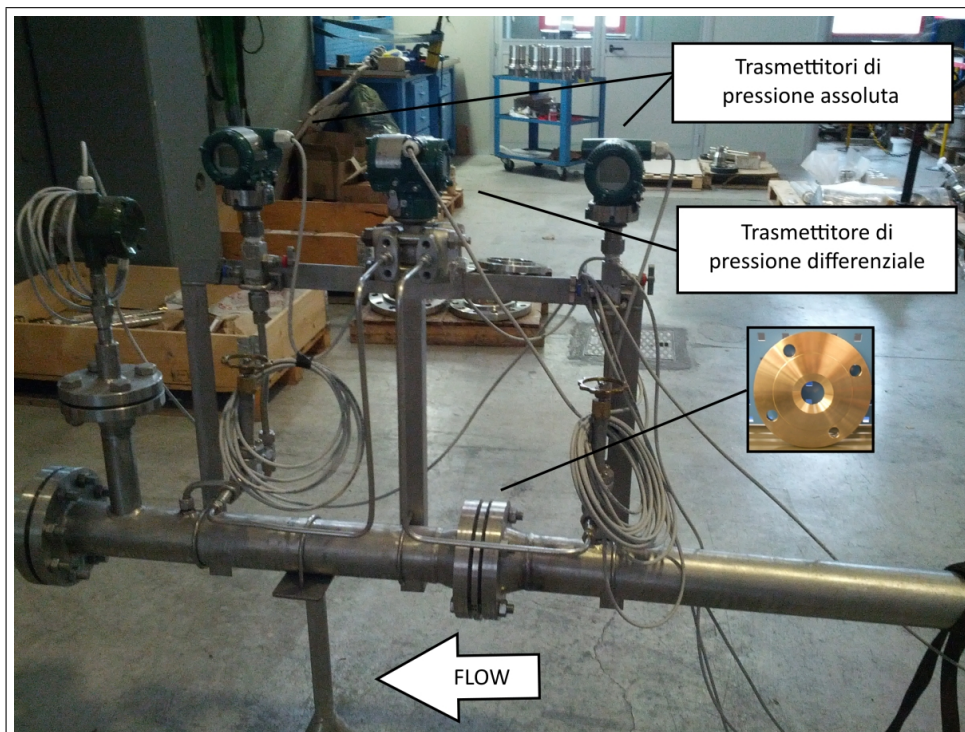


Figura 3.10: Sezione di test

Avanzando ancora verso la parte terminale dell'impianto si trova alla sezione di test (figura 3.10), questa è costituita da:

- due trasmettitori di pressione assoluta Yokogawa, mod. EJX-530A [4] (11), tarati per misurare valori di pressione assoluta compresi tra 0 bar e 16 bar;
- un trasmettitore di pressione differenziale Yokogawa, mod EJX-130A [3] (12), in grado di misurare fino a 1 bar di ΔP ;

- il piatto forato da testare (13), di cui si è già ampiamente discusso.

Sebbene non sia riportata nella rappresentazione assonometrica, nella parte terminale dell'impianto è stata installata una valvola a sfera DN40 per regolare il flusso, mostrata nella fotografia di figura 3.11.

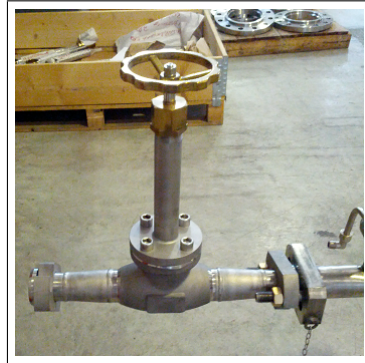


Figura 3.11: Valvola DN40 situata a valle dell'impianto

La figura 3.14 riporta una rappresentazione non in scala della linea dell'impianto, con l'indicazione delle distanze in millimetri.



Figura 3.12: Fotografia della vasca in cui si prevede di scaricare l'azoto

Come serbatoio di mandata si dispone di una cisterna di capienza pari a 10 000 l che, grazie ad una pompa, permette di immettere l'azoto liquido nell'impianto a pressione costante, regolabile fino a 14 bar. Si intende scaricare l'azoto in uscita all'interno di una vasca appositata a pelo libero tramite un tubo flessibile di diametro interno pari a 20 mm e lunghezza pari a 6 m (fotografia in figura ??).

E' stato necessario eseguire uno studio per ottenere una stima di massima del volume di azoto liquido necessario per testare i quattro provini e avere un'idea dei tempi disponibili per acquisire i dati. In questo modo è possibile disporre di un'indicazione che permetta di valutare se il volume a disposizione è sufficiente per l'esecuzione delle prove. Tale analisi è stata possibile conoscendo le condizioni di temperatura e pressione, oltre che le proprietà fisiche del fluido, in due sezioni, a monte e a valle dell'impianto. Esprimendo poi il principio di conservazione dell'energia tra le due sezioni mediante il teorema di Bernoulli e considerando le perdite di carico, è possibile risalire alla portata circolante nei diversi test. Grazie a tale studio, riportato nel dettaglio in appendice C, si può sostenere, con un certo margine di sicurezza, che il volume di azoto liquido fornito dalla cisterna è più che sufficiente per lo scopo prefissato.



Figura 3.13: Fotografia del corpo principale dell'impianto

La figura 3.13 è una fotografia del corpo principale dell'impianto coibentato.

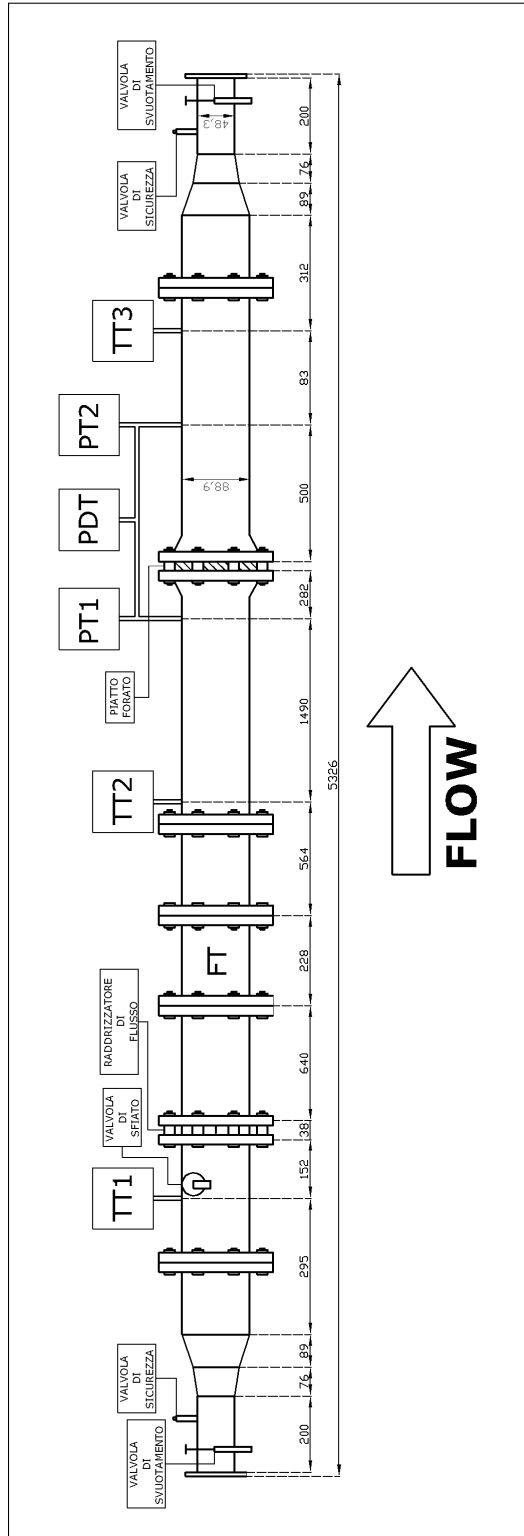


Figura 3.14: Rappresentazione quotata in mm dell'impianto

3.4 Acquisizione dei dati

L'acquisizione dati è, in generale, un processo che mira alla misurazione di un fenomeno elettrico o fisico come la tensione, la corrente, la temperatura, la pressione o il suono. La locuzione "acquisizione dati" è talvolta abbreviata in DAQ (dall'inglese *Data Acquisition*). Un sistema DAQ può essere schematizzato suddividendolo in tre componenti:

- *i sensori;*
- *un hardware di misura DAQ;*
- *un computer con software programmabile.*

Rispetto ai sistemi di misura tradizionali, i sistemi DAQ permettono di sfruttare tutte le funzioni avanzate di visualizzazione, elaborazione e connettività, offrendo una soluzione di misura efficace, flessibile e potente.

L'utilizzo di un *sensore* rappresenta il punto di partenza per la misura di un fenomeno fisico, quale la temperatura di una stanza, l'intensità di una sorgente luminosa oppure la forza applicata ad un oggetto; nel caso in questione le misure riguardano la temperatura, la pressione e la portata del flusso. Negli strumenti di misura generalmente si distinguono due componenti: il trasduttore, che converte la grandezza fisica in un segnale elettrico, ed il convertitore, che adatta il segnale elettrico del trasduttore agli standard dei segnali analogici. Nei convertitori i costruttori programmano le linearizzazioni degli errori di misura del trasduttore, le tarature ed i range di lavoro, dando all'utilizzatore finale un prodotto pronto all'uso ed accompagnato dal Certificato di Taratura. Talvolta è possibile che sia presente solamente il trasduttore, mentre la conversione e la linearizzazione del segnale sia realizzata all'interno dell'hardware di misura DAQ. Un segnale analogico è un segnale elettrico che rappresenta la misura di un fenomeno fisico e che varia entro un campo specificato, o meglio "standardizzato". I segnali analogici sono sempre in corrente continua, ed i più utilizzati sono sostanzialmente due:

- in tensione ((0 - 10) Vcc)
- in corrente ((4 - 20) mA)

Gli strumenti installati sull'impianto sono caratterizzati da segnale analogico con uscita in corrente (4 - 20) mA.

Si riporta ora una panoramica sulle differenze tra i segnali in tensione e quelli in corrente, dalla quale si evince come quelli in corrente siano più completi e sicuri.

I segnali in tensione sono più semplici da utilizzare, con costo inferiore dei dispositivi che li devono gestire; per contro, possono percorrere pochi metri e sono facilmente disturbabili da campi elettromagnetici, transitori ed

altri disturbi elettrici, quali quelli irradiati dagli inverter. Un uso tipico è negli impianti di riscaldamento e condizionamento, dove i sensori con segnali analogici sono posti a pochi metri dalle centraline di controllo, e quindi le metrature dei cavi sono limitate a 15/20 metri, e dove tipicamente non vi sono disturbi elettromagnetici rilevanti. Per cautelarsi da eventuali disturbi è necessario ricorrere all'uso di cavi schermati.

Altri segnali analogici in tensione sono (0 - 1) V, (0 - 5) V e ± 10 V.

I segnali in corrente, e nello specifico la gamma (4 - 20) mA, sono i più utilizzati per la trasmissione di misure analogiche.

Le caratteristiche salienti sono:

- elevata immunità a disturbi elettromagnetici provenienti da circuiti circostanti (anche se il cavo non è schermato);
- flessibilità elevata nel range di alimentazione (ad esempio da 12 a 30 Vdc, anche se tipicamente si usa una tensione di 24 Vdc);
- buona tolleranza alle fluttuazioni nella tensione di alimentazione;
- stabilità del segnale molto più elevata che quella in tensione;
- possibilità di compiere tratte molto lunghe (anche 200 o 300 metri) senza bisogno di alcun particolare accorgimento;
- possibilità di determinare un guasto al cavo o al sensore (quando il segnale è inferiore a 4 mA);
- possibilità di alimentare lo strumento di misura con lo stesso segnale, risparmiando sul lavoro di cablaggio e sui cavi.

Riguardo l'ultimo punto, la scheda di acquisizione utilizzata non permette ciò, quindi è stato necessario predisporre un alimentatore per gli strumenti.

L'*hardware DAQ* agisce da interfaccia tra il computer e i segnali del mondo esterno. Funziona come un sistema che digitalizza i segnali analogici in entrata in modo che il computer possa interpretarli. I tre componenti fondamentali di un dispositivo DAQ utilizzati per la misura di un segnale sono riportati di seguito.

- *Il circuito di condizionamento del segnale.* I circuiti che provengono dai sensori potrebbero essere troppo rumorosi o pericolosi da misurare direttamente. Il circuito di condizionamento del segnale gestisce un segnale in modo da poterlo adattare per l'ingresso in un ADC. Questo circuito può includere amplificazione, attenuazione, filtri e isolamento.
- *Un ADC (analog-to-digital converter).* I segnali analogici dei sensori devono essere convertiti in digitali prima di poter essere manipolati

dai dispositivi digitali, come, ad esempio, un computer. Un ADC è un chip che fornisce una rappresentazione di un segnale analogico in un determinato momento. In pratica, i segnali analogici variano continuamente nel tempo e un ADC acquisisce "campionamenti" periodici del segnale ad un intervallo predefinito. Le caratteristiche salienti di un ADC sono la velocità di conversione, tipicamente compresa tra i 20 e i 60 Hz, e la risoluzione espressa in bit, che rappresenta la precisione del convertitore (un buon convertitore è costituito da un'uscita a 14 bit).

- *Un bus computer.* I campionamenti acquisiti dal convertitore vengono poi trasferiti ad un computer attraverso un bus computer; esso funziona da interfaccia di comunicazione tra il dispositivo DAQ e il computer per il trasferimento delle istruzioni e dei dati misurati.

Per l'acquisizione dei dati del caso in esame viene utilizzato un sistema *NI CompactDAQ*, ossia una piattaforma di acquisizione dati che include connettore del segnale, condizionamento del segnale e convertitori analogico-digitale in un singolo pacchetto, riducendo l'impiego di cavi e il numero di componenti che altrimenti provocherebbero rumore o eventuali errori di sistema. L'utilizzo di software flessibili di NI, come *LabView*, semplificano l'utilizzo di *NI CompactDAQ* per applicazioni semplici o per sviluppare un sistema completo di controllo e di test automatizzato. La progettazione modulare permette di misurare fino a 256 canali di segnali elettrici, fisici, meccanici o acustici in un singolo sistema. Inoltre, gli ADC presenti in ogni modulo e i moduli isolati individualmente assicurano misure veloci, accurate e sicure. Il sistema utilizzato consiste in:

- *NI cDAQ-9174*, uno chassis *NI CompactDAQ USB* a 4 slot che ben si adatta a sistemi di test a misure miste portatili e di dimensioni ridotte [**chassis**];
- *NI 9203*, un modulo di acquisizione dati con otto canali (a fronte dei sette strumenti di misura installati) di input analogico in corrente per il controllo e monitoraggio di applicazioni a prestazioni avanzate. *NI9203* è caratterizzato da intervalli di input programmabili da ± 20 mA o da 0 a 20 mA, risoluzione a 16 bit e una frequenza massima di campionamento di 200 kS/s [**scheda**].

Un *computer con software programmabile* permette di controllare il funzionamento dei dispositivi DAQ per la visualizzazione, l'elaborazione e la memorizzazione dei dati di misura. L'ambiente di sviluppo utilizzato per programmare il software è *LabVIEW* (abbreviazione di *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) della National Instrument.

In figura 3.15 sono riportati i collegamenti elettrici necessari per l'alimentazione degli strumenti e per la trasmissione dei segnali al sistema di acquisizione.

Definita sia la parte meccanica che quella elettrica, è possibile rappresentare il P&ID dell'impianto. Il P&ID (o *Piping and Instrumentation Diagram*) è un disegno che mostra le interconnessioni tra le apparecchiature di un processo, il sistema delle tubazioni e la strumentazione utilizzata per il controllo del processo stesso. Genericamente in un P&ID vengono rappresentati:

- strumentazione di controllo, con relativa identificazione;
- apparecchiature meccaniche, con relativa identificazione;
- tutte le valvole del processo, con relativa identificazione;
- tubazioni, con indicate le dimensioni e relativa identificazione;
- spurghi, drenaggi, linee per campionamento, raccorderia;
- direzione dei flussi di massa;
- interconnessioni tra i sistemi.

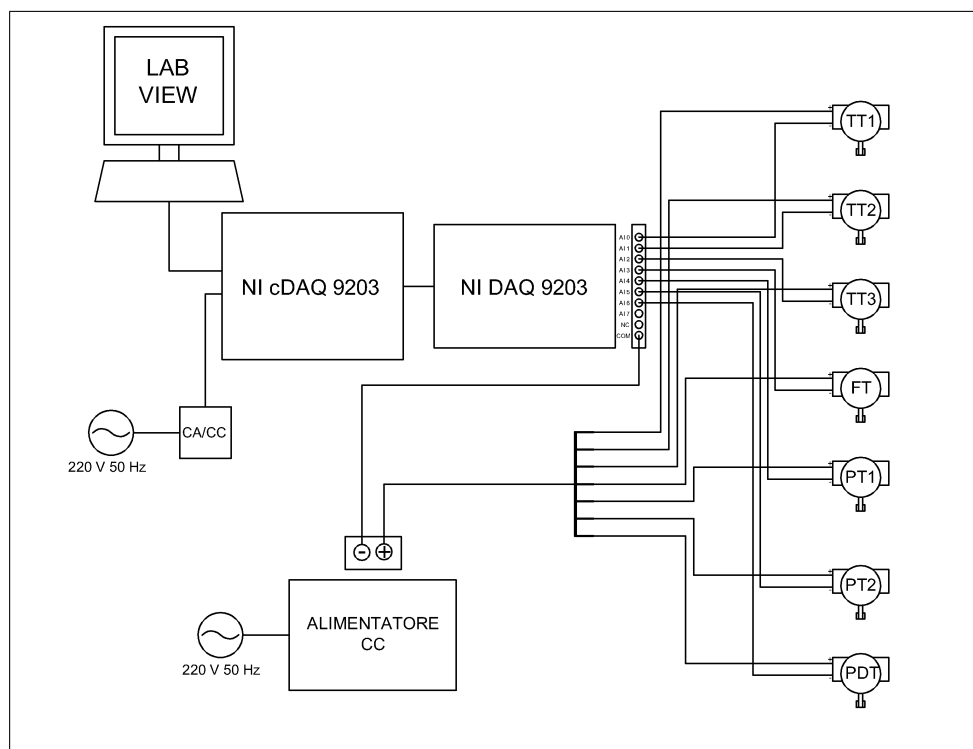


Figura 3.15: Schema del cablaggio per alimentare gli strumenti e permettere la trasmissione dei segnali all'elaboratore

La figura 3.16 riporta il P&ID dell'impianto, comprensivo di parte meccanica e elettrica.

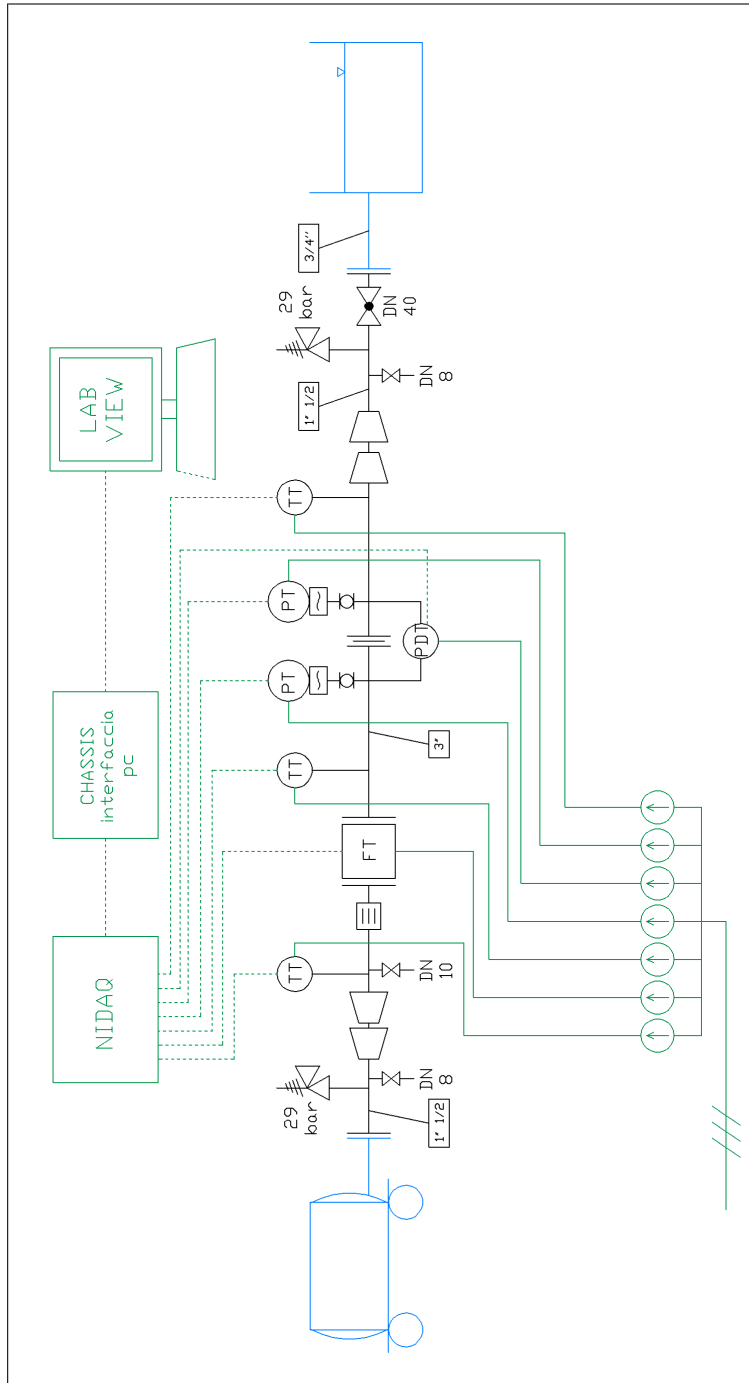


Figura 3.16: PID dell'impianto

3.4.1 L'ambiente di sviluppo LabView

LabView é l'ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio di programmazione visuale della National Instruments. Nato nel 1986 per rispondere alla necessità di disporre di un software grafico per testare rapidamente gli apparati hardware prodotti internamente, è ora diventato uno strumento molto diffuso in un'ampia gamma di applicazioni, quali:

- acquisizione, analisi, visualizzazione, elaborazione, memorizzazione di segnali e dati;
- gestione di strumentazione elettronica;
- simulazione ed emulazione di sistemi fisici.

LabView [10] si presenta come un ambiente di programmazione grafico, che consente di realizzare i programmi in forma di *Block Diagram*, per questa ragione è battezzato G-language (Graphic Language). La notevole diffusione di questo ambiente è dovuta principalmente alla moltitudine di applicazioni che permette di realizzare e alla velocità di esecuzione, simile ai più noti linguaggi di programmazione, che però richiedono tempi di apprendimento relativamente lunghi e uno sforzo mnemonico solitamente non trascurabile.

La semplicità di programmazione (intuitiva in quanto modellata sulla logica di un flow chart), di utilizzo (l'utente finale dispone di una strumentazione virtuale disegnata a schermo) e la grande versatilità hanno contribuito a rendere LabView molto impiegato e diffuso nell'ambito dell'acquisizione dei dati e nel loro controllo nei processi industriali.

I programmi realizzati in LabView prendono il nome di VI (*Virtual Instrument*) poiché nell'aspetto e nel funzionamento sono simili a strumenti fisici. Un VI non è un codice sotto forma di testo, bensì un file binario visualizzabile e compilabile solo da LabView.

I VI sono formati principalmente da due parti:

- Front Panel (pannello frontale);
- Block Diagram (diagramma a blocchi);

Il Front Panel rappresenta l'interfaccia che utilizza l'utente finale; si realizza con controlli e indicatori, che costituiscono rispettivamente i terminali interattivi d'ingresso e di uscita. I controlli sono composti da manopole, pulsanti, interruttori, ecc. che simulano i dispositivi d'ingresso degli strumenti di misura e forniscono dati al Block Diagram. Gli indicatori, invece, sono in genere LED, grafici, tabelle, termometri, ecc. che simulano i dispositivi d'uscita degli strumenti e visualizzano i dati che il Block Diagram acquisisce o genera.

Il Block Diagram è il diagramma di flusso che rappresenta il codice sorgente in formato grafico. Gli oggetti utilizzati nel Front Panel appaiono

come terminali, ovvero porte di ingresso e di uscita che scambiano informazioni tra i due "livelli" e sono del tutto analoghi alle variabili dei linguaggi di programmazione testuali.

Essendo un ambiente di programmazione prettamente grafico, LabView mette a disposizione un'ampia gamma di tipologie di dati, associate a specifici colori, così come lo sono anche i collegamenti che permettono di unire oggetti e funzioni che operano con dati dello stesso genere. E' anche possibile realizzare diversi tipi di strutture (cicli for, while, if/else, ecc.), esattamente come avviene con i linguaggi di programmazione testuali.

Le caratteristiche e le funzioni che LabView permette di utilizzare verranno presentate più nel dettaglio nel capitolo 3.4.2, relativo alla realizzazione del software di acquisizione.

3.4.2 Realizzazione del software di acquisizione dati

Nel seguente capitolo verranno descritti i passaggi che hanno condotto alla realizzazione del software di acquisizione e l'interfaccia che ne risulta. Come già detto, la programmazione vera e propria avviene all'interno del Block Diagram, tramite particolari icone caratterizzate da determinate funzioni e collegamenti.

Una volta effettuati tutti i collegamenti riportati in figura 3.15, la prima operazione consiste nel permettere a LabView di riconoscere la scheda di acquisizione e i tipi di segnali che trasmette. Questa è la parte più importante, in quanto riguarda la vera e propria acquisizione dei dati; la restante parte del programma è invece mirata ad una più agevole lettura e interpretazione degli stessi nel momento in cui vengono acquisiti. L'immagine 3.17 riporta l'icona utilizzata per tale scopo.

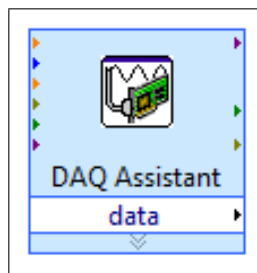


Figura 3.17: Icona per la creazione di un *task* associato alla scheda

Questa icona permette di creare e personalizzare un *task* collegato alla scheda di acquisizione. Un *task* consiste in un insieme di uno o più canali virtuali a cui è possibile assegnare determinate caratteristiche, come mostrato nella schermata di figura 3.18.

Le informazioni che vengono richieste per inizializzare un nuovo *task* sono il tipo di misurazioni e il numero e la definizione dei canali della scheda

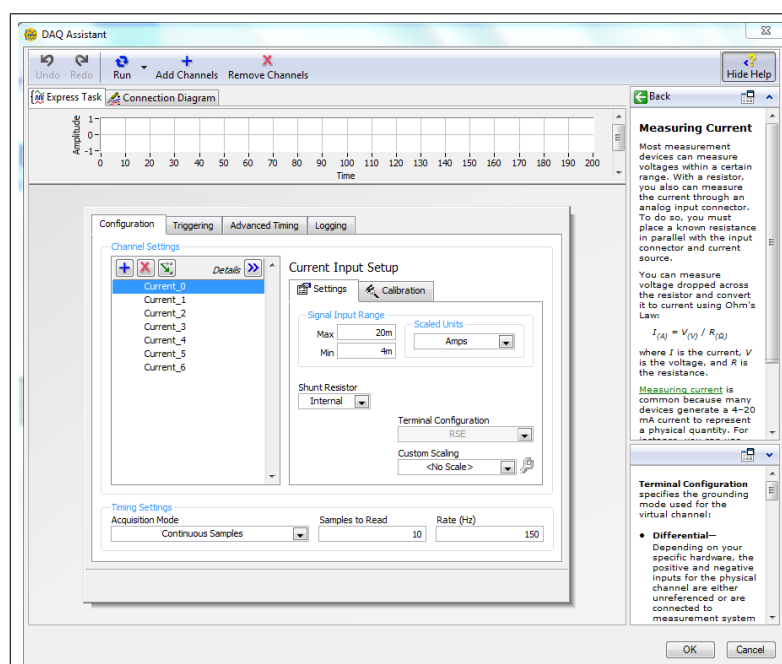


Figura 3.18: Schermata per la definizione delle proprietà del *task*

di acquisizione che vengono utilizzati. Per questo caso specifico è necessario specificare che l'acquisizione riguarda sette segnali analogici in corrente, quindi i canali occupati sono sette sugli otto disponibili dalla scheda.

Le altre proprietà del *task* sono definibili in qualunque momento e riguardano (si veda la figura 3.18) il tipo di acquisizione (continua) il range del segnale (4 - 20 mA), la frequenza di acquisizione dei dati (settata a 150 Hz) e il numero di campioni da acquisire di volta in volta, prima di venire riprodotti all'interno del programma (impostato pari a 10 per permettere una certa fluidità nella loro rappresentazione).

L'utilità della creazione di *task* riguarda soprattutto la possibilità di definirne diversi, per poi sceglierne uno da associare alla scheda di acquisizione. Questo è molto utile nel caso, ad esempio, in cui una medesima scheda di acquisizione deve essere utilizzata per più applicazioni che utilizzano strumenti diversi.

Per questa applicazione è necessario che l'icona di figura 3.18 sia inserita all'interno di un ciclo *while*; in questo modo i dati vengono acquisiti in continuo finché il programma non viene fermato mediante un pulsante creato appositamente.

L'operazione che deve immediatamente seguire l'acquisizione dei dati è il loro salvataggio, in modo che tutti i segnali vengano archiviati in memoria e possano essere utilizzati per l'elaborazione a posteriori.

Questa operazione è possibile utilizzando l'icona di figura 3.19: questa

funzione permette di impostare il percorso di salvataggio desiderato. Questo viene eseguito nel formato TDMS, che incorpora, ai dati acquisiti, informazioni descrittive relative al campionamento. Per questa applicazione il salvataggio è regolato, sul Front Panel, da un apposito pulsante accompagnato da un LED che indica l'effettiva registrazione dei segnali (fig. 3.20.)

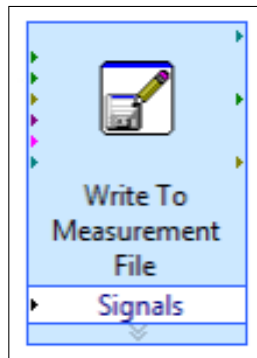


Figura 3.19: Icona per il salvataggio dei dati

Le figure 3.20 riportano la parte del Block Diagram e del Front Panel finora illustrata. Si noti che il segnale trasmesso viene suddiviso nei sette segnali distinti provenienti dai sette strumenti installati sull'impianto, nell'ordine sono: le tre sonde di temperatura, il flussimetro, due trasmettitori di pressione e uno di pressione differenziale.

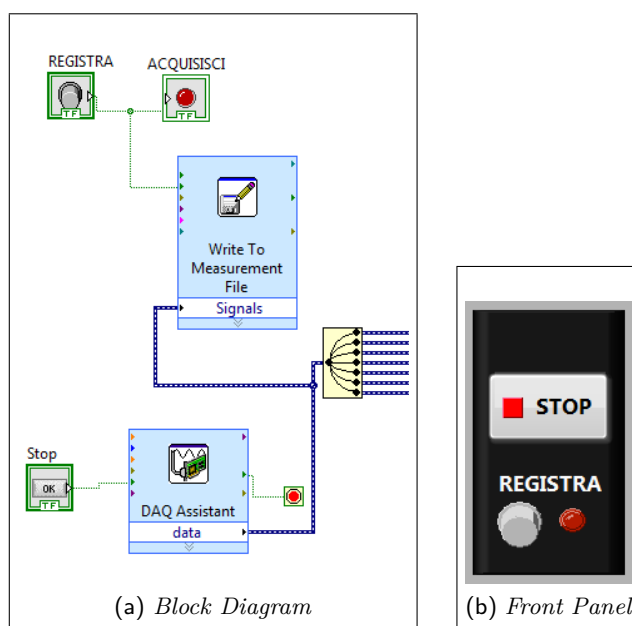


Figura 3.20: Comandi per l'acquisizione e il salvataggio

Per ognuno di questi segnali sono previsti grafici e/o indicatori che ne mostrano l'andamento per tutta la durata dell'acquisizione. Il programma è stato realizzato in modo che sia possibile, a discrezione dell'utente, visualizzare l'andamento del segnale in corrente, quindi su una scala 4 - 20 mA, o in unità ingegneristiche. Operativamente questa azione si può realizzare utilizzando dei *Case Structure* comandati da pulsanti.

Si mostrerà ora come sono stati gestiti i diversi tipi di segnali per ottimizzare la visualizzazione degli stessi in tempo reale da parte dell'utente.

- **Temperatura**

Come già detto si dispone di tre trasmettitori di temperatura, il cui segnale viene trasmesso tramite i primi tre canali della scheda di acquisizione (Ch 0, Ch 1, Ch 2). Nel caso in cui l'utente decida di voler visualizzare i segnali di temperatura in unità di corrente, questi vengono immediatamente visualizzati su un grafico che mostra l'ampiezza dei segnali man mano che vengono acquisiti. Nel caso, invece, in cui si desidera leggere la grandezza in $^{\circ}\text{C}$ bisogna prima trasformare il segnale nell'unità ingegneristica.

Per scalare il segnale è necessario disporre della curva di taratura, definita da personale competente in fase di calibratura dello strumento. In generale, ma non sempre, la relazione tra segnale in corrente e in unità ingegneristica è lineare e l'equazione della retta può essere definita conoscendo il range di grandezze misurabile dallo strumento. Nel caso specifico dei trasmettitori di temperatura, i valori minimo

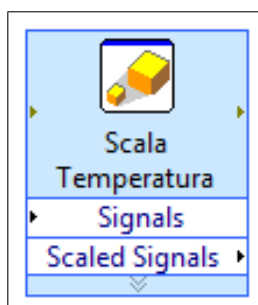


Figura 3.21: Icona per la conversione del segnale

e massimo misurabili dagli strumenti sono rispettivamente $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ne consegue che un segnale in corrente di $0,004\text{ A}$ corrisponde a una temperatura di $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, mentre un segnale di $0,02\text{ A}$ corrisponde a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. E' così possibile ricavare l'equazione per il cambiamento di coordinata.

$$X_{oC} = 15625 \cdot x_A - 262,5 \quad (3.1)$$

All'interno del Block Diagram questa trasformazione viene applicata mediante l'icona di figura 3.21

Una volta scalati i segnali, questi vengono normalmente rappresentati in un grafico in funzione del tempo.

Sia che l'utente opti per una visualizzazione in unità di corrente che in unità ingegneristiche è prevista la possibilità di poter scegliere, mediante un menù a tendina, il segnale proveniente da uno dei tre trasmettitori di temperatura per poterlo visualizzare singolarmente. Questa azione è stata realizzata mediante l'inserimento di un altro Case Structure, permettendo la visualizzazione dell'andamento della temperatura sia tramite un indicatore grafico che numerico.

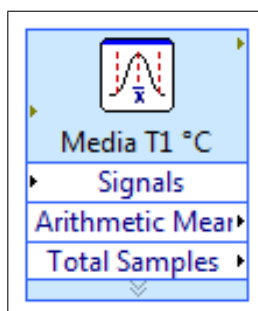


Figura 3.22: Icona per calcolare il valore medio

Nel Block Diagram l'indicatore numerico è preceduto dall'icona di figura 3.22, che calcola il valore medio tra i campioni acquisiti di volta

in volta (il numero di questi è un parametro impostato nella finestra di figura 3.18).

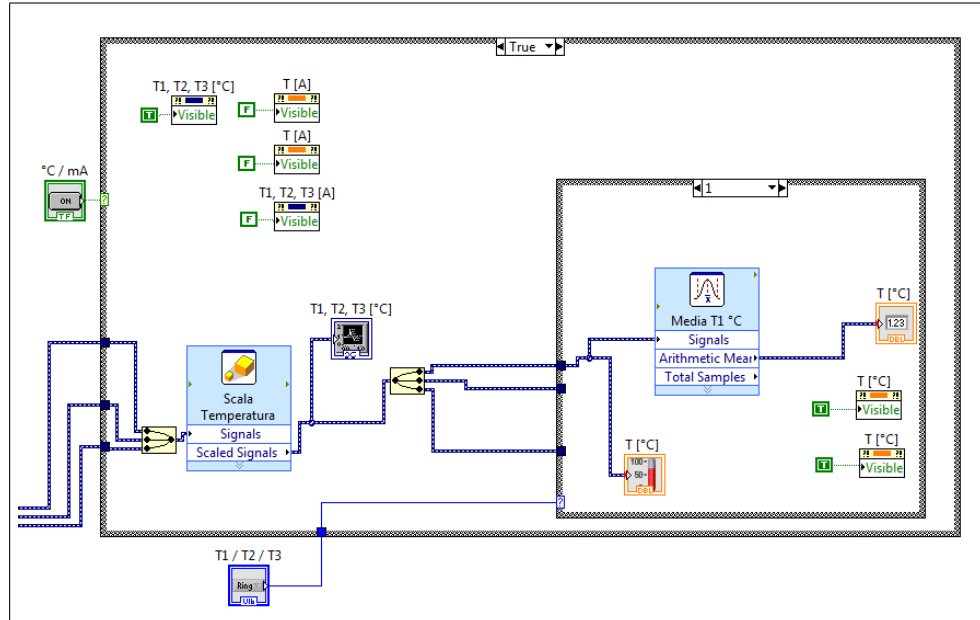


Figura 3.23: Block Diagram: Case Structure sui dati di temperatura

La parte di Block Diagram dove è stata programmata la rappresentazione dei dati di temperatura è riportata in figura 3.23. Nello specifico questa parte riguarda l'ipotetico caso in cui l'utente decida di voler visualizzare i dati in unità ingegneristiche e di focalizzare l'attenzione sul segnale proveniente dal primo trasmettitore. La figura 3.24 rappresenta invece la parte di Front Panel con cui si interfaccia l'utente, sempre riferita ai dati di temperatura. Con il tasto a sinistra è possibile decidere l'unità di misura con cui si desidera visualizzare i dati, il grafico riporta l'andamento nel tempo di tutte e tre le serie di dati, mentre nella parte a destra sono presenti gli indicatori riferiti alla serie di dati desiderata.

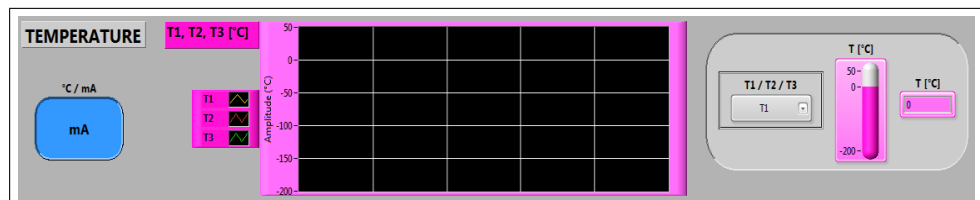


Figura 3.24: Front Panel: parte di interfaccia relativa ai dati di temperatura

- **Portata**

I dati di portata misurati dal flussimetro vengono trasmessi tramite il quarto canale della scheda di acquisizione (Ch 3) e sono trattati in ugual modo di quelli di temperatura, con la possibilità di scegliere se visualizzare i dati in unità di corrente o in $dm^3 s^{-1}$.

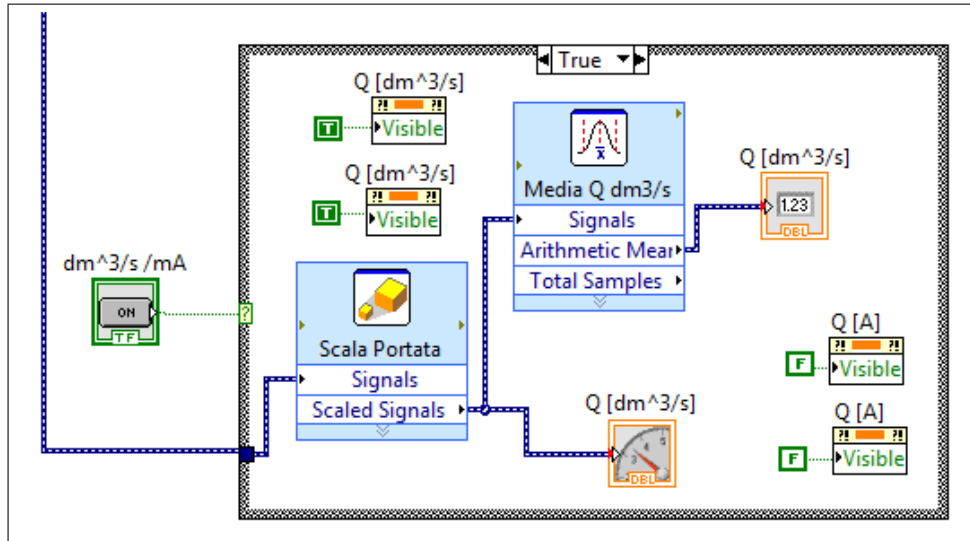


Figura 3.25: Block Diagram: Case Structure sui dati di portata

In questo caso l'equazione della retta che permette il cambiamento dell'unità di misura è:

$$X_{dm^3 s^{-1}} = 2399,6 \cdot x_A - 9,5966 \quad (3.2)$$

Ne consegue che il range di portata misurabile dal flussimetro è $(0 - 38,4) dm^3 s^{-1}$.

In figura 3.25 è riportata la parte di Block Diagram dove è stata programmata la rappresentazione dei dati di portata, nel caso in cui l'utente decida di voler visualizzare i dati in unità ingegneristiche; la figura 3.26 mostra invece la parte di Front Panel relativa.

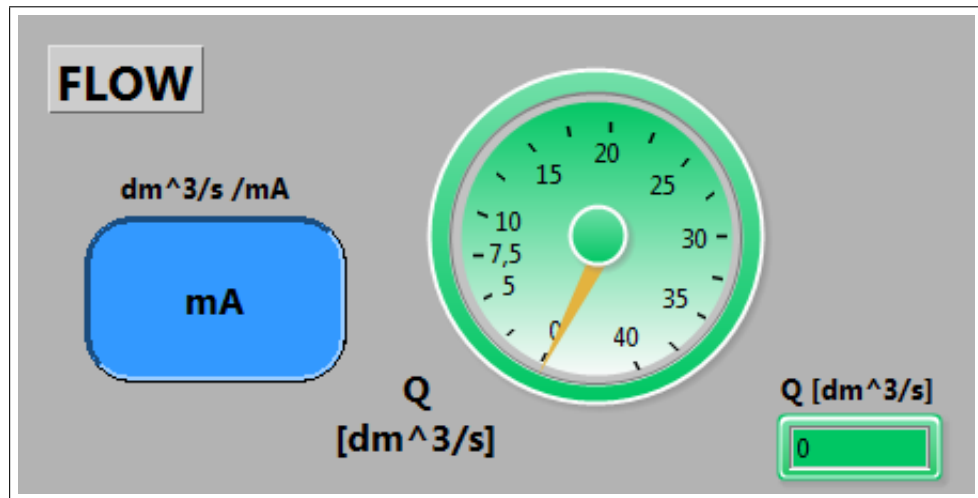


Figura 3.26: Front Panel: parte di interfaccia relativa ai dati di portata

- **Pressione**

I dati di pressione misurati dai trasmettitori situati a monte e a valle del diaframma da testare vengono trasmessi tramite il quinto e il sesto canale della scheda di acquisizione (Ch 4, Ch 5). Per questi dati si ripete lo stesso discorso fatto per i dati di temperatura: sono state considerate sia la possibilità di scegliere se visualizzare i dati in unità di corrente o in bar, sia la scelta di focalizzare l'attenzione su una sola delle due serie di dati.

L'equazione della curva di taratura è la seguente:

$$X_{bar} = 1000 \cdot x_A - 4 \quad (3.3)$$

Ne consegue che il range misurabile dai trasmettitori di pressione è (0 - 16) bar, questo significa che è possibile misurare eventuali depressioni che si possono verificare a valle del piatto, in caso di cavitazione.

La figura 3.27 mostra la parte di Block Diagram dove è stata programmata la rappresentazione dei dati di pressione. Nello specifico questa parte riguarda il caso in cui l'utente decida di voler visualizzare i dati in bar e, in particolare, di focalizzare l'attenzione sul primo trasmettitore. La figura 3.28 rappresenta invece la parte di Front Panel corrispondente.

- **Caduta di pressione**

La caduta di pressione a cavallo del piatto forato misurata dal trasmettitore di pressione differenziale viene trasmessa attraverso il settimo canale della scheda di acquisizione (Ch 6). Per questa serie di

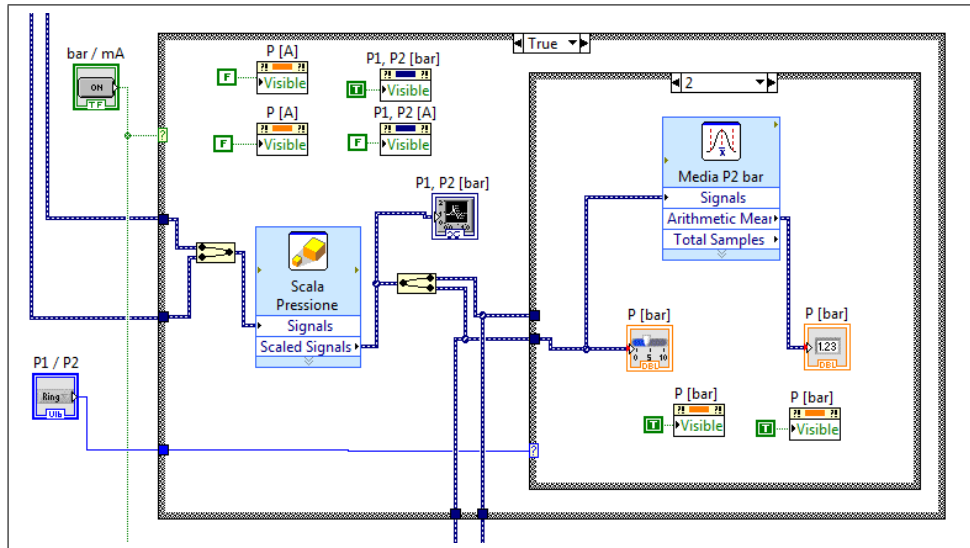


Figura 3.27: Block Diagram: Case Structure sui dati di pressione

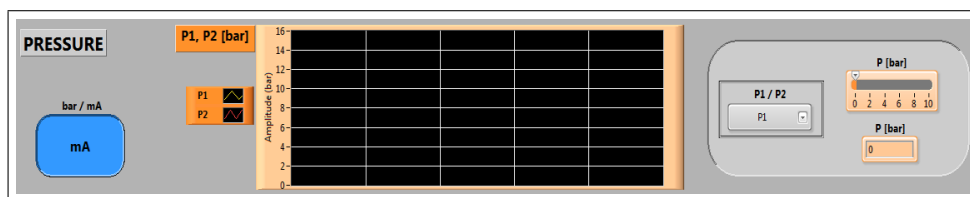


Figura 3.28: Front Panel: parte di interfaccia relativa ai dati di pressione

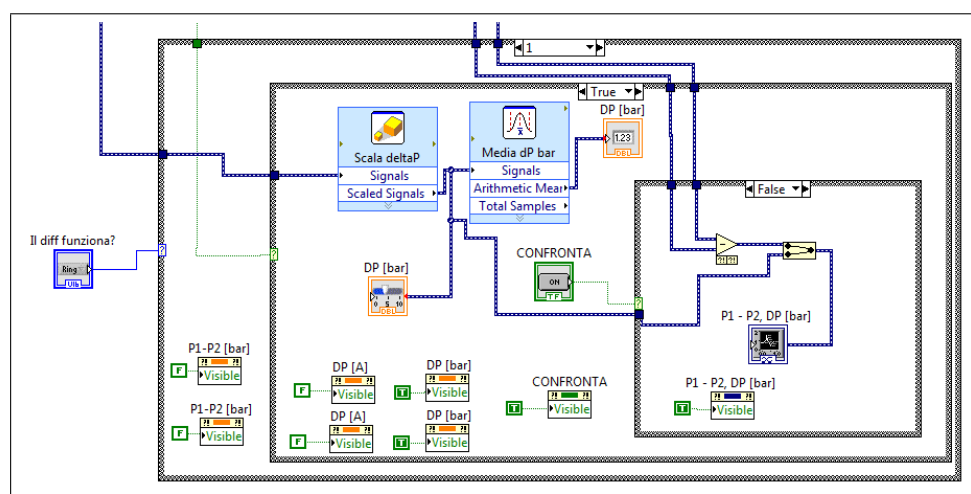


Figura 3.29: Block Diagram: Case Structure sui dati di caduta di pressione

dati è stato aggiunto un ulteriore Case Structure al Block Diagram. Il fondoscala dello strumento, infatti, è pari a 1 bar ma, nel momento in cui si testano i piatti con fori di piccole dimensioni, si prevede che la caduta di pressione sia maggiore. Per questi casi, oltre a non riuscire ad acquisire la misura corretta, si rischia di danneggiare seriamente lo strumento; è quindi necessario chiudere apposite valvole per impedire al fluido di raggiungere il sensore.

La parte del programma inerente questa serie di dati è stata quindi adattata all'eventualità che il trasmettitore di pressione differenziale non sia funzionante. In tal caso la differenza di pressione si definisce semplicemente come differenza tra le due serie di dati di pressione; questa viene poi normalmente rappresentata mediante i soliti indicatori, grafico e numerico. Nel caso in cui, invece, il trasmettitore sia operativo, il segnale viene, come negli altri casi, rappresentato su un grafico in unità di corrente o in bar. Per questo strumento l'equazione della curva di taratura è la seguente:

$$X_{bar} = 62,5 \cdot x_A - 0,25 \quad (3.4)$$

Sempre in riferimento al caso in cui il trasmettitore di pressione differenziale sia operativo, è stata valutata anche la possibilità di rappresentare su uno stesso grafico sia la caduta di pressione misurata direttamente, che quella calcolata come differenza tra i dati di pressione misurati a monte e a valle del piatto testato.

In figura 3.29 è rappresentata la parte di Block Diagram pertinente, mentre la figura 3.30 riporta la parte di Front Panel.

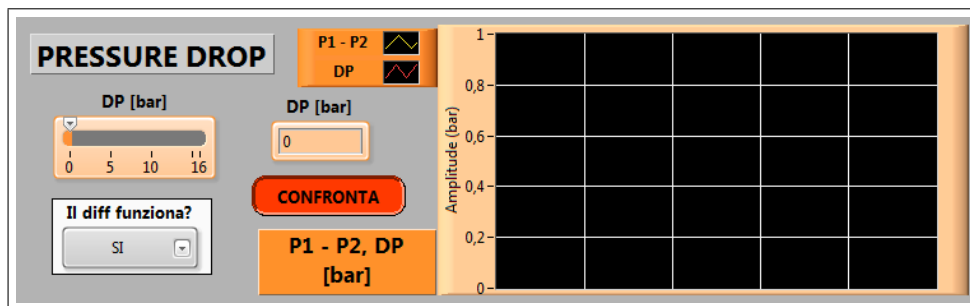


Figura 3.30: Front Panel: parte di interfaccia relativa ai dati di caduta di pressione

Si noti che dal menù a tendina a sinistra è possibile impostare se lo strumento è operativo, in caso affermativo i dati acquisiti vengono rappresentati sugli indicatori; l'unità di misura di riferimento è decisa dallo stesso pulsante che la definisce per le due serie di dati di pressione. Il pulsante "CONFRONTA" permette di visualizzare, sul grafico a destra, sia il segnale acquisito sia quello misurato per differenza (che ovviamente devono coincidere).

Nelle figure 3.31 e 3.32 sono rappresentati, rispettivamente, il Block Diagram e il Front Panel dell'intero programma di acquisizione realizzato.

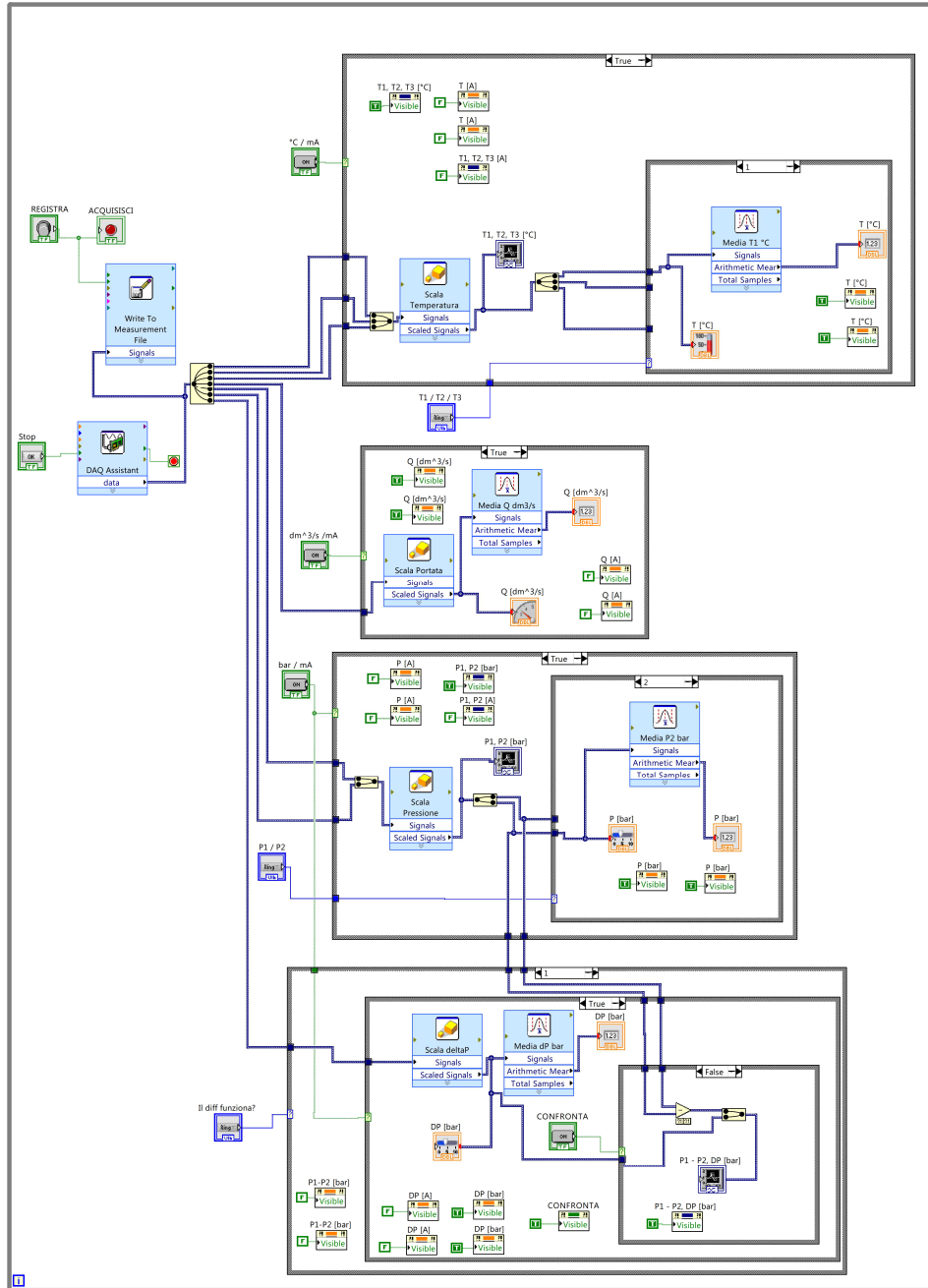


Figura 3.31: Block Diagram

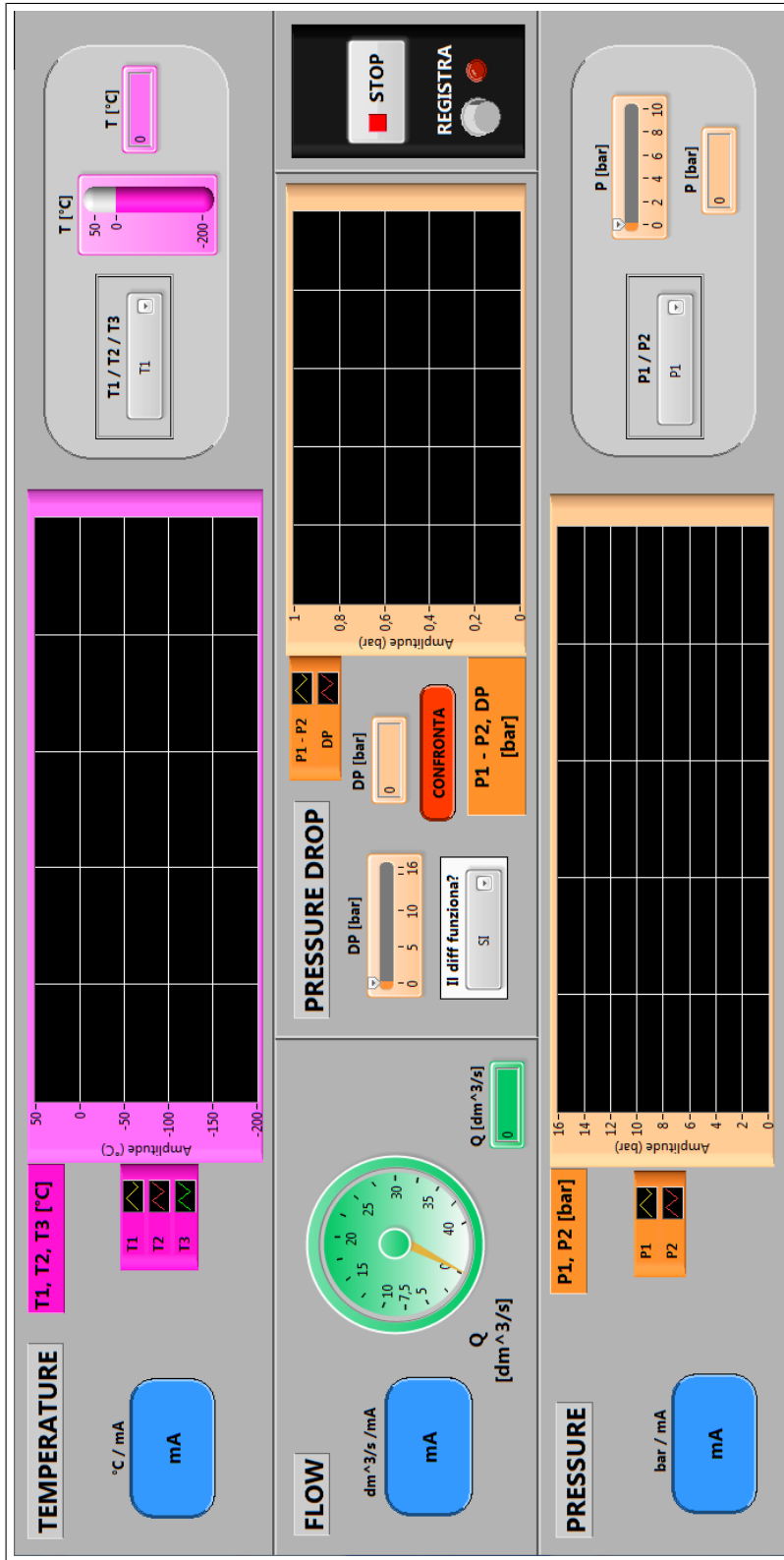


Figura 3.32: Front Panel

Capitolo 4

Validazione dei risultati normati

In questo capitolo verranno descritte le prove sperimentali eseguite sull'impianto situato nel Laboratorio di Idraulica del Politecnico di Milano, mirate allo svolgimento dei test, seguendo le indicazioni della normativa il più fedelmente possibile.

Per raggiungere lo scopo prefissato per questo lavoro sarebbe stato sufficiente eseguire test atti a misurare unicamente la caduta di pressione del flusso d'acqua al passaggio attraverso i quattro piatti forati a spigolo vivo; in realtà, grazie alla possibilità di installare un accelerometro sull'impianto, è stato possibile misurare anche la cavitazione. In questo modo si intende caratterizzare in modo completo i quattro piatti monoforo. Le condizioni operative e i risultati ottenuti sono riportati in Appendice D.

4.1 Condizioni operative

A seconda del provino che si vuole testare le condizioni operative cambiano; si vedrà infatti che i diversi piatti condizionano il flusso in modo differente e i presupposti per l'acquisizione dei dati vengono adattati di volta in volta. Il primo provino installato sull'impianto è quello caratterizzato da un valore del coefficiente β pari a 0,47. Questa scelta è dovuta alla conoscenza a priori del coefficiente di flusso C_V ; un riscontro sui dati, quindi, fornisce un'indicazione sulla bontà delle condizioni operative imposte e sulla messa a punto dell'impianto.

- $\beta = 0,47$

Come già detto, la normativa [7] impone che i valori di portata e le relative cadute di pressione registrate debbano condurre alla definizione di un valore del coefficiente di flusso C_V pari a $52 \text{ gal min}^{-1} \text{ psi}^{-1/2}$, permettendo una tolleranza del 5%. La portata viene regolata principalmente mediante la valvola situata a valle della sezione di test, rappresentata in fig 3.6.

L'operazione preliminare all'acquisizione vera e propria dei dati consiste nel far variare progressivamente la portata mediante tale valvola per cercare di stabilire indicativamente, ascoltando il rumore caratteristico, le condizioni per cui comincia a verificarsi il fenomeno della cavitazione. Questa fase è piuttosto importante in quanto, come già spiegato, la cavitazione influisce negativamente sulla bontà delle grandezze rilevate per la misurazione del coefficiente di flusso C_V ; permette quindi di stabilire indicativamente il range di portata per cui i dati acquisiti possono essere considerati significativi. Per questo tipo di piatto, caratterizzato da dimensioni considerevoli del foro, la cavitazione si verifica per valori piuttosto alti di portata.

In linea generale, piuttosto che eseguire un'unica acquisizione variando la portata dopo ogni intervallo di tempo, definito a priori, è più conveniente eseguire più acquisizioni, ognuna caratterizzata da un certo valore di portata, per permettere la sussistenza delle condizioni di moto permanente. Per questo tipo di provino, però, si è deciso di effettuare un'unica acquisizione partendo da una portata minima e aumentando gradualmente l'apertura della valvola ogni 20 secondi. Questo è stato possibile considerando che, in fase di elaborazione dati, effettuata utilizzando un codice Matlab, è possibile visualizzare le grandezze misurate dagli strumenti in unità di corrente e scegliere gli intervalli di dati ritenuti più idonei in base alla loro stabilità nel tempo. Per questa specifica prova si è optato per il settaggio di una frequenza di acquisizione pari a 150 Hz: questa scelta permette di garantire una certa affidabilità dei dati rilevati che, allo stesso tempo, risultano in numero idoneo da non procurare un eccessivo peso computazionale durante l'elaborazione a posteriori degli stessi.

Un altro fattore importante da tenere in considerazione è il valore di pressione a monte della sezione di test (qui indicato P_1): la normativa prescrive che tale grandezza venga mantenuta costante il più possibile. Questo parametro risulta assolutamente non trascurabile nel momento in cui si intende studiare il fenomeno della cavitazione, in quanto il coefficiente caratteristico σ è dipendente anche da P_1 . Per lo studio del coefficiente di flusso, invece, è maggiormente rilevante la caduta di pressione a cavallo del piatto, infatti la P_1 non compare nella formula di calcolo. Siccome il funzionamento dell'impianto avviene per gravità, e la portata è regolata tramite la valvola situata a valle della sezione di test, è prevedibile che durante la prova la pressione di monte tenda a diminuire. Nonostante ciò tale diminuzione si può ritenere irrilevante ai fini dello studio della perdita di carico.

$$\circ \beta = 0,30$$

Per il piatto con orifizio di diametro pari a 25 mm, si è di nuovo verificato che, mantenendo valori di portata relativamente bassi, si riesce a scongiurare il verificarsi della cavitazione. Le condizioni operative, dunque, sono le stesse di quelle imposte per il provino normato: la frequenza è stata impostata a 150 Hz ed è stata effettuata un'unica acquisizione variando l'apertura della

valvola, e quindi la portata transitante, ogni 30 secondi.

◦ $\beta = 0,18$

L'installazione di questo provino è avvenuta dopo le prove descritte sopra. L'osservazione dei dati ha permesso di operare alcuni accorgimenti nelle condizioni operative per migliorare i risultati. Con la diminuzione delle dimensioni del foro del provino, il flusso garantito dal funzionamento a gravità dell'impianto non è più sufficiente; è stato quindi necessario azionare il gruppo di pressione. A questo punto, però, si sono verificate due condizioni:

- nel momento in cui l'entità della caduta di pressione a cavallo del provino aumenta, la condizione di cavitazione si verifica per valori di portata inferiori;
- impostando un valore maggiore di pressione a monte della sezione di test P_1 si osserva che la sua diminuzione, che si verifica generalmente regolando la portata con la valvola di valle, non è più trascurabile.

Questi fattori hanno condotto alla decisione di effettuare più prove, una per ogni valore di portata circolante, in modo da avere più tempo a disposizione per il raggiungimento delle condizioni di moto permanente. Questa decisione operativa ha permesso di mantenere un valore di pressione di monte P_1 costante, regolando di volta in volta anche l'apertura della valvola situata a monte della sezione di test, sullo snodo di alimentazione.

Grazie a queste condizioni, tali prove possono essere vevoli anche per lo studio della cavitazione, a patto di aumentare la frequenza di acquisizione ai valori prescritti dalla normativa (capitolo 2.3 a pag. 21).

In realtà l'accelerometro è caratterizzato da una frequenza massima di campionamento pari a 2,5 kHz; impostando una frequenza di acquisizione pari a 6,5 kHz è stato possibile, per il teorema di Nyquist-Shannon, analizzare lo spettro di frequenze fino a 3,25 kHz, anche se tale valore è molto lontano da quello prescritto dalla normativa di riferimento.

Si noti che, considerando un solo intervallo di valori utili alla determinazione del coefficiente di flusso C_V per ogni prova, l'aumento della frequenza di acquisizione non grava in modo pesante sul peso computazionale che comporta l'elaborazione dei dati.

◦ $\beta = 0,06$

Per il piatto con orifizio di diametro pari a 5 mm sono verificate tutte le osservazioni fatte per il piatto con foro di diametro pari a 15 mm; è stato quindi seguito il medesimo procedimento.

4.2 Risultati

Di seguito si riportano alcuni dei dati acquisiti e le osservazioni effettuate dopo la loro elaborazione.

o $\beta = 0,47$

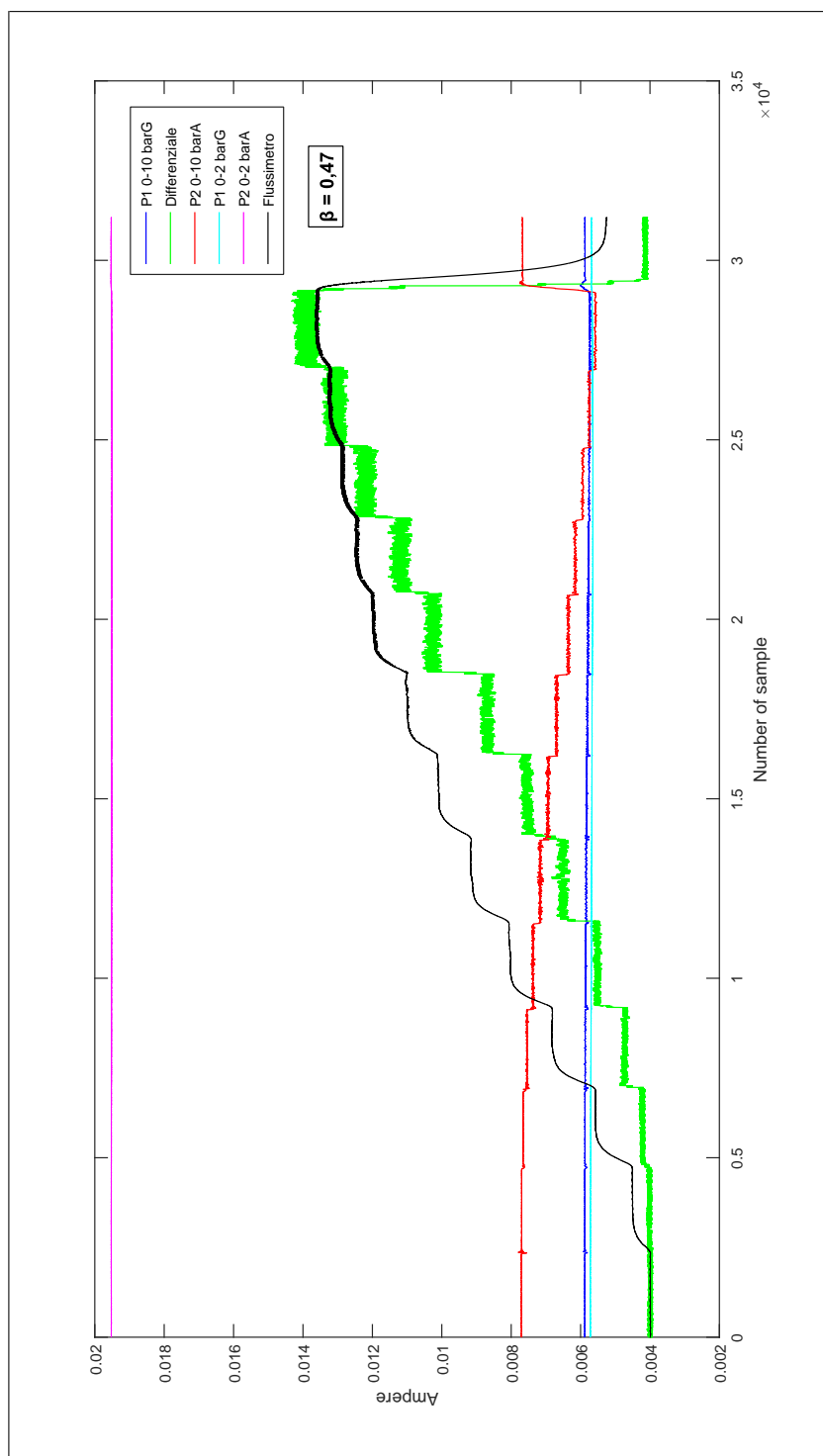
In figura 4.1 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti in unità di corrente (0,004 A - 0,02 A). Da tale grafico è stato possibile selezionare gli intervalli per cui sono stati calcolati i valori medi di ogni grandezza e quindi il coefficiente di flusso C_V . La bontà degli intervalli presi in considerazione è stata valutata verificando l'andamento delle medie cumulate delle grandezze protagoniste nel calcolo del C_V .

L'andamento delle medie cumulate per queste prove sarà mostrato e commentato, per brevità di narrazione, solo per la prova eseguita sul piatto con foro da 25 mm.

Dell'intera acquisizione è stato possibile scegliere ben 11 intervalli che, come si vede chiaramente nell'immagine 4.1, corrispondono a 11 diversi gradi di apertura della valvola. La tabella 4.1 riporta i valori medi delle principali grandezze coinvolte per ognuno degli intervalli considerati.

Tabella 4.1: H₂O: Risultati - $\beta = 0,47$

$\beta = 0,47$								
Prova	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{L}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	ρ_0 [$\frac{kg}{m^3}$]	Re [-]	C_V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	1,264	1,277	0,027	2,058	997,90	999,10	$3,45E+04$	52,01
1	1,259	1,209	0,090	3,724	997,90	999,10	$6,23E+04$	51,66
1	1,250	1,100	0,191	5,372	997,90	999,10	$8,99E+04$	51,19
1	1,242	0,971	0,313	6,926	997,90	999,10	$1,16E+05$	51,49
1	1,231	0,827	0,447	8,229	997,90	999,10	$1,38E+05$	51,21
1	1,221	0,675	0,589	9,522	997,90	999,10	$1,59E+05$	51,59
1	1,207	0,464	0,783	10,941	997,90	999,10	$1,83E+05$	51,41
1	1,199	0,341	0,901	11,643	997,90	999,10	$1,95E+05$	51,02
1	1,189	0,206	1,027	12,246	997,90	999,10	$2,05E+05$	50,26
1	1,182	0,089	1,138	12,774	997,90	999,10	$2,14E+05$	49,80
1	1,175	-0,023	1,242	13,313	997,90	999,10	$2,23E+05$	49,69

Figura 4.1: H₂O: Rappresentazione dati acquisiti in unità di corrente - $\beta = 0,47$

Per verificare il rispetto della normativa si riporta un grafico (fig. 4.2) che mostra l'andamento del coefficiente di flusso al variare del numero di Reynolds. Il numero di Reynolds (Re) è un gruppo adimensionale utilizzato in fluidodinamica, proporzionale al rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscose. Il numero di Reynolds viene generalmente utilizzato per determinare la natura del flusso: laminare ($Re \leq 2300$), in regime di transizione ($2300 \leq Re \leq 4000$) o turbolento ($Re \geq 4000$). Si determina con la seguente formula:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

In questo caso di studio, dove il fluido di riferimento è l'acqua, la densità e la viscosità dinamica si mantengono pressoché costanti sotto diverse condizioni di pressione e temperatura, anch'essa limitata entro un range ristretto (± 2 celsius). Questo significa che il numero di Reynolds è un gruppo adimensionale proporzionale alla velocità, e quindi alla portata transitante. Siccome, come si è già ampiamente illustrato, il coefficiente di flusso C_V è una caratteristica intrinseca dei dispositivi da testare, e in generale delle valvole, questo deve mantenersi costante all'interno di un determinato range di Re . Il limite superiore di questo range è dettato dall'insorgere della cavitazione ed è funzione della pressione a monte della sezione di test P_1 .

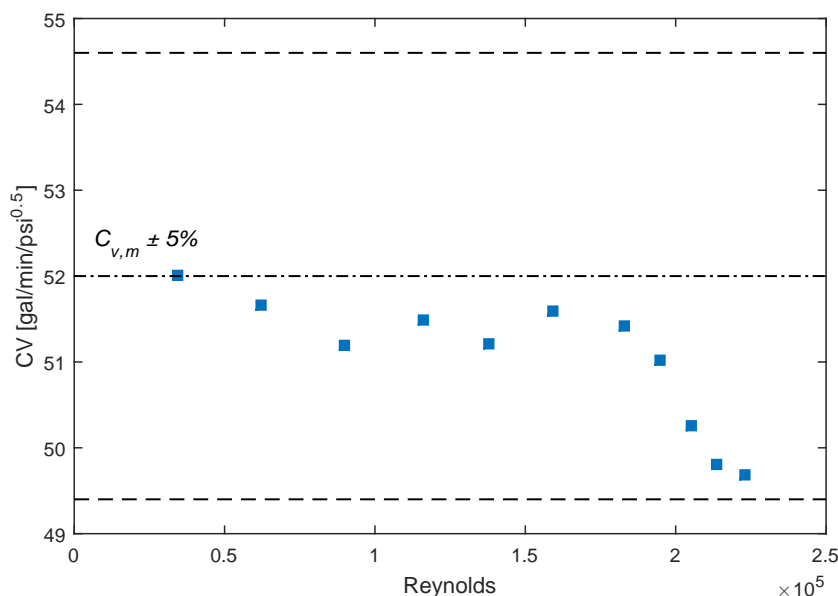


Figura 4.2: H₂O: Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re

Sul grafico 4.2 sono stati indicati, il valore di C_V prescritto dalla normativa e la relativa tolleranza ($\pm 5\%$). Si può notare che, per Reynolds

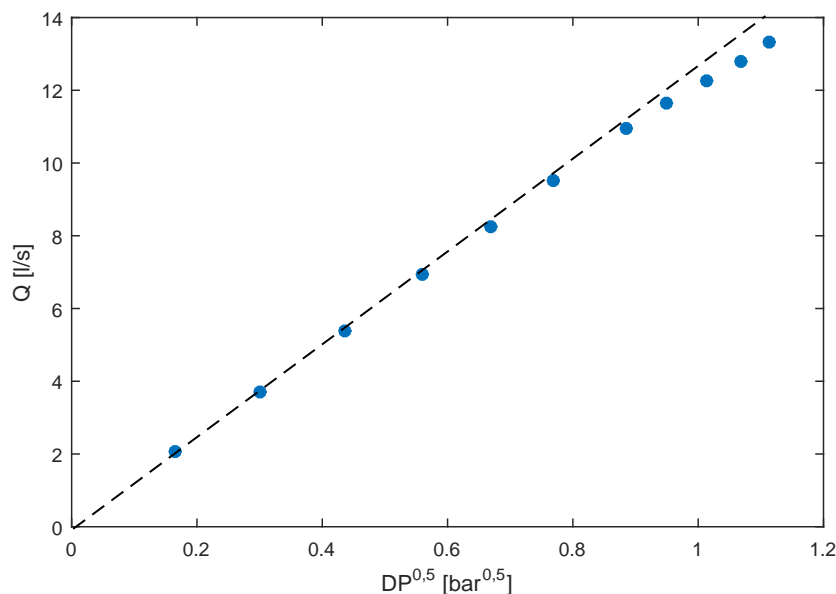


Figura 4.3: H₂O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione

superiore a $1,6E + 05$ si registra una marcata tendenza a decrescere da parte del coefficiente di flusso. Nonostante ciò i valori misurati rientrano all'interno del range previsto.

Si vuole ora determinare il coefficiente di recupero F_L , che si calcola come mostrato nelle equazioni 2.4 e 2.5.

Per definire il valore di Q_{max} da utilizzare nella formula è necessario costruire il grafico (fig. 4.3) che mostra l'andamento della portata in funzione della radice quadrata della caduta di pressione (come in fig. 2.3).

Risulta evidente la linearità del legame tra le due grandezze, nel tratto finale si nota che la portata cresce sempre meno allontanandosi dalla retta di interpolazione; non si riesce tuttavia a definire un valore da assegnare a Q_{max} . Questa conclusione era prevedibile, infatti la stabilizzazione della portata è legata alla cavitazione, condizione che si è cercato di evitare in questa prova. Si costruisce, quindi, lo stesso grafico (fig. 4.4), ma utilizzando i dati riportati in appendice D, acquisiti sfruttando l'intera apertura della valvola.

L'andamento della curva 4.4 permette di stabilire il valore di Q_{max} :

$$Q_{max} = 15 \frac{l}{s}$$

Si possono calcolare ora i valori dei coefficienti F_F e F_L :

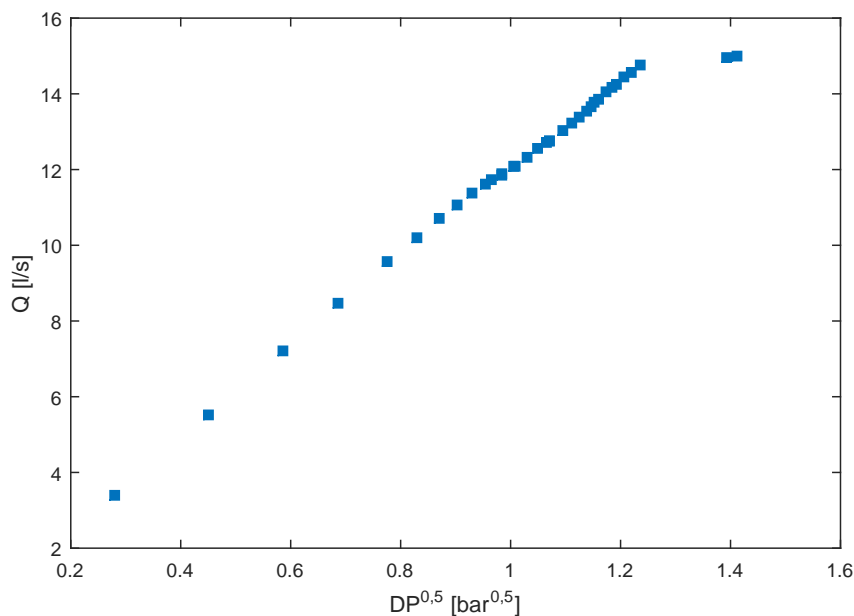


Figura 4.4: H₂O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione

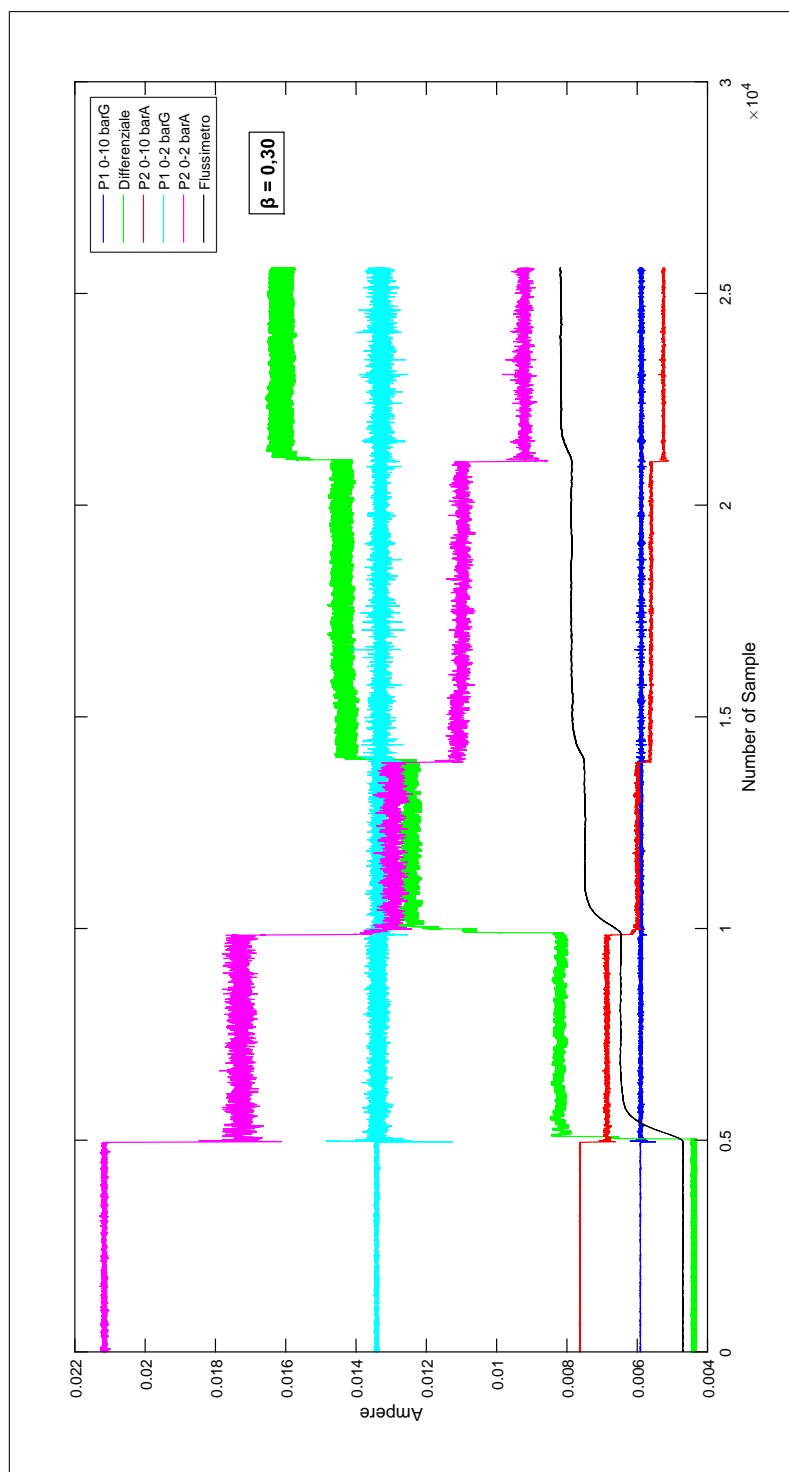
$$F_F = 0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{0,0248}{221,2}} = 0,957$$

$$F_L = \frac{15 \cdot 3,6}{0,865 \cdot 51,03} \cdot F_L \sqrt{\frac{\frac{998,11}{999,10}}{2,14 - 0,957 \cdot 0,0248}} = 0,84$$

Tale valore è ampiamente contenuto all'interno dell'intervallo di incertezza attorno al valore prescritto dalla normativa (equazione 2.8).

o $\beta = 0,30$

In figura 4.5 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti in unità di corrente. Da questo grafico è stato possibile selezionare gli intervalli per cui sono stati calcolati i valori medi di ogni grandezza e quindi il coefficiente di flusso C_V . La bontà degli intervalli presi in considerazione è stata definita verificando l'andamento delle medie cumulate del C_V e delle grandezze coinvolte nella sua determinazione, ossia la portata e la caduta di pressione.

Figura 4.5: H₂O: Rappresentazione dati acquisiti in unità di corrente - $\beta = 0,30$

Dall'immagine 4.5 risulta evidente che gli intervalli presi in considerazione sono 5 e ognuno è contenuto all'interno dei tratti di segnale che si mantengono costanti.

Per ognuno di questi intervalli sono stati realizzati grafici che mostrano l'andamento della media cumulata di portata, caduta di pressione e coefficiente di flusso (fig. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10), che si deve stabilizzare attorno ad un valore. E' stato inoltre considerato un intervallo di confidenza ($\pm 0,2\%$) per verificare che le medie vi si mantengano all'interno per un certo periodo di tempo.

Tali andamenti permettono di attribuire una buona significatività ai dati acquisiti.

Verificata la significatività dei dati acquisiti negli intervalli presi in considerazione, si riportano i valori medi delle principali grandezze coinvolte (tabella 4.2).

Tabella 4.2: H₂O: Risultati - $\beta = 0,30$

$\beta = 0,30$								
Prova	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	ρ_0 [$\frac{kg}{m^3}$]	Re [-]	C_V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	1,265	1,245	0,042	0,874	997,90	999,10	1,46E+04	17,68
1	1,259	0,762	0,522	3,212	997,90	999,10	5,38E+04	18,49
1	1,253	0,222	1,057	4,579	997,90	999,10	7,66E+04	18,52
1	1,250	-0,023	1,300	5,101	997,90	999,10	8,54E+04	18,61
1	1,248	-0,242	1,518	5,509	997,90	999,10	9,22E+04	18,60

Il grafico 4.11 mostra l'andamento del coefficiente di flusso al variare del numero di Reynolds, oltre all'indicazione della variabilità dei dati. Il C_V medio per questo piatto vale:

$$C_{V,m} = 18,4 \frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}} \quad (4.1)$$

Si è calcolato che il discostamento massimo dei dati sperimentali dal valore medio è pari al 4%.

Come successo con il piatto caratterizzato da un valore di β pari a 0,47, si può notare che, con i dati riportati, non è possibile determinare il coefficiente di recupero F_L a causa della difficoltà nell'individuazione del valore di Q_{max} . Si riporta comunque il grafico che mostra l'andamento della portata in funzione della caduta di pressione (figura 4.12): si nota che i due parametri sono legati da una relazione lineare, che si mantiene per l'intero range considerato. Incorporando a questi i dati acquisiti durante le prove per lo studio della cavitazione D la portata non sembra stabilizzarsi su un

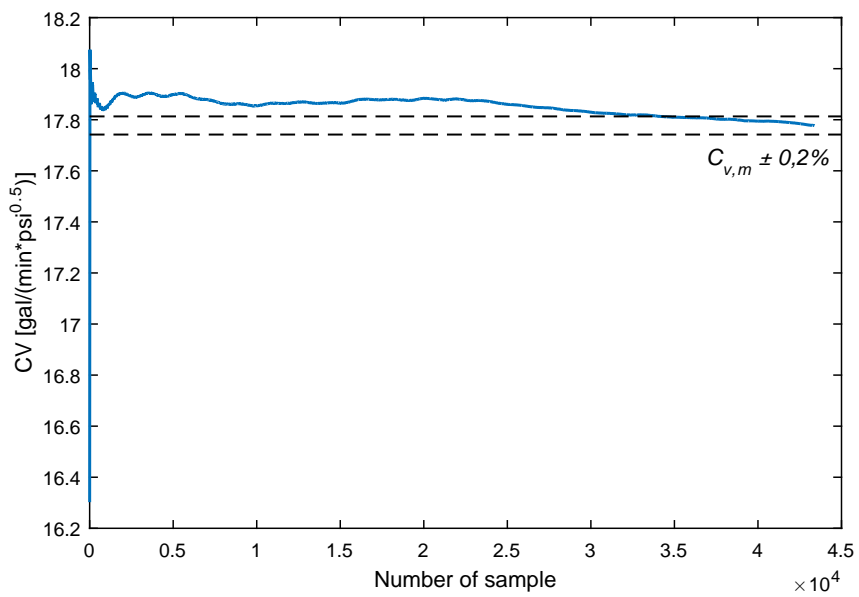
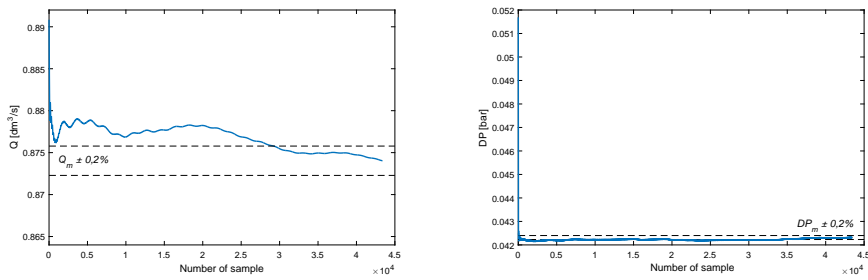
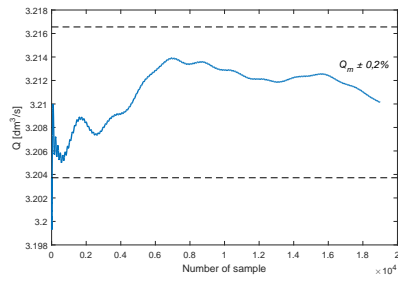
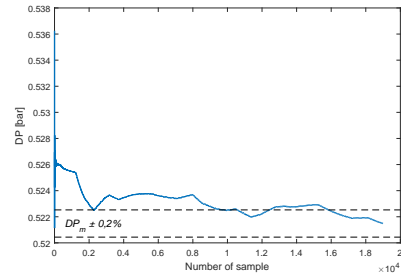


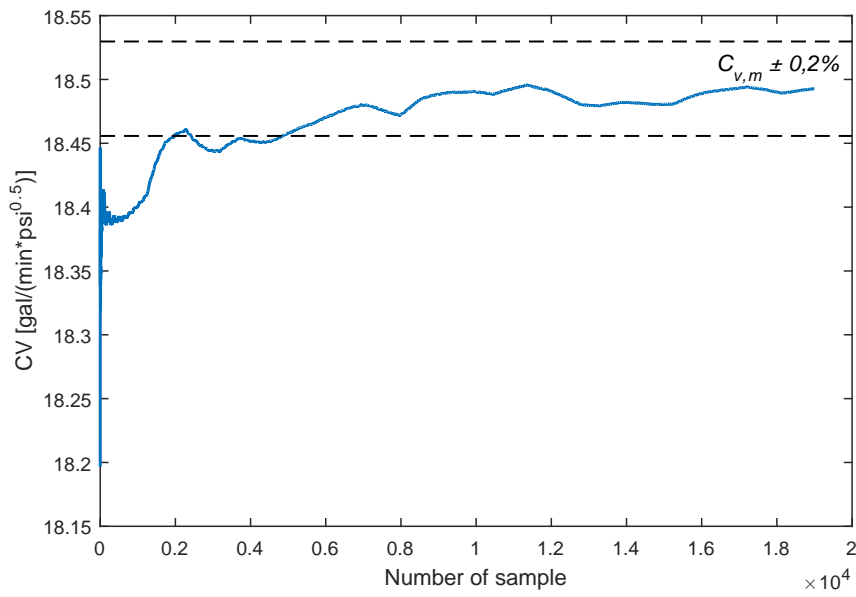
Figura 4.6: H₂O: $\beta = 0,30$ - Int. 1 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata

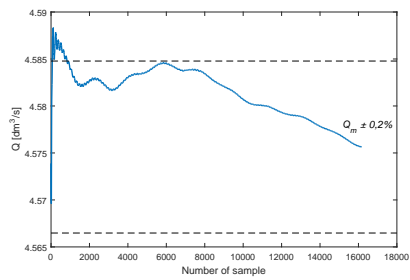


(b) Caduta di pressione

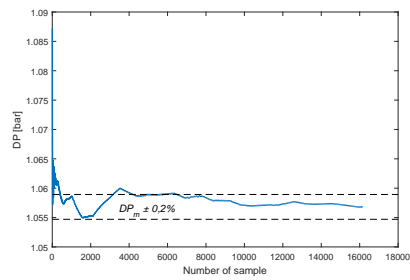


(c) Coefficiente di flusso

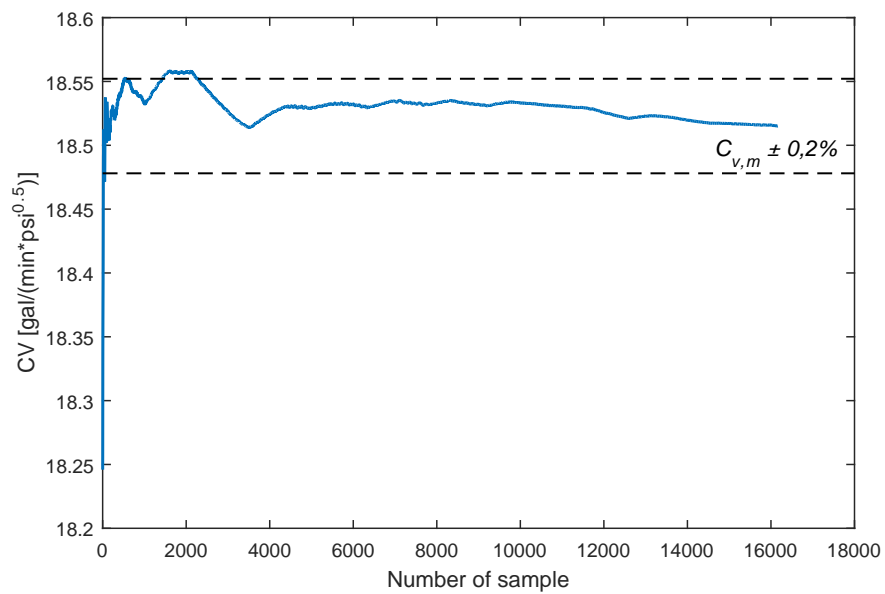
Figura 4.7: H₂O: $\beta = 0,30$ - Int. 2 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata



(b) Caduta di pressione



(c) Coefficiente di flusso

Figura 4.8: H₂O: $\beta = 0,30$ - Int. 3 - Andamenti delle medie cumulate

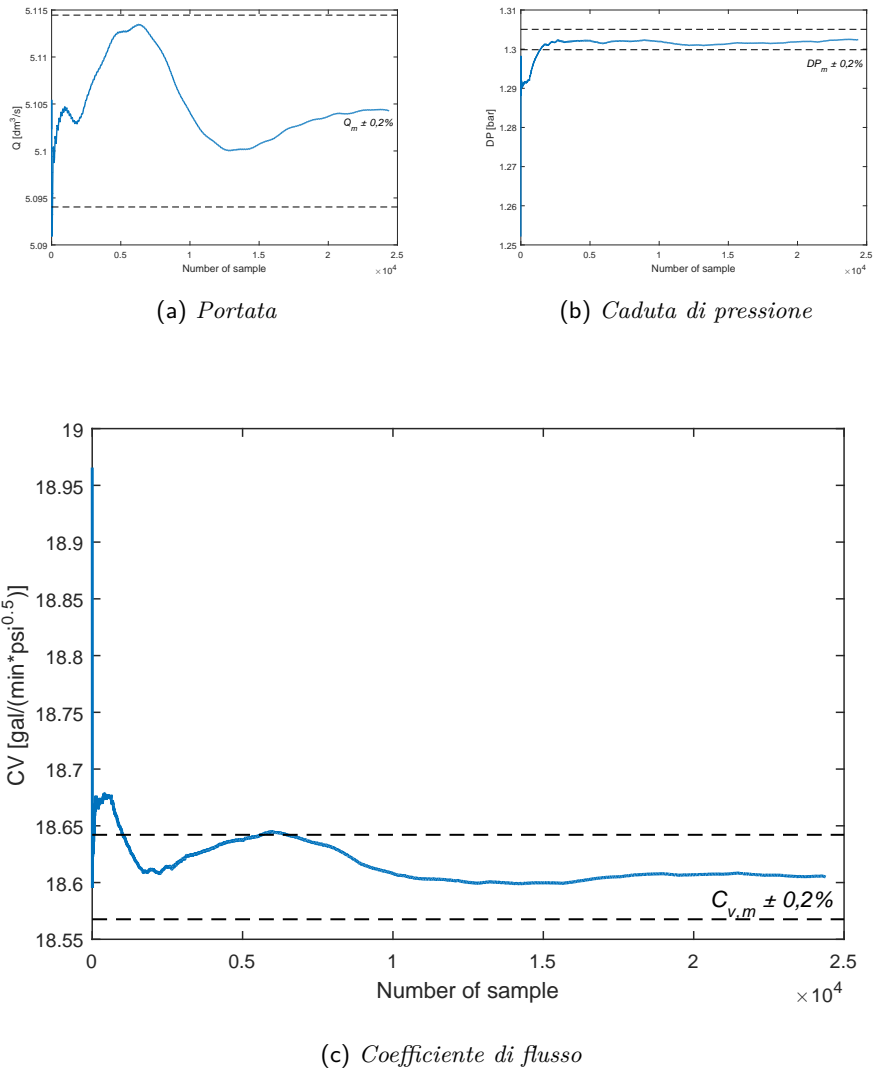


Figura 4.9: H_2O : $\beta = 0,30$ - Int. 4 - Andamenti delle medie cumulate

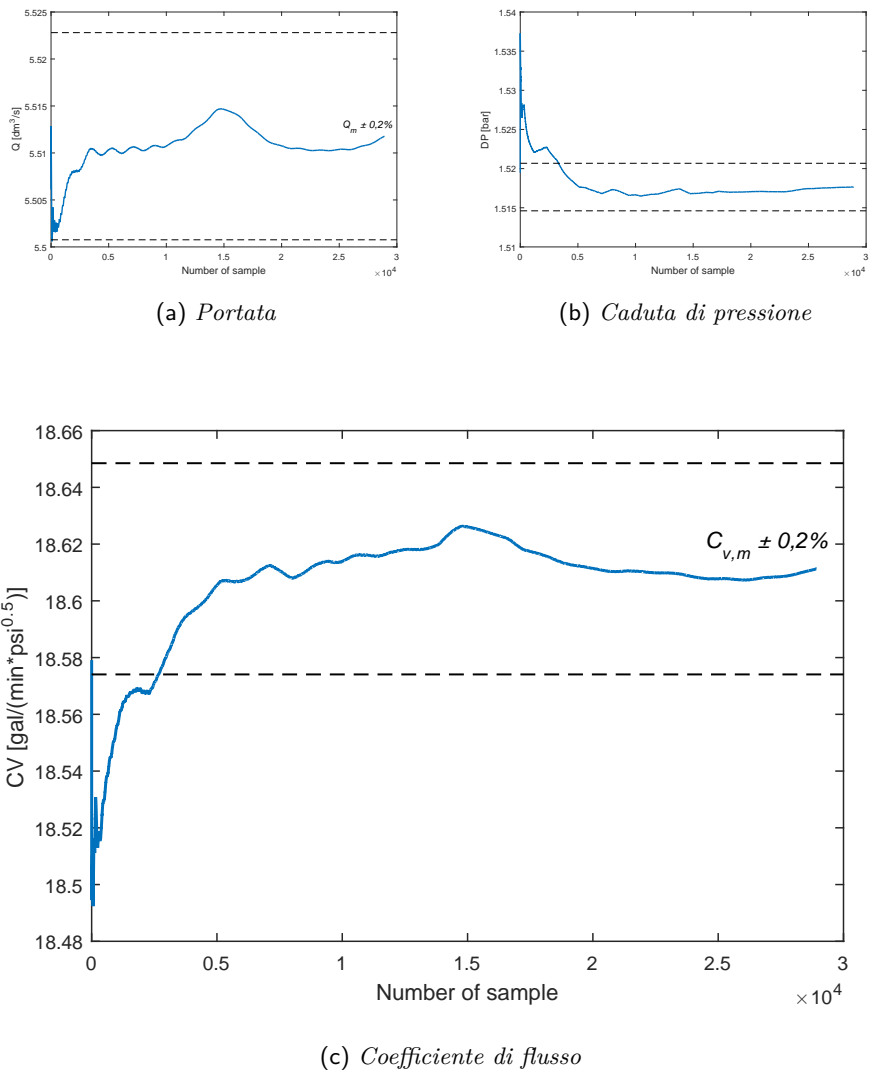
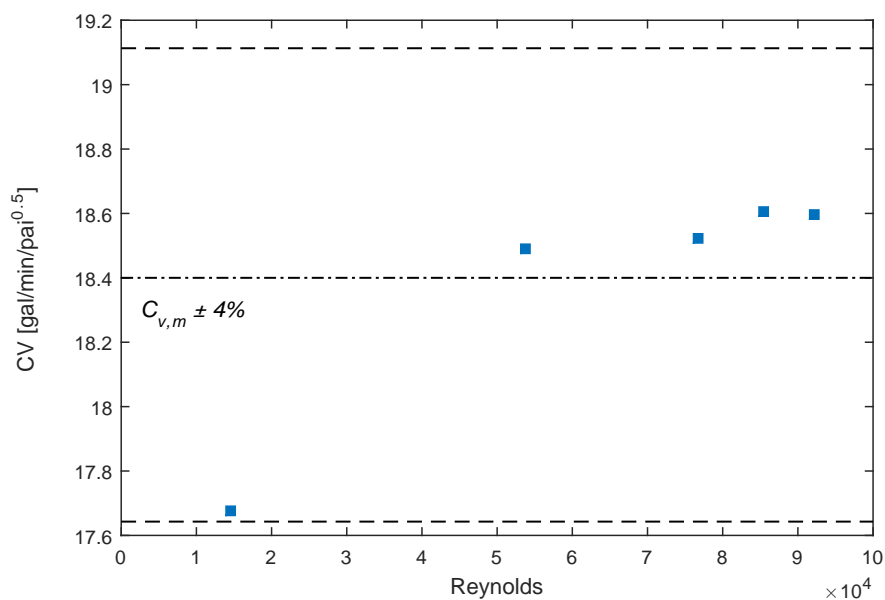
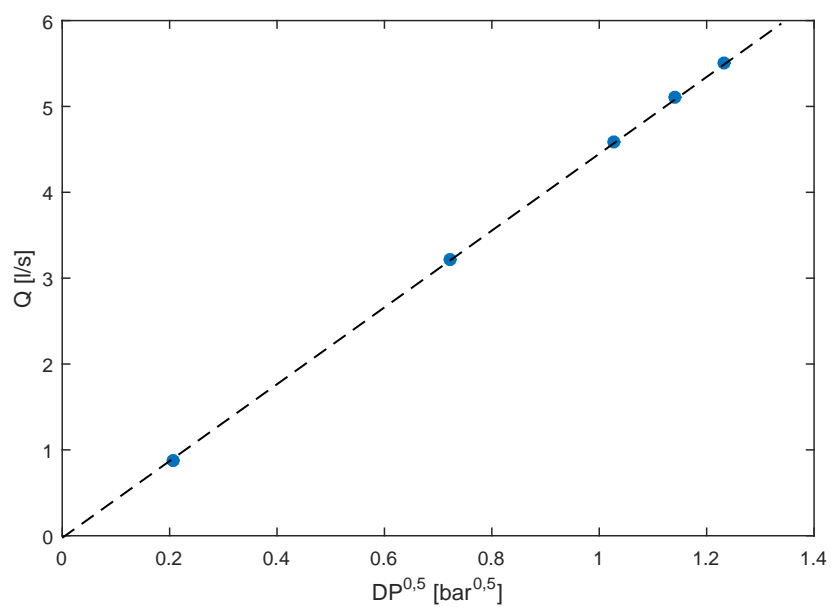


Figura 4.10: H_2O : $\beta = 0,30$ - Int. 5 - Andamenti delle medie cumulate

Figura 4.11: H₂O: Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re Figura 4.12: H₂O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione

valore massimo, ma continua ad aumentare, non consentendo il calcolo del coefficiente di recupero F_L .

o $\beta = 0,18$

Per questo piatto, come già spiegato nel capitolo 4.1, si sono svolte più acquisizioni, una per ogni valore di portata imposto. Nello specifico sono state eseguite 16 prove, ne consegue che si dispone di 16 intervalli di dati per cui vengono calcolate le grandezze medie. Le più significative sono riportate in tabella 4.3.

Tabella 4.3: H₂O: Risultati - $\beta = 0,18$

$\beta = 0,18$								
Prova	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	ρ_0 [$\frac{kg}{m^3}$]	Re [-]	C_V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	1,615	0,049	1,972	2,199	997,90	999,10	3,68E + 04	6,51
2	1,624	0,050	1,082	1,620	997,90	999,10	2,71E + 04	6,48
3	1,650	0,050	2,067	2,237	997,90	999,10	3,74E + 04	6,47
4	1,669	0,049	2,255	2,354	997,90	999,10	3,94E + 04	6,52
5	1,702	0,047	3,129	2,772	997,90	999,10	4,64E + 04	6,52
6	1,707	0,048	3,079	2,759	997,90	999,10	4,62E + 04	6,54
7	1,724	0,049	3,043	2,717	997,90	999,10	4,55E + 04	6,48
8	1,749	0,049	3,046	2,718	997,90	999,10	4,55E + 04	6,48
9	1,763	0,049	3,057	2,724	997,90	999,10	4,56E + 04	6,48
10	2,255	0,134	3,587	2,971	997,90	999,10	4,97E + 04	6,52
11	2,255	0,133	3,578	2,959	997,90	999,10	4,95E + 04	6,51
12	2,255	0,130	3,804	3,047	997,90	999,10	5,10E + 04	6,50
13	2,255	0,127	3,917	3,083	997,90	999,10	5,16E + 04	6,48
14	2,255	0,126	4,013	3,120	997,90	999,10	5,22E + 04	6,48
15	2,255	0,123	4,006	3,117	997,90	999,10	5,22E + 04	6,48
16	2,255	0,121	4,023	3,129	997,90	999,10	5,24E + 04	6,49

Si riporta, a titolo di esempio, la verifica della significatività dei dati acquisiti mediante lo studio degli andamenti delle medie cumulate (fig. 4.14 e 4.15) solo per una prova, per la quale in figura 4.13 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti in unità di corrente. La costanza dei segnali dimostra che tale procedimento ha permesso il raggiungimento delle condizioni di moto permanente per un periodo più lungo, e quindi l'acquisizione di dati più affidabili.

Il grafico 4.16 mostra l'andamento del coefficiente di flusso al variare del numero di Reynolds, oltre all'indicazione della variabilità dei dati. Il C_V medio per questo piatto vale:

$$C_{V,m} = 6,50 \frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}} \quad (4.2)$$

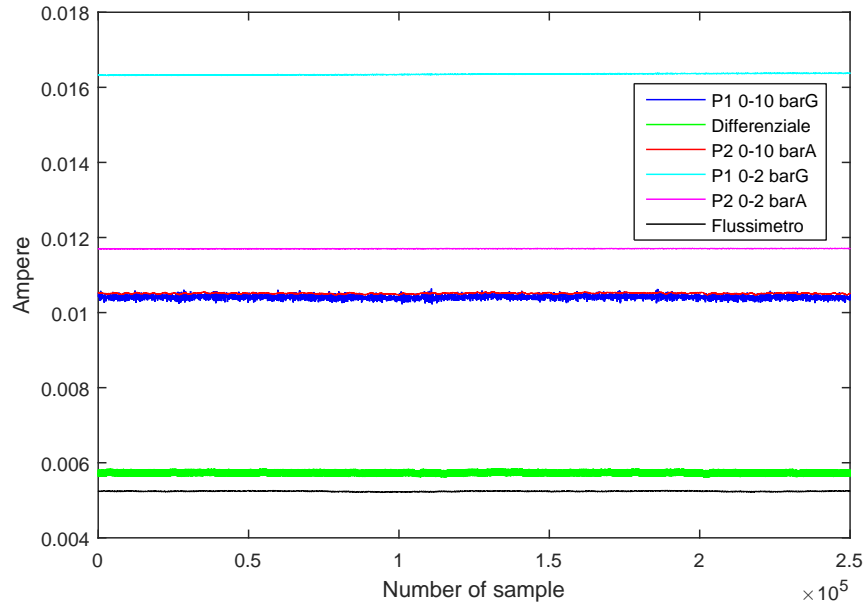


Figura 4.13: H₂O: Rappresentazione dati acquisiti in unità di corrente - $\beta = 0,18$

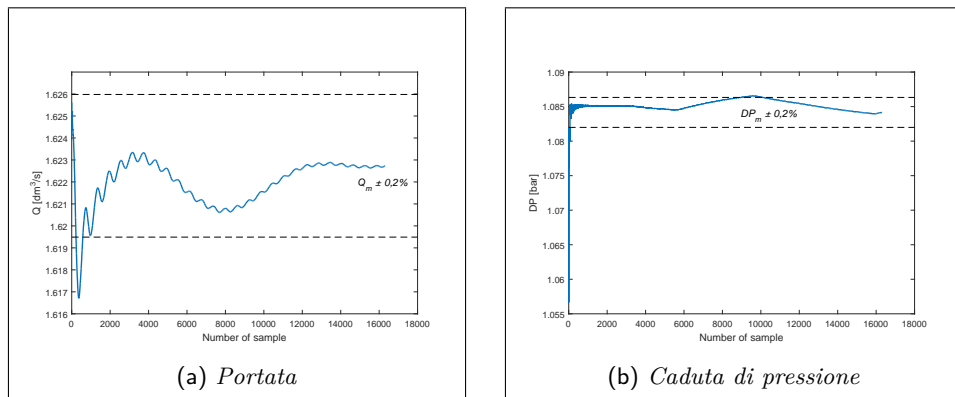


Figura 4.14: H₂O: Andamenti delle medie cumulate di portata e pressione - Prova 2

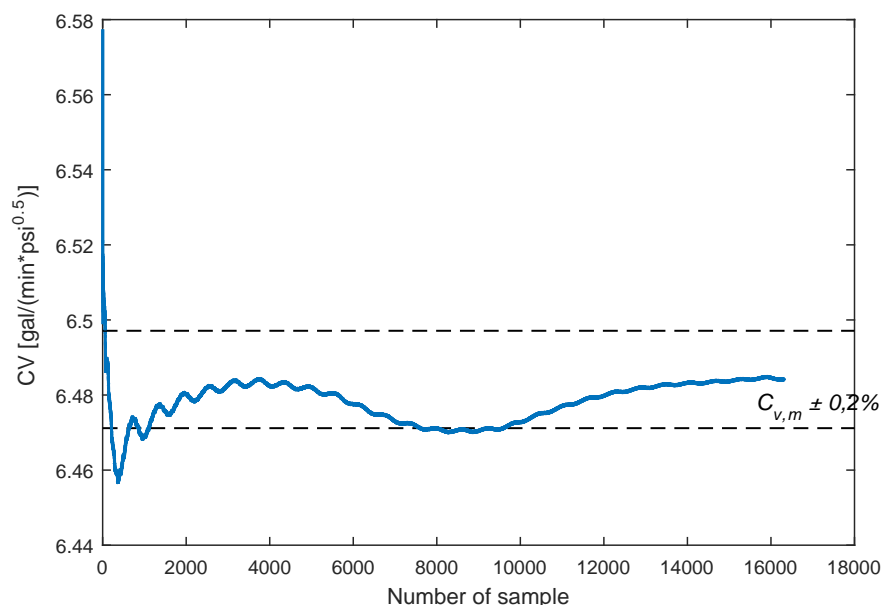


Figura 4.15: H₂O: Andamento della media cumulata del coefficiente di flusso - Prova 2

Si è calcolato che il discostamento massimo dei dati sperimentali dal valore medio è pari al 0,7%.

Confrontando i grafici 4.11 e 4.2 con quello riferito a questo piatto (4.16), è possibile notare che nei primi i punti sono abbastanza ordinati, definiti ad intervalli piuttosto costanti del numero di Reynolds; nell'ultimo, invece, si può riconoscere una nuvola di punti sparsi. Questo è dovuto al fatto che con i piatti con fori maggiori la portata è stata regolata unicamente con la valvola situata a valle della sezione di test; per le prove con questo piatto, invece, la regolazione con entrambe le valvole (a monte e a valle della sezione di test), per il mantenimento della pressione di monte, non ha permesso il controllo della portata transitante.

Non è nuovamente possibile determinare il coefficiente di recupero F_L a causa della difficoltà di individuare il valore di Q_{max} . Si riporta comunque il grafico che mostra l'andamento della portata in funzione della caduta di pressione (figura 4.17): si nota che i due parametri sono legati da una relazione lineare, che si mantiene per l'intero range considerato.

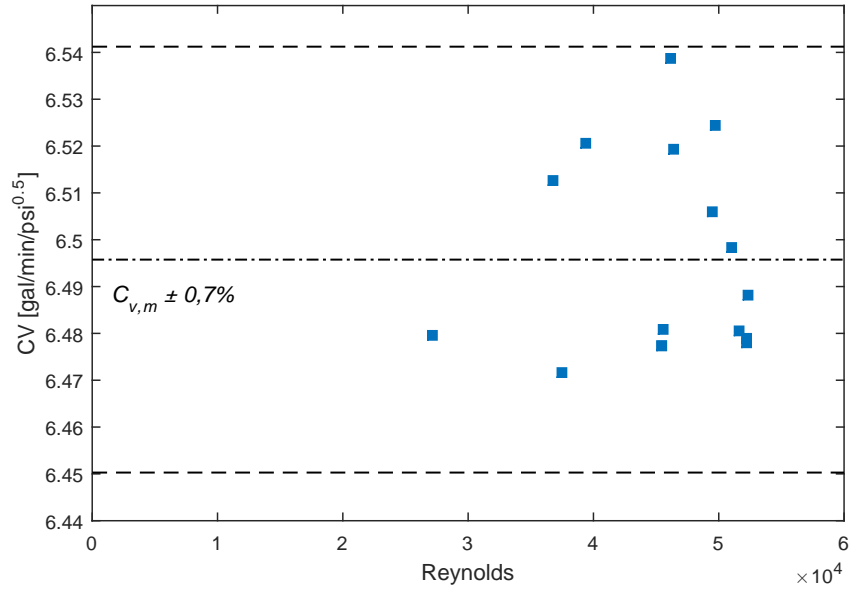


Figura 4.16: H₂O: Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re

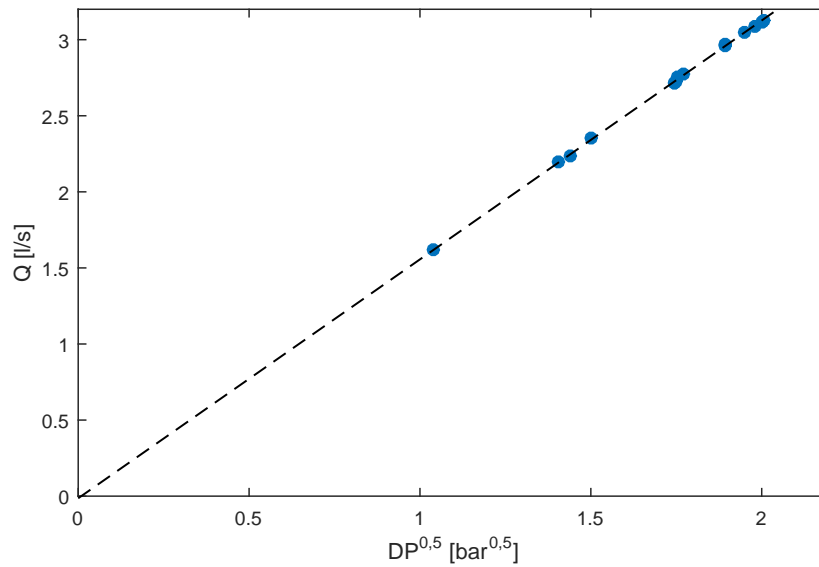


Figura 4.17: H₂O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione

Incorporando a questi i dati acquisiti durante le prove per lo studio della cavitazione D la portata non sembra stabilizzarsi su un valore massimo, ma continua ad aumentare, non consentendo il calcolo del coefficiente di recupero F_L .

o $\beta = 0,06$

Per questo piatto valgono tutte le considerazioni e le condizioni operative seguite per il piatto caratterizzato da un valore di β pari a 0,18. Sono state effettuate 13 prove, nella tabella 4.4 sono quindi riportate la grandezze principali caratteristiche medie per ogni prova.

Tabella 4.4: H₂O: Risultati - $\beta = 0,06$

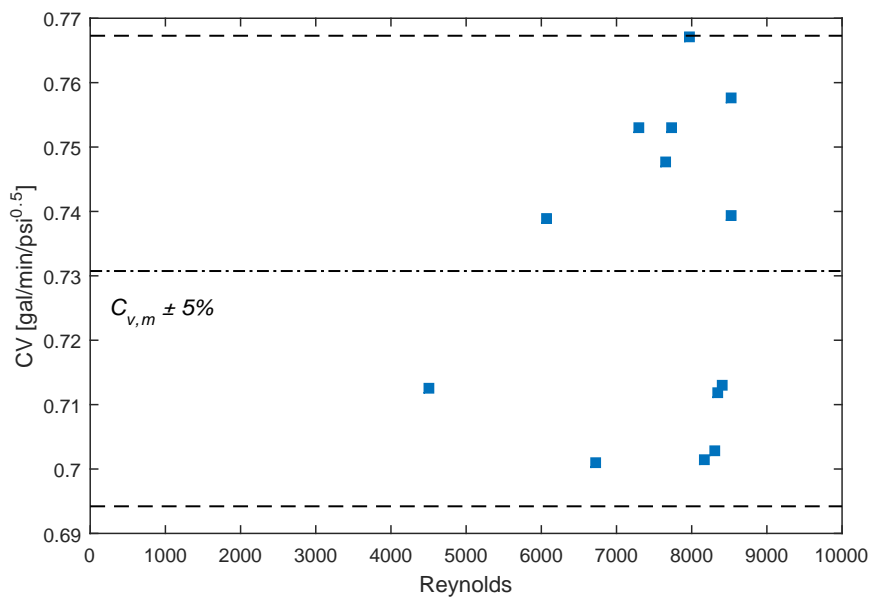
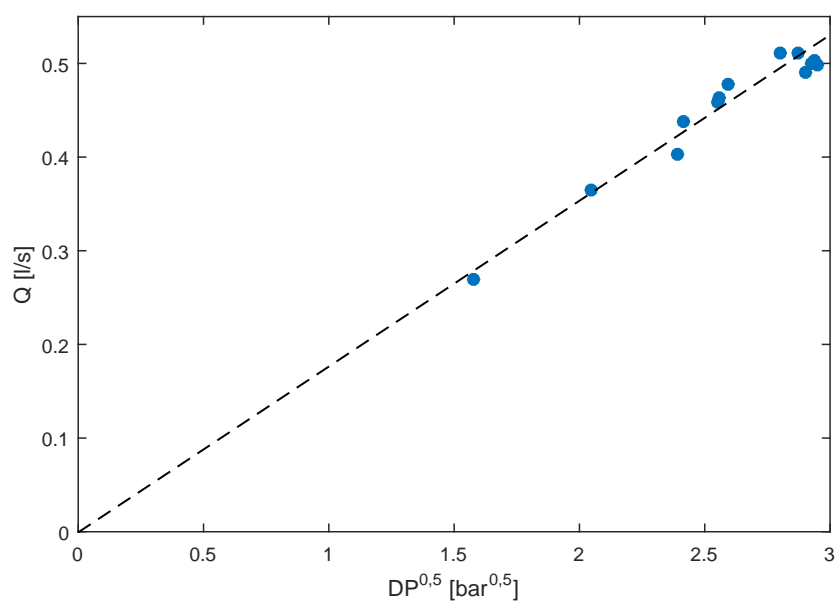
$\beta = 0,06$								
Prova	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	ρ_0 [$\frac{kg}{m^3}$]	Re [-]	C_V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	8,546	-0,014	8,686	0,498	997,92	999,10	8,31E+03	0,70
2	8,537	0,045	8,618	0,503	997,92	999,10	8,40E+03	0,71
3	8,531	0,114	8,544	0,500	997,92	999,10	8,35E+03	0,71
4	8,547	0,242	8,432	0,490	997,92	999,10	8,17E+03	0,70
5	8,541	0,422	8,246	0,510	997,92	999,10	8,52E+03	0,74
6	8,544	0,821	7,849	0,510	997,92	999,10	8,52E+03	0,76
7	8,541	1,951	6,710	0,478	997,92	999,10	7,98E+03	0,77
8	8,536	2,928	5,724	0,403	997,92	999,10	6,73E+03	0,70
9	8,555	2,841	5,831	0,437	997,92	999,10	7,30E+03	0,75
10	8,539	2,128	6,532	0,463	997,92	999,10	7,72E+03	0,75
11	8,546	2,168	6,500	0,458	997,92	999,10	7,65E+03	0,75
12	8,536	4,450	4,199	0,364	997,92	999,10	6,08E+03	0,74
13	8,542	6,174	2,482	0,270	997,92	999,10	4,51E+03	0,71

Il grafico 4.18 mostra l'andamento del coefficiente di flusso al variare del numero di Reynolds, oltre all'indicazione della variabilità dei dati: il C_V medio per questo piatto vale:

$$C_{V,m} = 0,73 \frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}} \quad (4.3)$$

Si è calcolato che il discostamento massimo dei dati sperimentali dal valore medio è pari al 5%.

Studiando poi l'andamento della portata in funzione della caduta di pressione (figura 4.19), si nota che le due grandezze sono legate da una relazione lineare, anche se, come nel caso del piatto caratterizzato da un valore di β pari a 0,47, alla fine sembra che la portata tenda a crescere meno allontanandosi dalla retta di interpolazione, a causa del possibile insorgere della cavitazione. Questo andamento, però, potrebbe essere semplicemente dovuto ad una maggiore dispersione dei punti rispetto a tale retta. Per

Figura 4.18: H₂O: Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re Figura 4.19: H₂O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione

comprendere se è stato davvero raggiunto il valore di Q_{max} sarebbe stato opportuno eseguire altre prove, aumentando ulteriormente il valore di P_1 ; purtroppo ciò non è stato possibile in quanto è stata raggiunta la condizione di pressione massima permessa dal gruppo pressione.

Per riassumere i risultati ottenuti con tutti i provini utilizzati, in figura 4.20 è riportato il grafico che mostra i valori di coefficiente di flusso C_V ottenuti per ogni piatto.

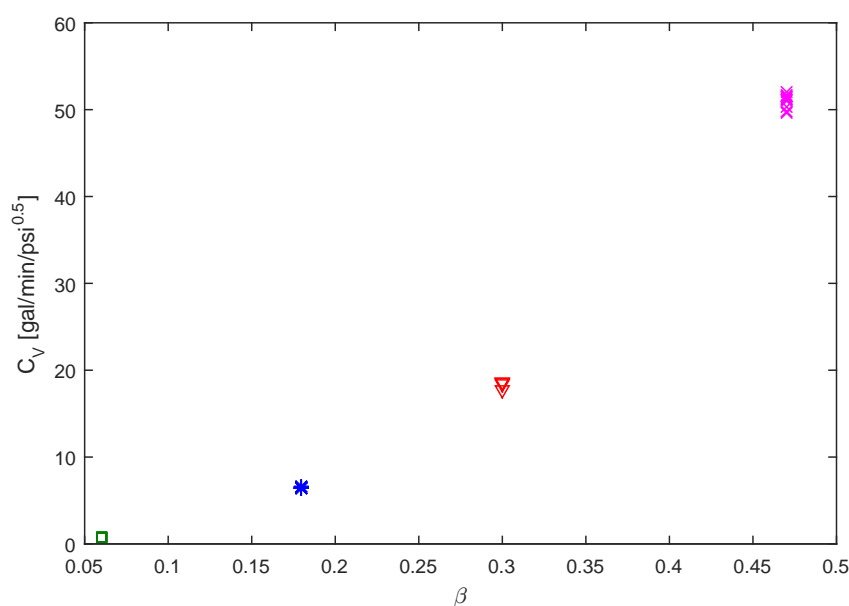


Figura 4.20: H₂O: Relazione tra portata e radice quadrata della caduta di pressione

L'impossibilità di determinare un valore massimo di portata per la determinazione del coefficiente di recupero F_L per tre dei quattro piatti considerati può essere motivata dal fatto che i valori dei coefficienti β caratteristici sono piuttosto bassi, che significa che i diametri dei fori hanno dimensioni ridotte rispetto al diametro della tubazione. Questo potrebbe fare in modo che le bolle di vapore che si formano durante la cavitazione siano in grado di disperdersi subito dopo il diaframma non permettendo la limitazione della portata transitante.

Capitolo 5

Prove sperimentali in azoto liquido

In questo capitolo sono spiegate e motivate le condizioni operative che hanno caratterizzato tali prove. Sono riportati tutti gli intervalli di dati acquisiti, accompagnati dallo studio degli andamenti delle medie cumulate per verificarne la significatività.

5.1 Condizioni operative

Le prove in azoto liquido hanno necessitato di una certa attenzione nell'imposizione delle condizioni operative; in fase preliminare, infatti, non sono stati reperiti studi esistenti su prove di questo tipo e con questo fluido. Non è stato possibile, quindi, cercare di applicare condizioni operative già definite, come invece è avvenuto con le prove in acqua grazie alla normativa [7].

Prima di eseguire le prove vere e proprie è stato necessario raffreddare l'impianto fino al raggiungimento di temperature che consentissero il permanere dell'azoto allo stato liquido alle pressioni d'esercizio (fig. 2.1). Questa operazione è avvenuta regolando la pressione con cui l'azoto è stato immesso nell'impianto ad un valore abbastanza alto, in modo da permettere la presenza di azoto allo stato liquido a temperature di processo più elevate. Mantenendo quindi chiusa la valvola DN40 situata a valle dell'impianto è stato possibile aumentare la pressione al suo interno, provocando però un aumento della temperatura, data la velocità nulla. Regolando l'apertura di tale valvola si è cercato di consentire il continuo abbassamento della temperatura e contemporaneamente il mantenimento della pressione a livelli accettabili.

Una volta raggiunte le condizioni che permettono la presenza e la permanenza di azoto liquido all'interno dell'impianto è stato possibile cominciare le prove mirate alla misura della perdita di carico a cavallo dei piatti forati.

Le prove sono state eseguite variando la portata transitante più volte durante ogni acquisizione; questo procedimento si è rivelato necessario data la disponibilità di un volume prefissato di azoto che, siccome è stato scaricato in atmosfera, non è stato ovviamente possibile recuperare.

Il primo piatto montato sull'impianto è stato quello caratterizzato da $\beta = 0,47$.

Già dalla prima acquisizione ci si è accorti, come era prevedibile, che tentare di regolare il flusso mediante la valvola DN40 è molto difficoltoso. Studiando le dissipazioni lungo l'impianto (appendice C), infatti, è stato ricavato che la perdita di carico dovuta al brusco passaggio ad un tratto di tubo con diametro pari a $1/4$ di quello della linea principale e le perdite distribuite lungo il tubo flessibile sono superiori a quelle che si hanno nella valvola. Siccome la prima prova ha evidenziato questa difficoltà, si è deciso di testare un altro provino, precisamente quello caratterizzato da un coefficiente β pari a 0,18, presupponendo che, aumentando la caduta di pressione a cavallo del piatto, la regolazione della portata risultasse più agevole. Come si vedrà nel prossimo capitolo, in effetti, i dati acquisiti hanno presentato, a prima vista, una maggiore significatività, ma comunque non sufficiente da permettere di individuare univocamente intervalli di dati indicativi per il calcolo del coefficiente di flusso.

A questo punto si è venuti a conoscenza dell'esistenza di una valvola sull'autocisterna che avrebbe permesso di regolare il flusso direttamente a monte dell'impianto. L'utilizzo di questa valvola ha decisamente migliorato i dati acquisiti nelle prove che sono succedute, che hanno ovviamente coinvolto anche i piatti già testati in precedenza.

I test successivi si sono quindi svolti impostando un certo valore di pressione di monte dall'autocisterna e regolando il flusso ad intervalli di circa 30 secondi; se, poi, tale valore di pressione non fosse più stato sufficiente per rilevare la portata transitante, sarebbe bastato aumentare ulteriormente la pressione di monte e procedere nuovamente a regolare il flusso.

Tabella 5.1: Prove con azoto liquido

Prova	β [-]	Frequenza d'acquisizione [Hz]
1	0,47	50
2	0,18	50
3	0,18	150
4	0,18	150
5	0,06	150
6	0,06	150
7	0,30	150
8	0,47	150

La frequenza di acquisizione è stata inizialmente impostata a 50 Hz, poi, nel momento in cui ci si è resi conto della possibilità di acquisire dati maggiormente significativi, è stata aumentata a 150 Hz.

In tutto sono state eseguite 8 prove, riportate in tabella 5.1.

5.2 Risultati

Di seguito si riportano i dati acquisiti e le osservazioni effettuate dopo la loro elaborazione.

Si noti che nella determinazione del coefficiente di flusso è presente un'ulteriore difficoltà rispetto alle prove eseguite in acqua: i valori di densità e di viscosità dell'azoto, infatti, sono fortemente sensibili alle variazioni di pressione e di temperatura. E' stato quindi necessario elaborare i dati mediante un codice Matlab che, in base ai valori medi di temperatura e pressione registrati, considerasse i valori corretti di densità e di viscosità, usufruendo delle tabelle riportate nelle appendici A e B. Siccome non si dispone di risultati noti a cui fare riferimento, tra i dati acquisiti durante le prove sono stati selezionati alcuni intervalli, cercando un buon compromesso tra la loro ampiezza e la stabilità dei dati in essi contenuti.

Per ogni prova è stata eseguita un'elaborazione basata sullo studio dell'andamento delle medie cumulate. Nello specifico, per ogni intervallo di dati scelto, sono stati presi in considerazione i valori di portata e di caduta di pressione, in quanto rappresentano le grandezze che definiscono il coefficiente di flusso C_V , il cui andamento è anch'esso valutato all'interno di ogni intervallo. Per le tre serie di dati (portata, caduta di pressione e C_V), poi, è stato studiato l'andamento della media cumulata per verificare che tendesse a stabilizzarsi attorno al valore medio. Da una mancata convergenza della media cumulata di portata o caduta di pressione, infatti, facilmente consegue un cattivo andamento della media cumulata del coefficiente di flusso.

Per verificare la bontà degli andamenti è stato scelto un intervallo di confidenza, pari al valore medio della variabile considerata $\pm 0,2\%$. La tendenza delle medie cumulate a stabilizzarsi all'interno dell'intervallo di confidenza è indice di significatività dei dati, che quindi possono essere ritenuti valevoli per la determinazione del coefficiente di flusso, e quindi per la caratterizzazione dei piatti forati in azoto liquido.

Prova 1

In figura 5.1 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti prima della loro conversione in unità ingegneristiche, sono stati evidenziati i due intervalli di dati presi in considerazione.

La tabella 5.2 riporta le grandezze medie maggiormente significative nei due intervalli di dati scelti.

Tabella 5.2: N₂: Grandezze caratteristiche - Prova 1

Prova 1 - $\beta = 0,47$									
Intervallo	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T ₃ [°C]	P ₁ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	μ [$\times 10^{-5}$ Pa · s]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	-180,6	-181,6	-184,0	5,06	0,007	1,736	746,56	9,23	77,64
2	-182,6	-183,4	-185,5	4,95	0,007	1,202	752,19	9,55	51,15

Si riportano gli andamenti delle medie cumulate di portata, caduta di pressione e coefficiente di flusso, con i relativi intervalli di confidenza (fig. 5.2 e 5.3).

Osservando i grafici relativi ai due intervalli di dati si può notare come, in entrambi i casi, la media cumulata della portata rientra nell'intervallo di confidenza del valore medio solo nella parte finale, questo significa che la portata media è ancora molto sensibile al numero di dati considerati. Questo comportamento si riflette anche nella media cumulata del coefficiente di flusso. Per questo motivo, quindi, si decide di non ritenere significativi questi intervalli di dati.

Si può concludere che questa prima prova non ha condotto all'acquisizione di dati significativi per la determinazione del coefficiente di flusso.

In tabella 5.3 si riassumono i dati caratteristici degli intervalli individuati.

Tabella 5.3: N₂: Riepilogo dati della Prova 1

Prova 1 - $\beta = 0,47$				
Intervallo	Q [$\frac{dm^3}{s}$]	ΔP [bar]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]	Significativo?
1	1,736	0,0066	77,64	NO
2	1,202	0,0073	51,51	NO

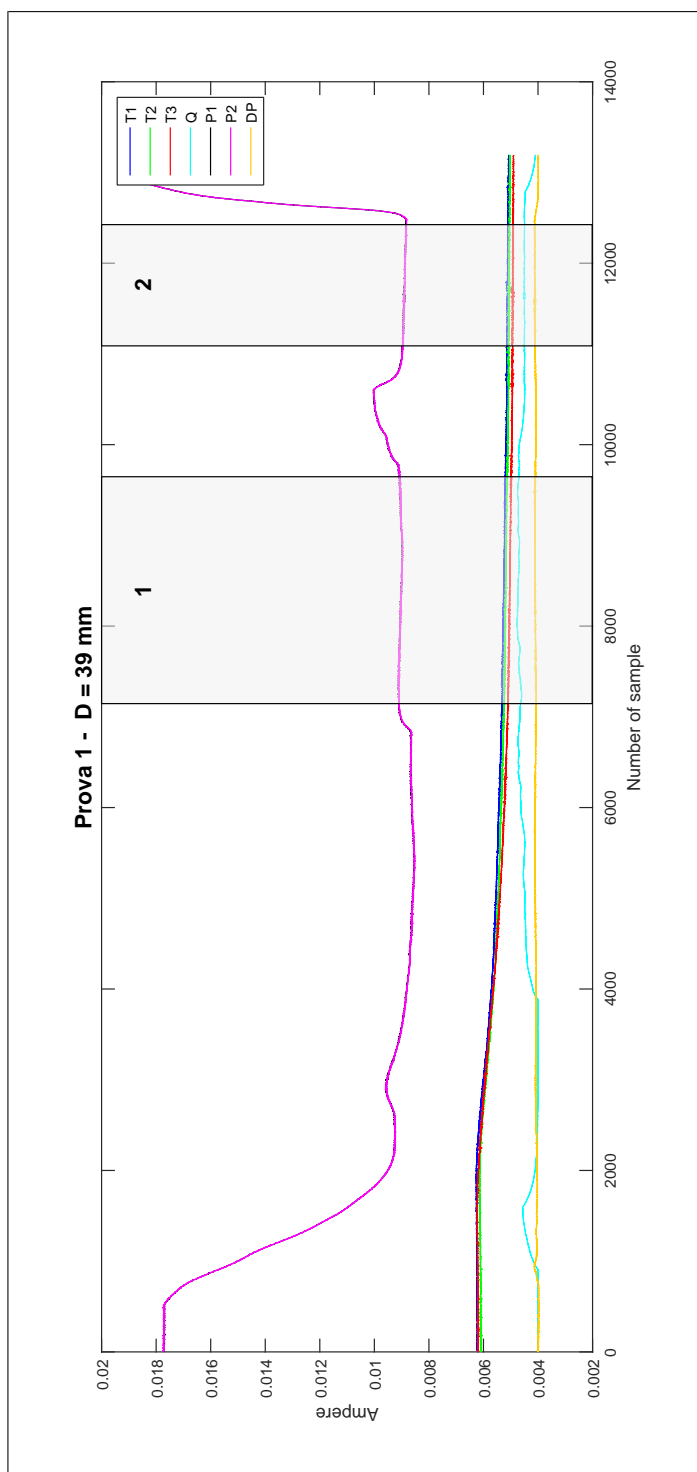


Figura 5.1: N₂: Prova 1 - Dati acquisiti in unità di corrente

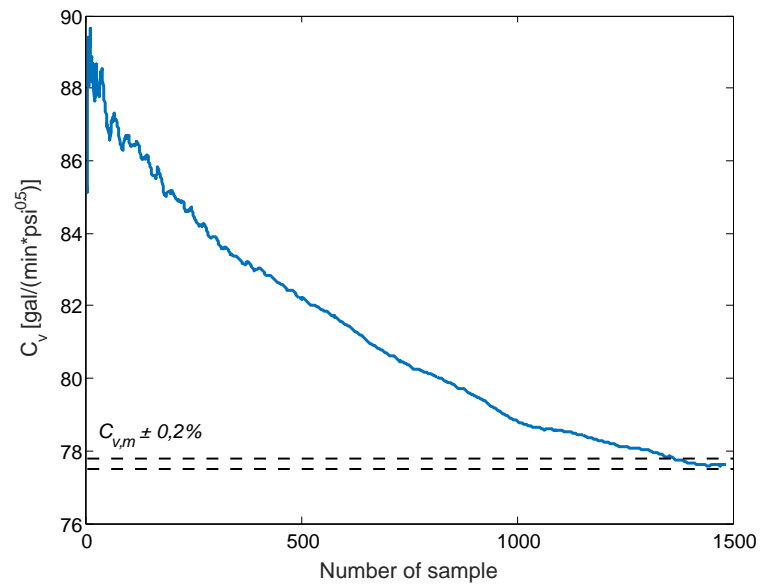
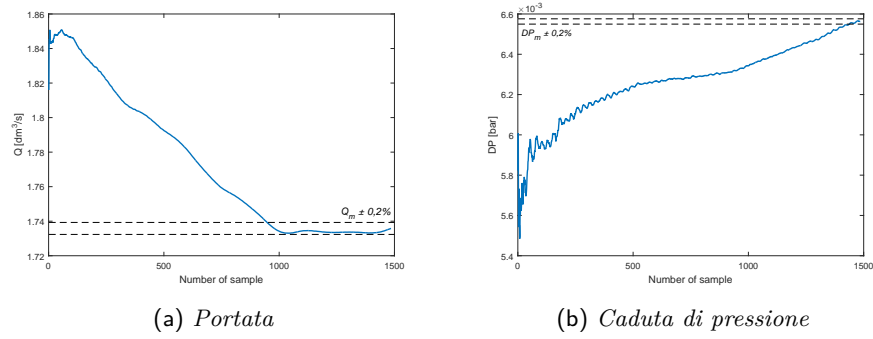
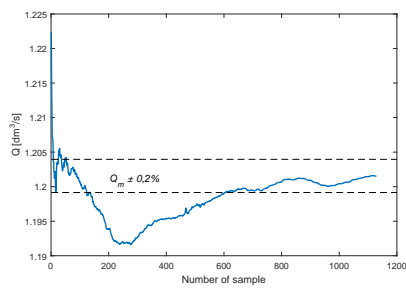
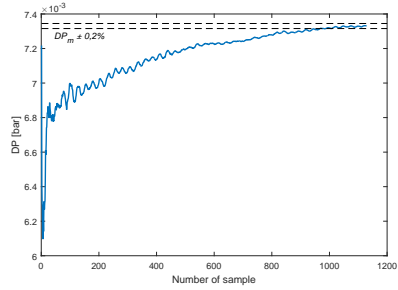
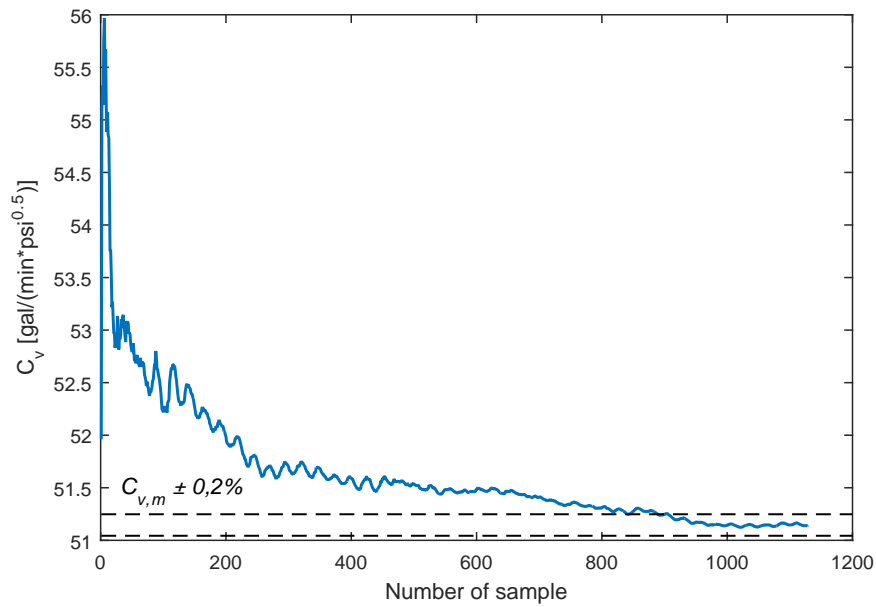


Figura 5.2: N₂: Prova 1.1 - Andamenti delle medie cumulate

(a) *Portata*(b) *Caduta di pressione*(c) *Coefficiente di flusso*Figura 5.3: N₂: Prova 1.2 - Andamenti delle medie cumulate

Prova 2

In figura 5.4 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti prima della loro conversione in unità ingegneristiche, sono stati evidenziati i sei intervalli di dati presi in considerazione.

La tabella 5.4 riporta le grandezze medie maggiormente significative nei due intervalli di dati scelti.

Tabella 5.4: N₂: Grandezze caratteristiche - Prova 2

Prova 2 - $\beta = 0,18$									
Intervallo	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T ₃ [°C]	P ₁ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	μ [$\times 10^{-5}$ Pa · s]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	-181,3	-182,8	-185,7	4,90	0,387	1,678	752,19	9,55	9,74
2	-181,8	-183,1	-185,8	4,88	0,407	1,423	752,19	9,55	8,06
3	-182,5	-183,9	-186,4	4,71	0,385	1,101	757,49	9,88	6,43
4	-183,0	-184,3	-186,6	4,61	0,368	1,376	757,21	9,86	8,23
5	-183,3	-184,5	-186,6	4,58	0,356	1,389	762,42	10,20	8,45
6	-184,1	-185,1	-186,9	5,03	0,389	1,094	762,71	10,23	6,38

Si riportano gli andamenti delle medie cumulate di portata, caduta di pressione e coefficiente di flusso, con i relativi intervalli di confidenza (fig. 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10).

Osservando gli andamenti delle medie cumulate relative ai primi 5 intervalli, si può osservare che, mentre la pressione media si mantiene, per quasi l'intera serie, all'interno dell'intervallo di confidenza, la portata non si comporta altrettanto bene. Innanzitutto si può notare che l'andamento converge attorno al valore medio solamente nella parte finale, che quindi è molto sensibile al numero di campioni considerati. Ne consegue che, per questi intervalli, nemmeno l'andamento della media cumulata del coefficiente di flusso risulta soddisfacente. Per questo motivo si decide di non ritenere significativi questi intervalli di dati.

Per quanto riguarda l'intervallo 6, invece, si può notare che l'andamento della media cumulata della portata è molto buono: questa, infatti, si mantiene costantemente all'interno dell'intervallo di confidenza. La caduta di pressione, invece, mostra lo stesso comportamento osservato per la portata nei primi cinque intervalli. Nonostante ciò, le analisi delle prove eseguite hanno permesso di considerare che, nella maggior parte dei casi, la bontà del coefficiente di flusso dipende principalmente dalla bontà dei valori di portata acquisiti. Questa osservazione è confermata dal fatto che nella formula del coefficiente di flusso 2.1 la caduta di pressione compare sotto radice quadrata, il che vuol dire che il C_V risente di eventuali variazioni in misura minore di quanto invece non accada con la portata.

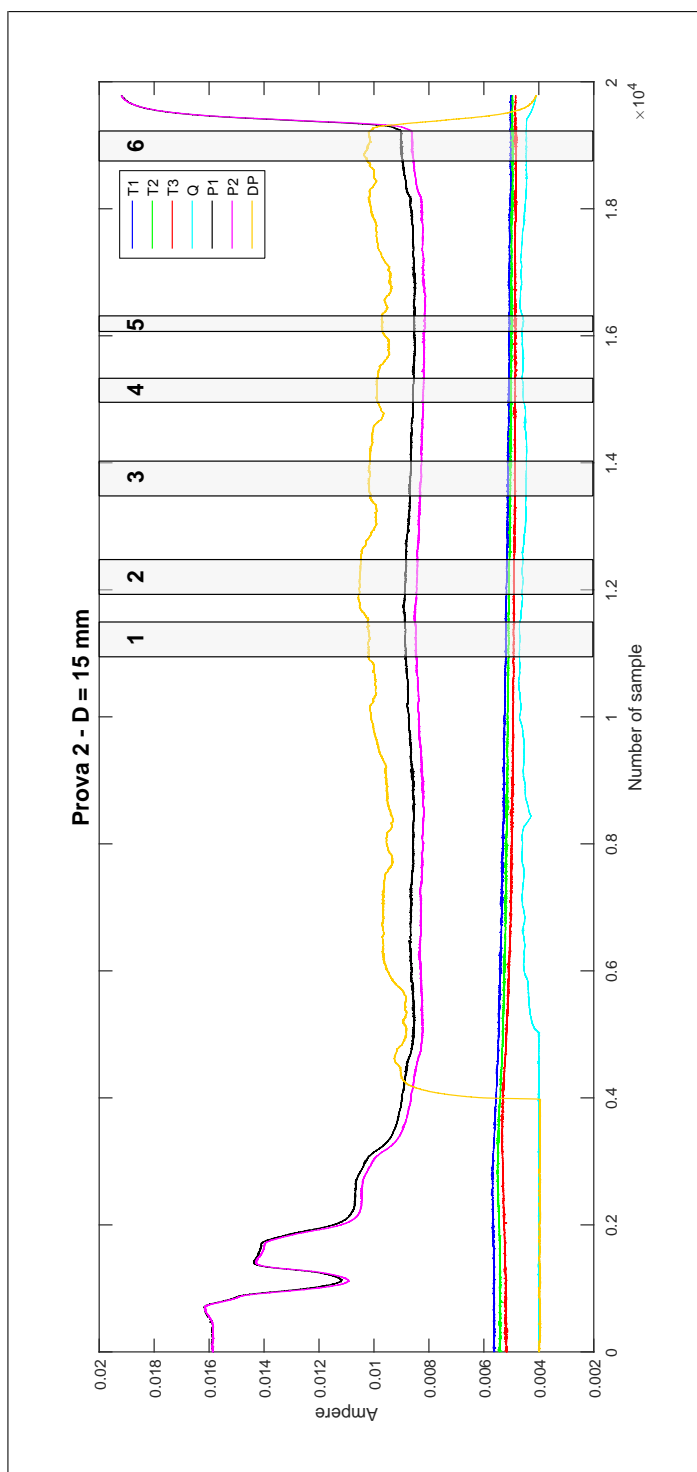


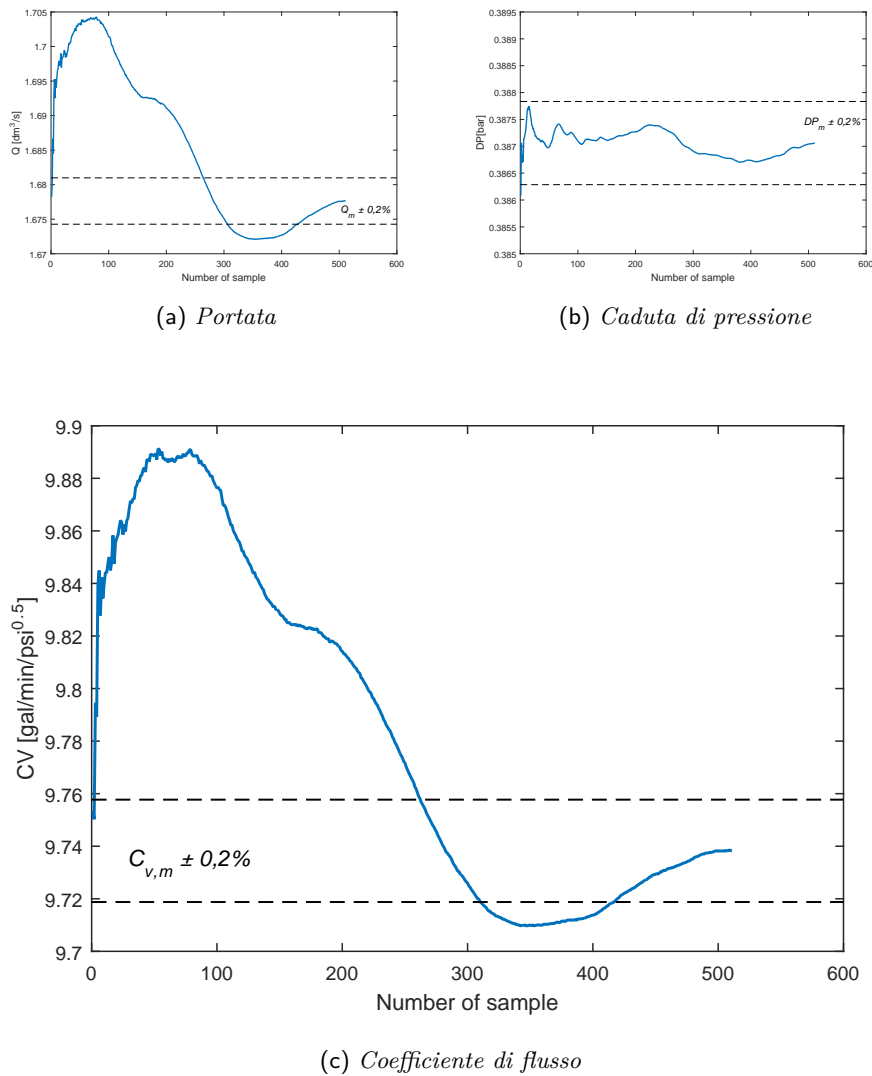
Figura 5.4: N₂: Prova 2 - Dati acquisiti in unità di corrente

Il buon andamento della media cumulata del coefficiente di flusso, infatti, porta a considerare significativo questo intervallo di dati.

In tabella 5.5 si riassumono i dati caratteristici degli intervalli individuati.

Tabella 5.5: N₂: Riepilogo dati della Prova 2

Prova 2 - $\beta = 0,18$				
Intervallo	Q $\left[\frac{dm^3}{s}\right]$	ΔP [bar]	C _V $\left[\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}\right]$	Significativo?
2	1,678	0,3871	9,74	NO
2	1,423	0,4074	8,06	NO
2	1,101	0,3853	6,43	NO
2	1,376	0,3682	8,23	NO
2	1,389	0,3564	8,45	NO
2	1,094	0,3889	6,38	SI

Figura 5.5: N₂: Prova 2.1 - Andamenti delle medie cumulate

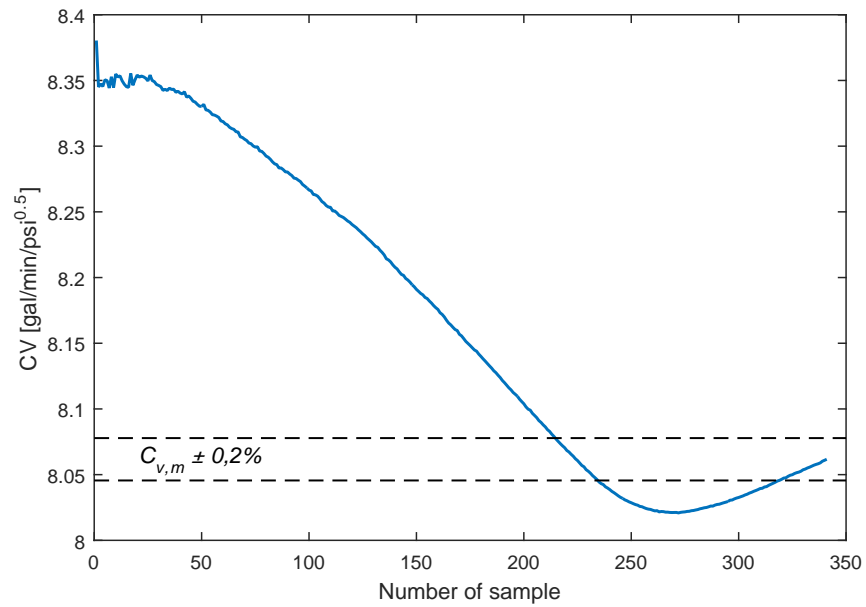
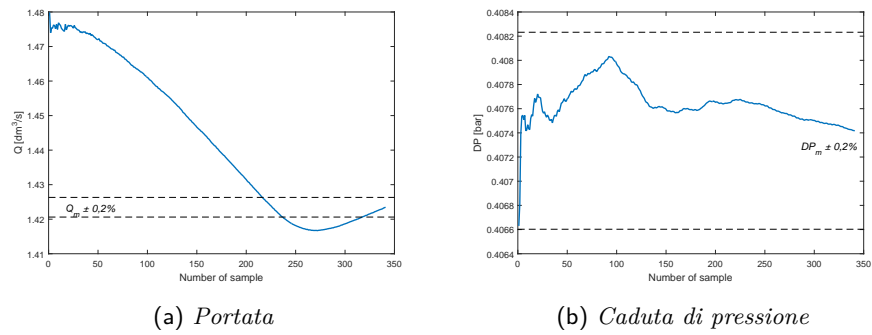
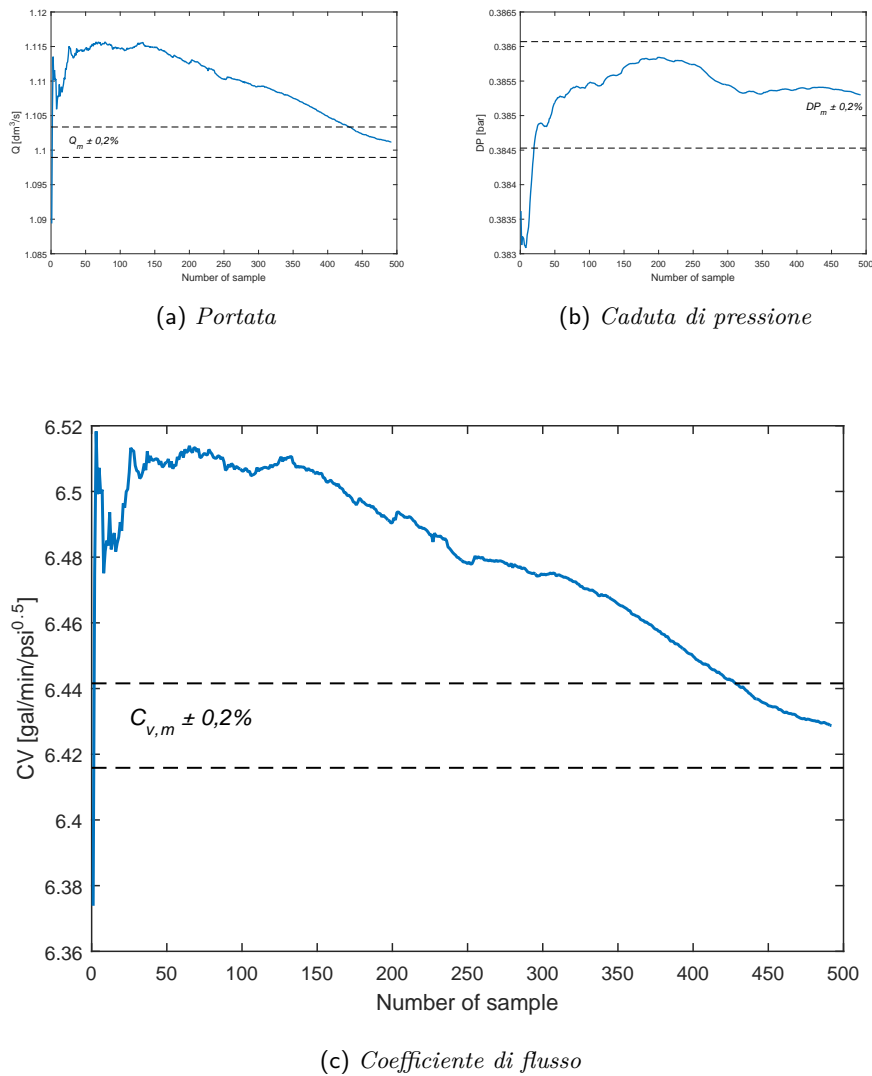
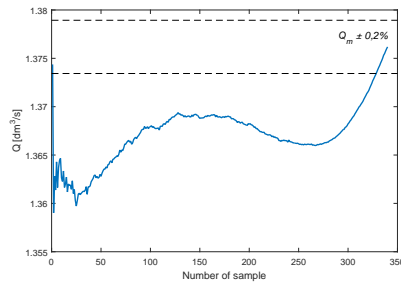
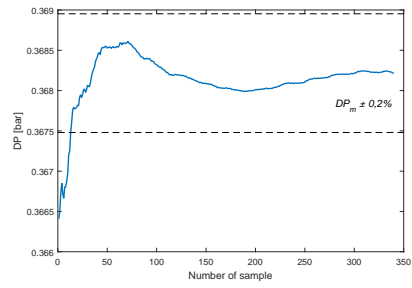


Figura 5.6: N₂: Prova 2.2 - Andamenti delle medie cumulate

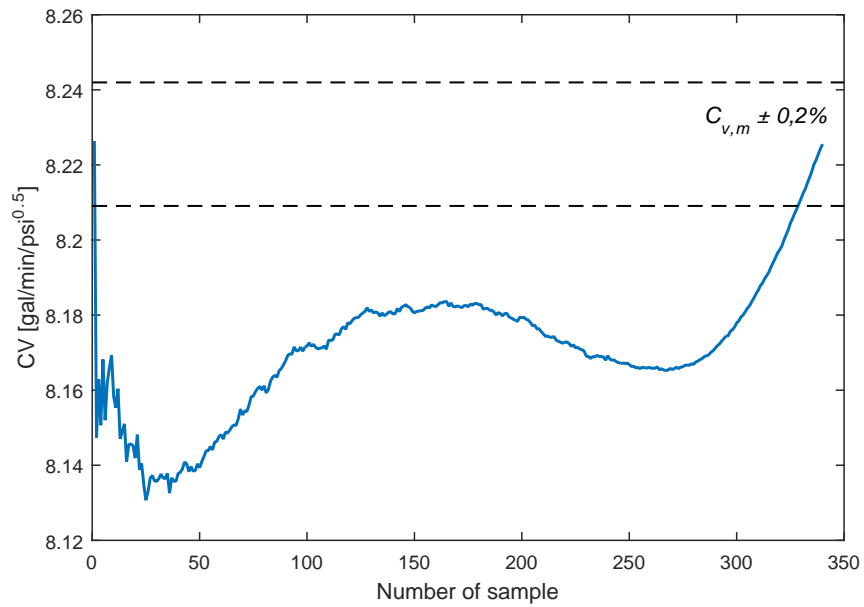
Figura 5.7: N_2 : Prova 2.3 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata

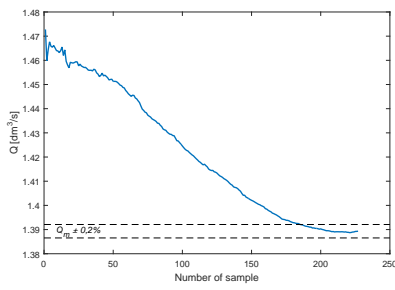
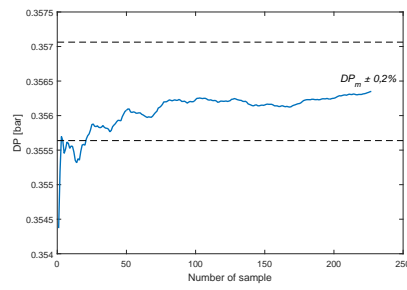
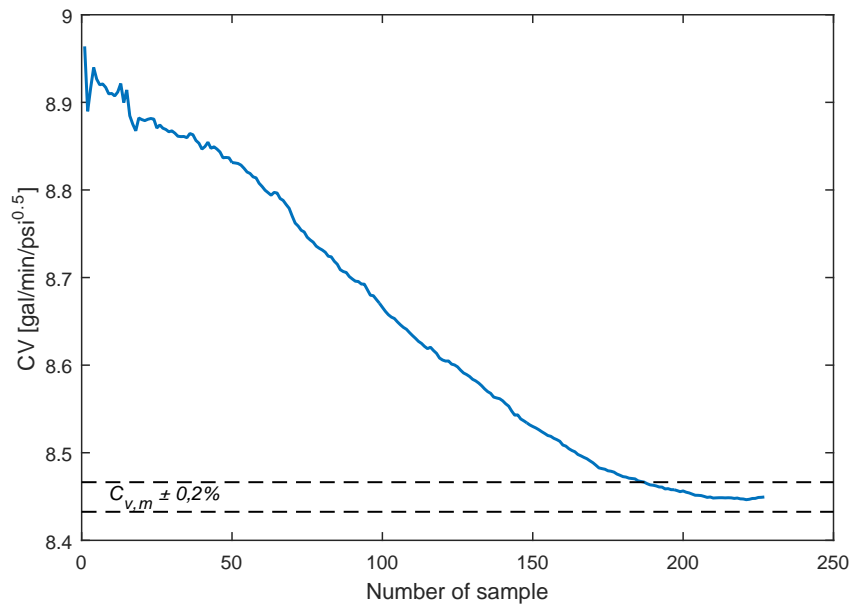


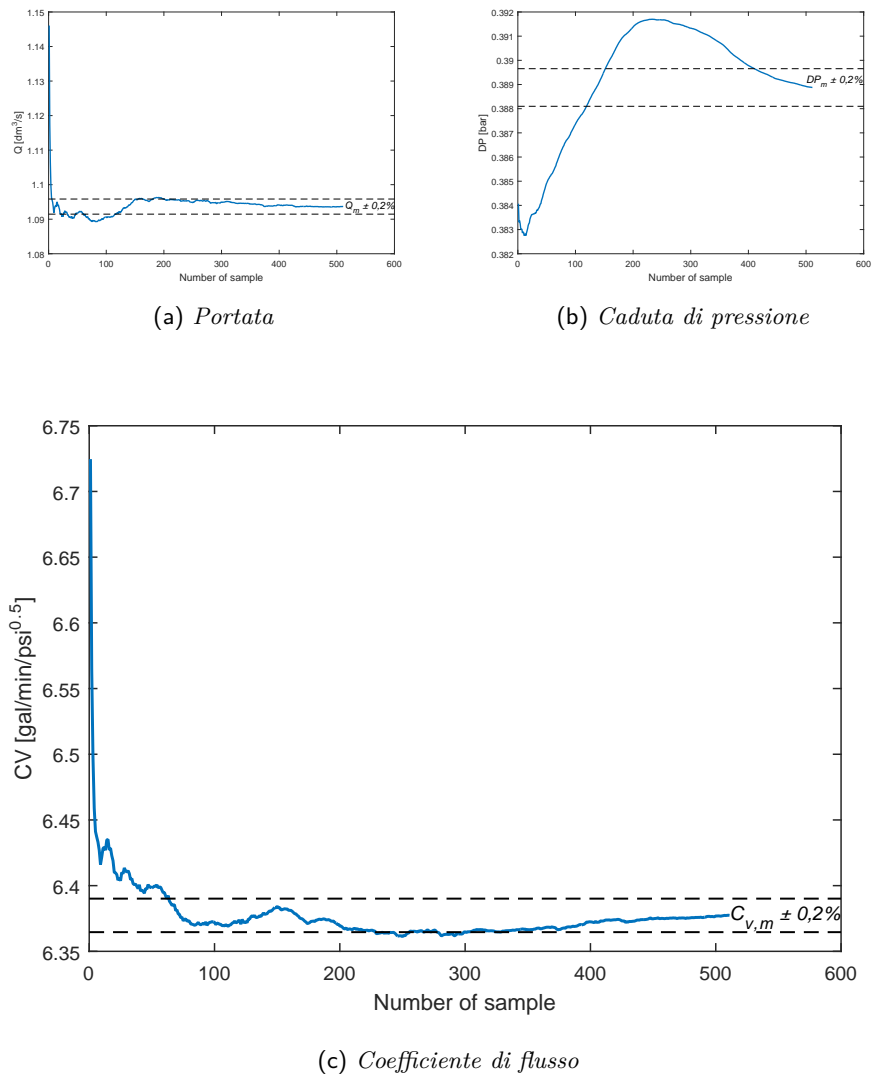
(b) Caduta di pressione



(c) Coefficiente di flusso

Figura 5.8: N₂: Prova 2.4 - Andamenti delle medie cumulate

(a) *Portata*(b) *Caduta di pressione*(c) *Coefficiente di flusso*Figura 5.9: N₂: Prova 2.5 - Andamenti delle medie cumulate

Figura 5.10: N_2 : Prova 2.6 - Andamenti delle medie cumulate

Prova 3

In figura 5.11 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti prima della loro conversione in unità ingegneristiche, sono stati evidenziati i tre intervalli di dati presi in considerazione.

La tabella 5.6 riporta le grandezze medie maggiormente significative nei due intervalli di dati scelti.

Tabella 5.6: N₂: Grandezze caratteristiche - Prova 3

Prova 1 - $\beta = 0,47$									
Intervallo	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T ₃ [°C]	P ₁ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	μ [$\times 10^{-5}$ Pa · s]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	-182,4	-183,7	-186,1	13,51	0,566	1,324	760,18	10,07	6,38
2	-183,4	-184,8	-187,0	11,62	0,479	1,227	764,65	10,38	6,46
3	-184,1	-185,5	-187,4	8,71	0,314	1,031	763,97	10,33	6,70

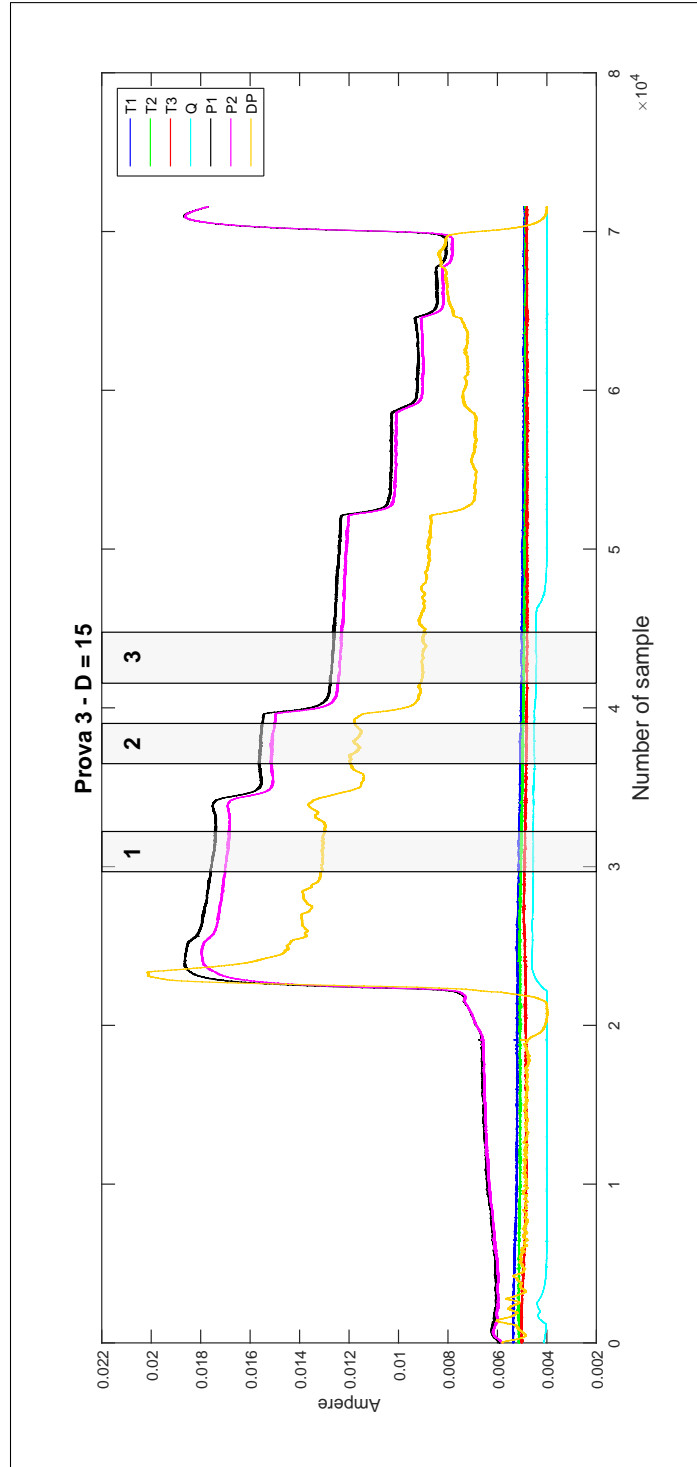
Si riportano gli andamenti delle medie cumulate di portata, caduta di pressione e coefficiente di flusso, con i relativi intervalli di confidenza (fig. 5.12, 5.13 e 5.14).

Per questa prova è necessario commentare separatamente i tre intervalli considerati.

Gli andamenti delle medie cumulate dei dati appartenenti al primo intervallo sono molto buone, in quanto sembrano convergere bene al valore medio.

A proposito del terzo intervallo di dati, invece, si ritrova che un cattivo andamento della media cumulata della portata si riflette su quello della media cumulata del coefficiente di flusso. Questo intervallo di dati, quindi, non viene considerato significativo.

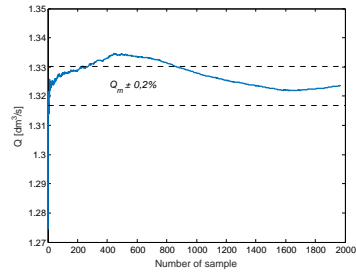
Per quanto riguarda i dati appartenenti al secondo intervallo è necessario fare qualche osservazione più precisa: sia l'andamento della media cumulata della caduta di pressione che della portata sembrano rientrare nell'intervallo di confidenza solo nella parte finale, come avviene anche osservando il grafico relativo al coefficiente di flusso. Nonostante ciò si può osservare che tutte e tre le curve terminano a tangente quasi orizzontale, il che farebbe pensare ad una certa stabilità del dato medio. Per decidere se considerare significativo questo intervallo di dati, si può osservare che ciascuna curva rientra all'interno dell'intervallo di confidenza per gli ultimi 500 dati circa. Sapendo che la frequenza di acquisizione è pari a 150 Hz e che l'intera prova coinvolge circa 2000 dati, si può stimare che la media cumulata si mantiene fuori dall'intervallo di confidenza per i primi 13 secondi, assestandosi attorno al valore medio solo gli ultimi 3 secondi. Questa riflessione conduce alla decisione di non ritenere significativo l'intervallo 2.

Figura 5.11: N₂: Prova 3 - Dati acquisiti in unità di corrente

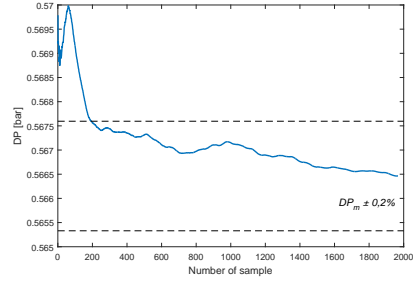
In tabella 5.7 si riassumono i dati caratteristici degli intervalli individuati.

Tabella 5.7: N₂: Riepilogo dati della Prova 3

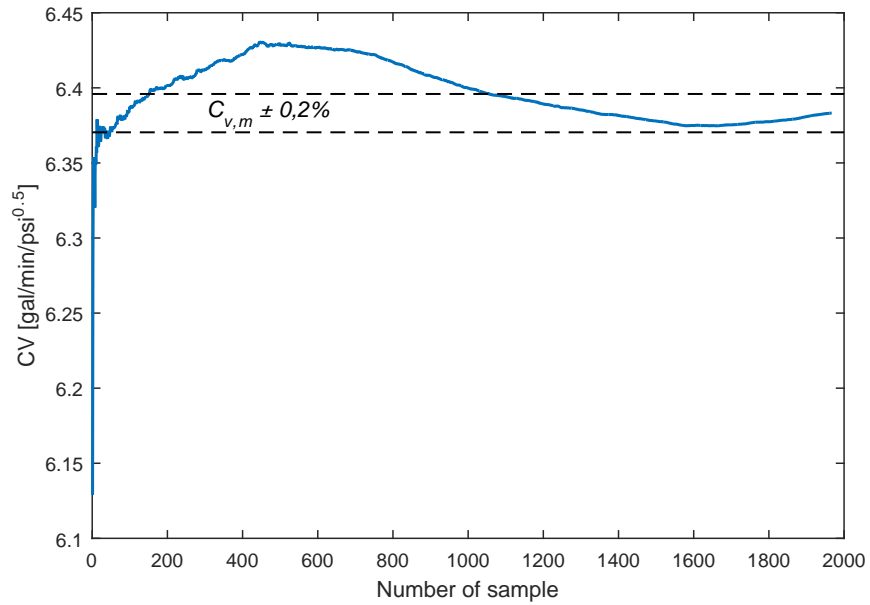
Prova 3 - $\beta = 0,18$				
Intervallo	Q $\left[\frac{dm^3}{s}\right]$	ΔP [bar]	C _V $\left[\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}\right]$	Significativo?
1	1,324	0,5665	6,38	<i>SI</i>
2	1,227	0,4792	6,46	<i>NO</i>
3	1,031	0,3141	6,70	<i>NO</i>



(a) Portata

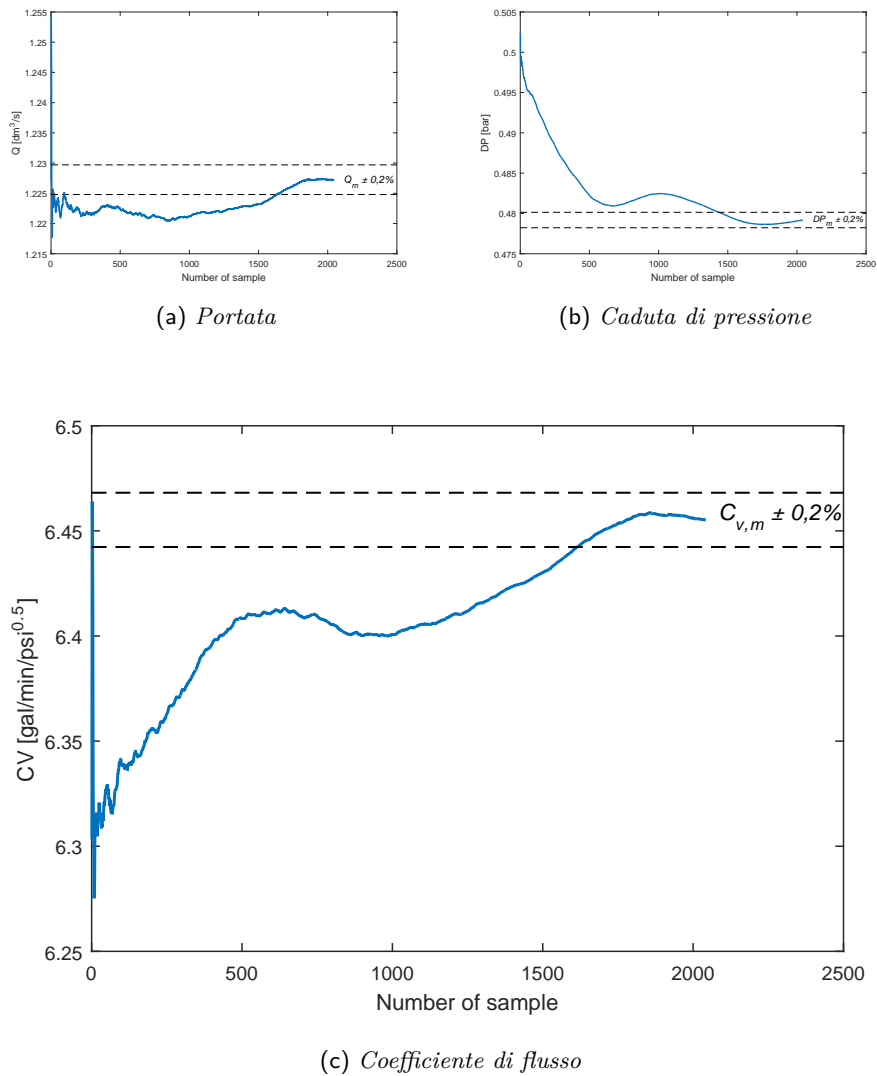


(b) Caduta di pressione



(c) Coefficiente di flusso

Figura 5.12: N₂: Prova 3.1 - Andamenti delle medie cumulate

Figura 5.13: N_2 : Prova 3.2 - Andamenti delle medie cumulate

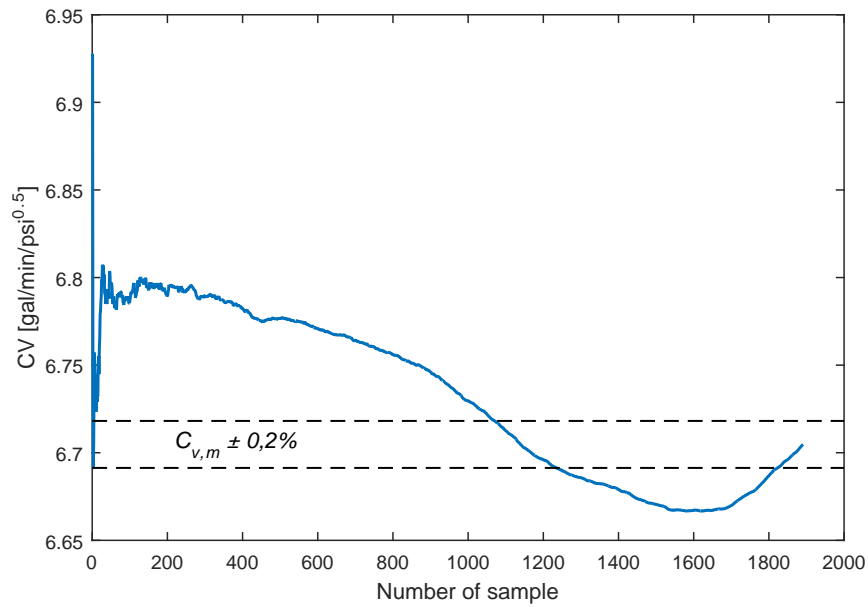
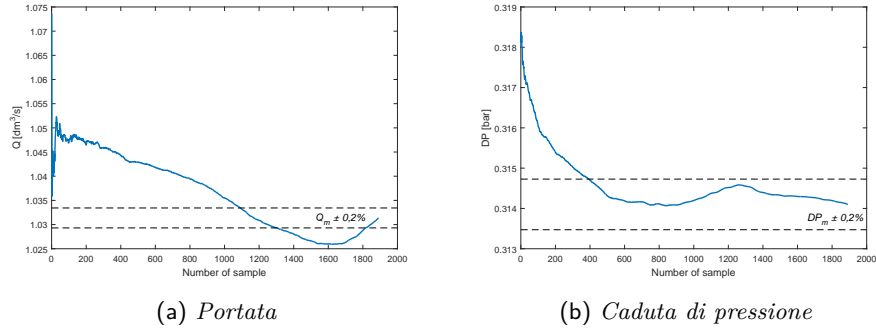


Figura 5.14: N_2 : Prova 3.3 - Andamenti delle medie cumulate

Prova 4

In figura 5.15 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti prima della loro conversione in unità ingegneristiche, sono stati evidenziati i sei intervalli di dati presi in considerazione.

La tabella 5.8 riporta le grandezze medie maggiormente significative nei due intervalli di dati scelti.

Tabella 5.8: N₂: Grandezze caratteristiche - Prova 4

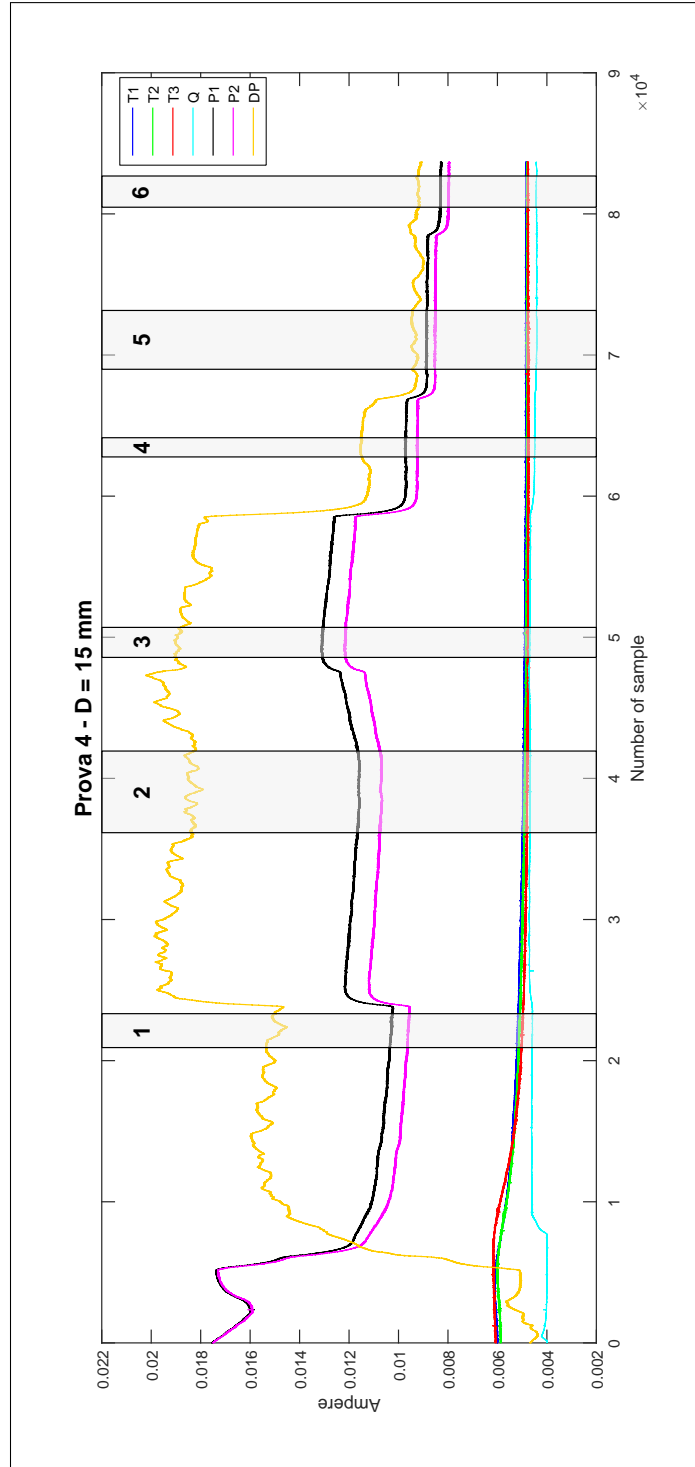
Prova 4 - $\beta = 0,18$									
Intervallo	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T ₃ [°C]	P ₁ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	μ [$\times 10^{-5}$ Pa · s]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	-181,0	-182,1	-183,8	6,40	0,683	1,409	746,96	9,25	6,15
2	-185,1	-186,0	-187,6	7,64	0,898	1,630	768,45	10,66	6,28
3	-186,1	-187,0	-188,1	9,13	0,936	1,674	774,12	11,11	6,33
4	-186,9	-187,6	-188,4	5,74	0,469	1,185	773,19	11,03	6,33
5	-186,9	-187,6	-188,2	4,90	0,334	0,997	772,89	11,01	6,31
6	-187,0	-187,6	-188,0	4,34	0,325	1,026	772,59	10,98	6,59

Si riportano gli andamenti delle medie cumulate di portata, caduta di pressione e coefficiente di flusso, con i relativi intervalli di confidenza (fig. 5.16, 5.17, 5.14, 5.19, 5.20 e 5.21).

Osservando gli andamenti delle medie cumulate delle grandezze considerate per gli intervalli 3, 4 e 5, si nota un ottimo comportamento; queste infatti tendono a stabilizzarsi attorno al valore medio per un periodo di tempo abbastanza consistente. Si ritiene, quindi, di poter considerare questi tre intervalli di dati significativi.

I grafici relativi ai valori medi di portata negli intervalli 1 e 2, invece, sono ancora caratterizzati da una mancata stabilizzazione attorno ai valori medi in uno spazio tale da poter stabilire una certa significatività.

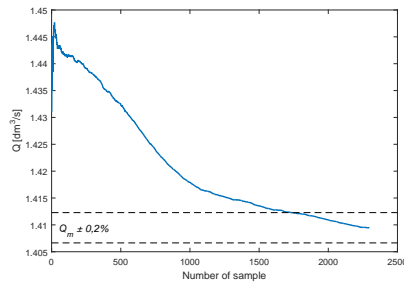
Il grafico della media cumulata della portata nell'intervallo 5 è assolutamente da ritenersi non significativo, in quanto non mostra un tendenza alla stabilizzazione attorno al valore medio.

Figura 5.15: N₂: Prova 4 - Dati acquisiti in unità di corrente

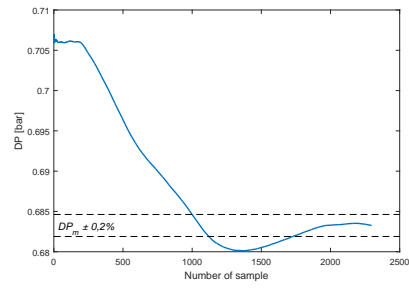
In tabella 5.9 si riassumono i dati caratteristici degli intervalli individuati.

Tabella 5.9: N₂: Riepilogo dati della Prova 4

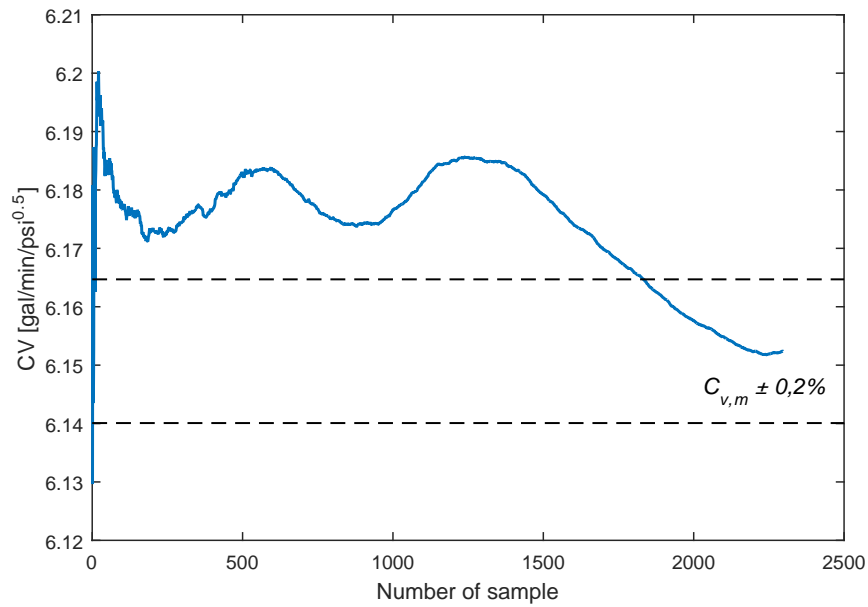
Prova 4 - $\beta = 0,18$				
Intervallo	Q [$\frac{dm^3}{s}$]	ΔP [bar]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]	Significativo?
1	1,409	0,6833	6,15	NO
2	1,630	0,8979	6,28	SI
3	1,674	0,9355	6,33	SI
4	1,185	0,4693	6,33	SI
5	0,997	0,3338	6,31	SI
6	1,026	0,3249	6,59	NO



(a) Portata

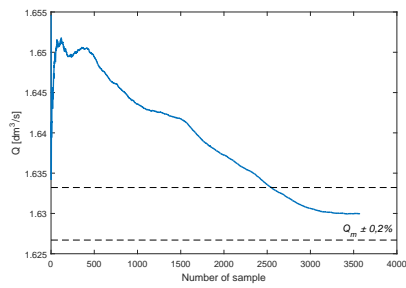


(b) Caduta di pressione

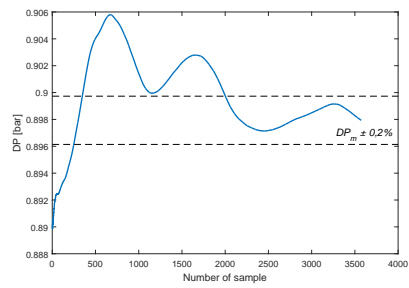


(c) Coefficiente di flusso

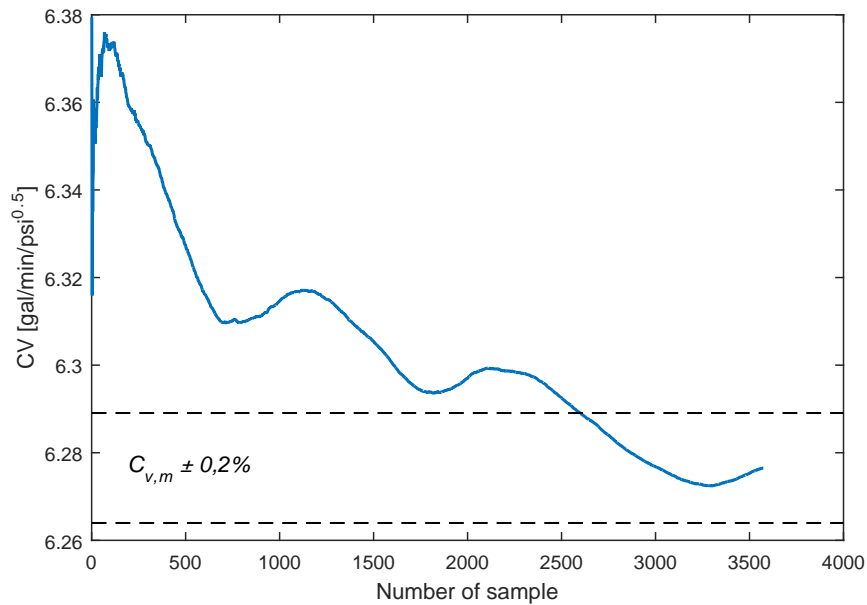
Figura 5.16: N₂: Prova 4.1 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata

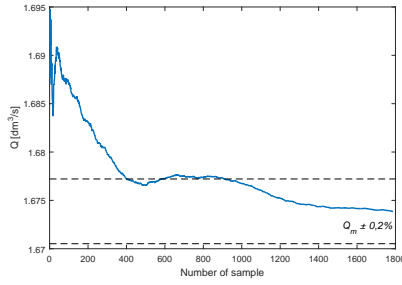
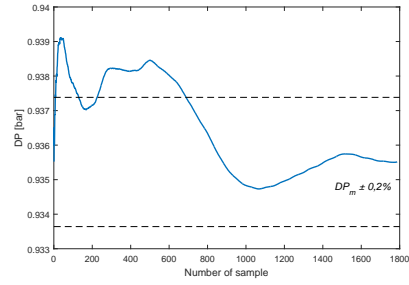
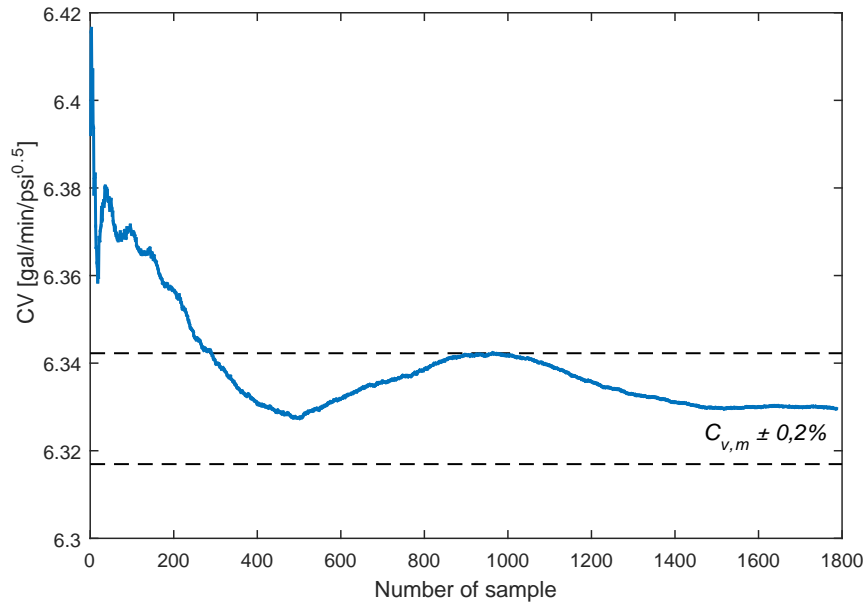


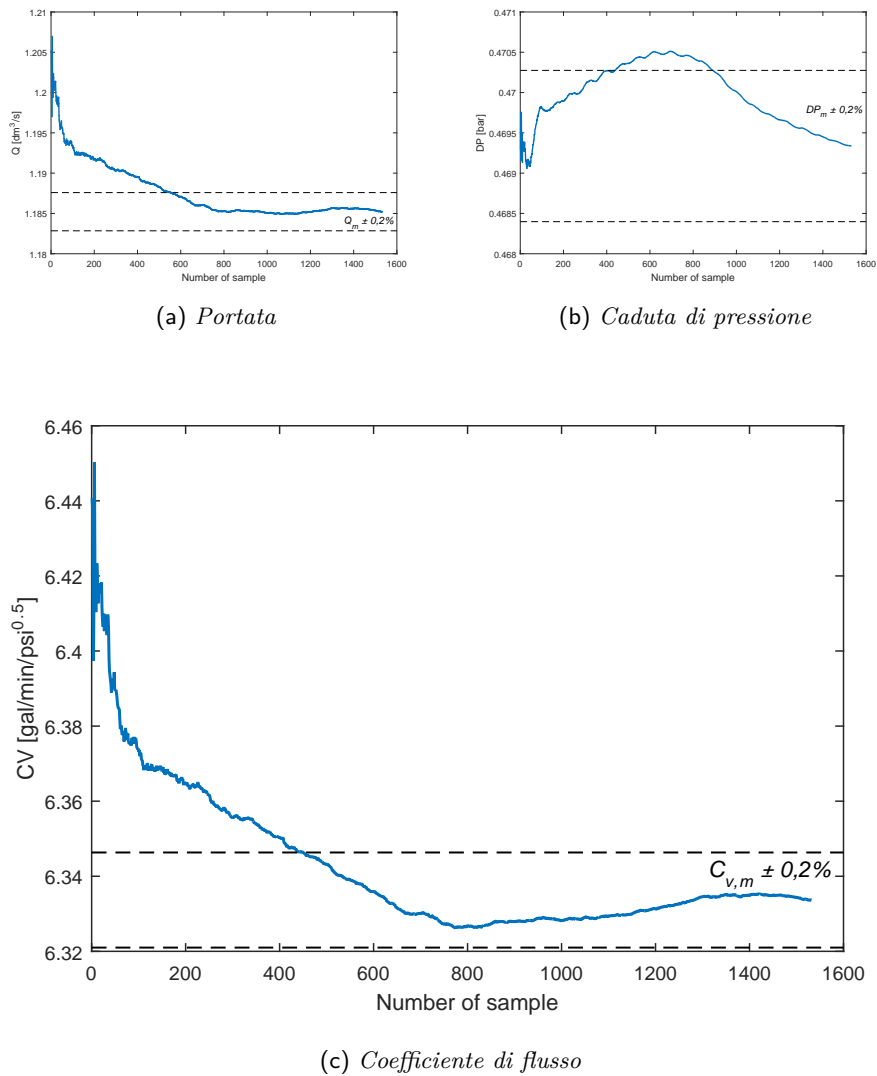
(b) Caduta di pressione

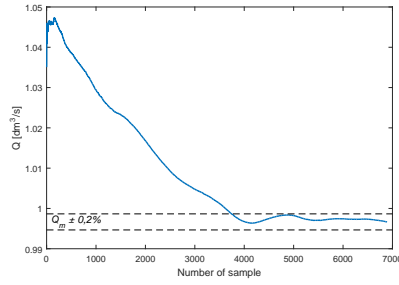


(c) Coefficiente di flusso

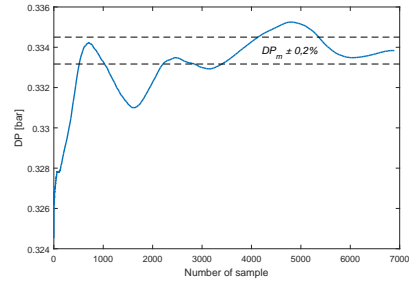
Figura 5.17: N_2 : Prova 4.2 - Andamenti delle medie cumulate

(a) *Portata*(b) *Caduta di pressione*(c) *Coefficiente di flusso*Figura 5.18: N₂: Prova 4.3 - Andamenti delle medie cumulate

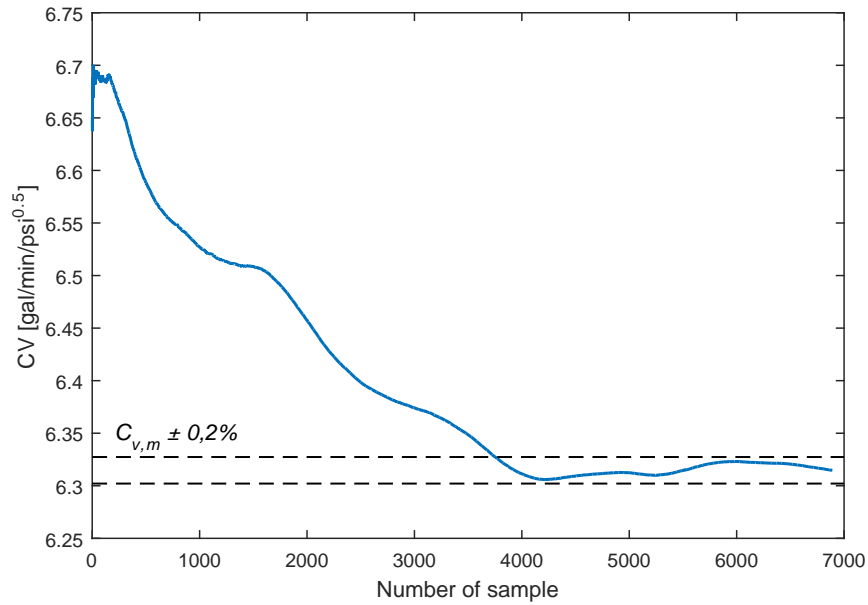
Figura 5.19: N_2 : Prova 4.4 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata

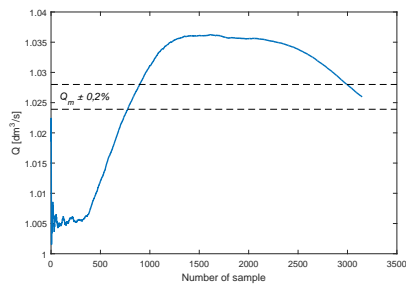


(b) Caduta di pressione

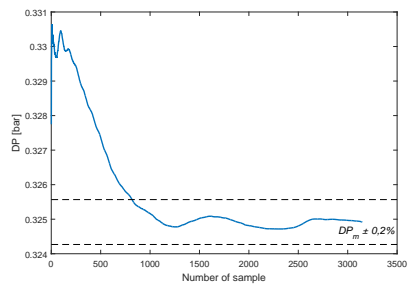


(c) Coefficiente di flusso

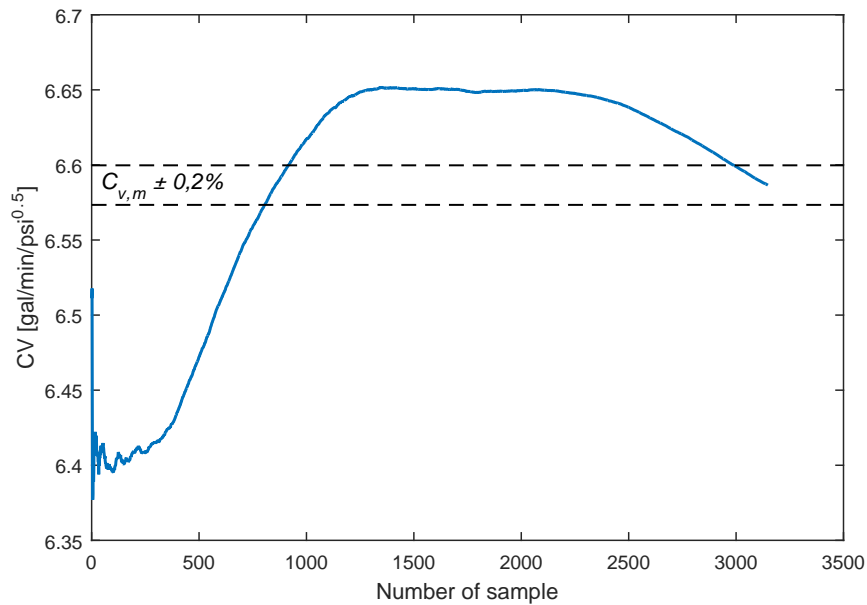
Figura 5.20: N₂: Prova 4.5 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata



(b) Caduta di pressione



(c) Coefficiente di flusso

Figura 5.21: N₂: Prova 4.6 - Andamenti delle medie cumulate

Prova 5

In figura 5.22 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti prima della loro conversione in unità ingegneristiche, sono stati evidenziati i due intervalli di dati presi in considerazione.

La tabella 5.10 riporta le grandezze medie maggiormente significative nei due intervalli di dati scelti.

Tabella 5.10: N₂: Grandezze caratteristiche - Prova 5

Prova 5 - $\beta = 0,06$									
Intervallo	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T ₃ [°C]	P ₁ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	μ [$\times 10^{-5}$ Pa · s]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	-178,1	-180,0	-183,3	13,15	9,539	1,306	742,30	9,02	1,52
2	-179,7	-181,3	-183,8	12,99	9,571	0,780	747,76	9,29	0,91

Si riportano gli andamenti delle medie cumulate di portata, caduta di pressione e coefficiente di flusso, con i relativi intervalli di confidenza (fig. 5.23 e 5.24).

Dall'esame degli andamenti delle medie cumulate, appare evidente che può essere considerato significativo per la determinazione del coefficiente di flusso il primo intervallo di dati, ma non il secondo. Si nota, infatti, che la media cumulata della portata non tende a stabilizzarsi attorno al valore medio.

In tabella 5.11 si riassumono i dati caratteristici degli intervalli individuati.

Tabella 5.11: N₂: Riepilogo dati della Prova 5

Prova 5 - $\beta = 0,06$				
Intervallo	Q [$\frac{dm^3}{s}$]	ΔP [bar]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]	Significativo?
1	1,306	9,5385	1,52	SI
2	0,780	9,5711	0,91	NO

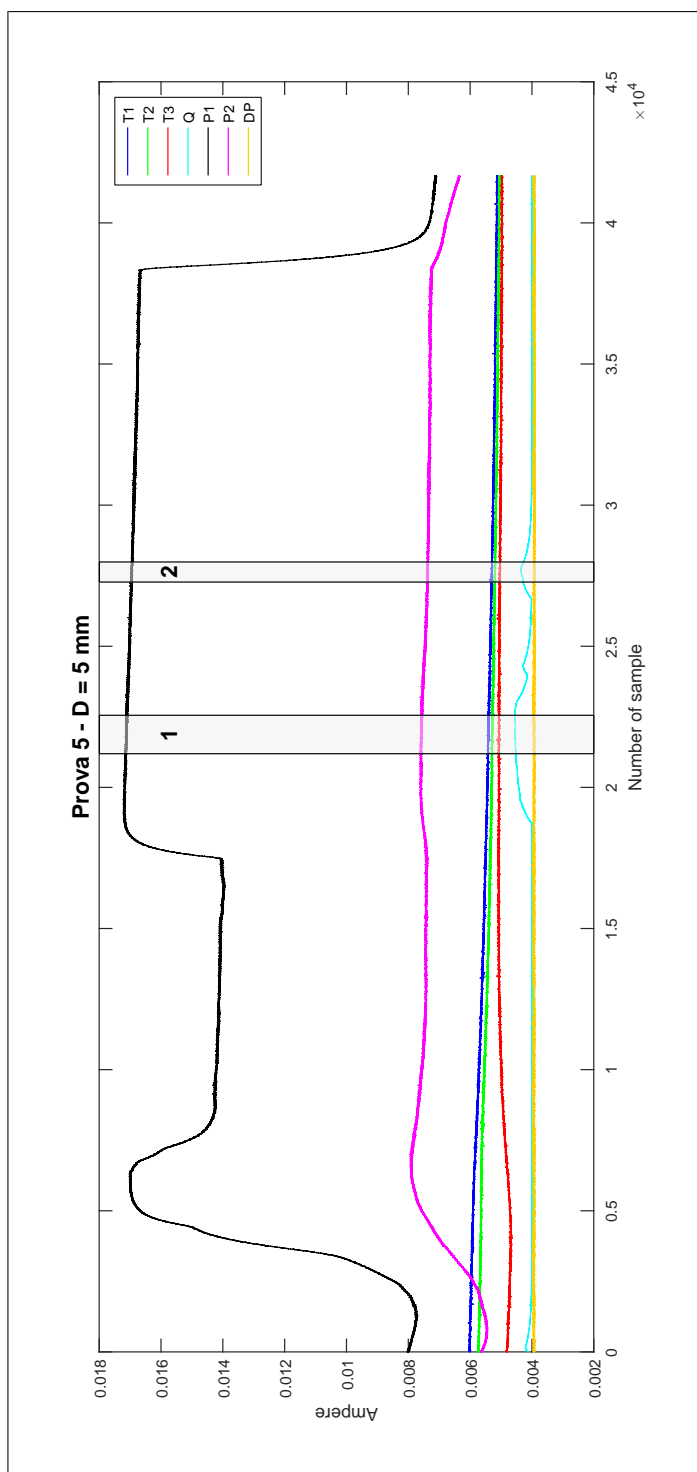
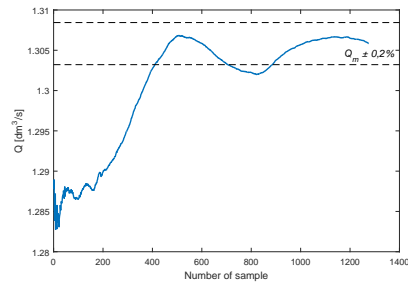
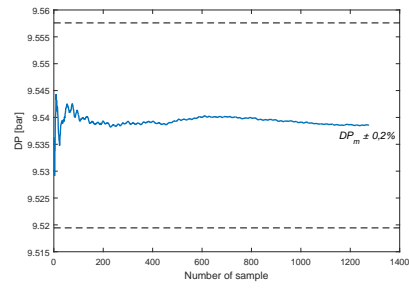


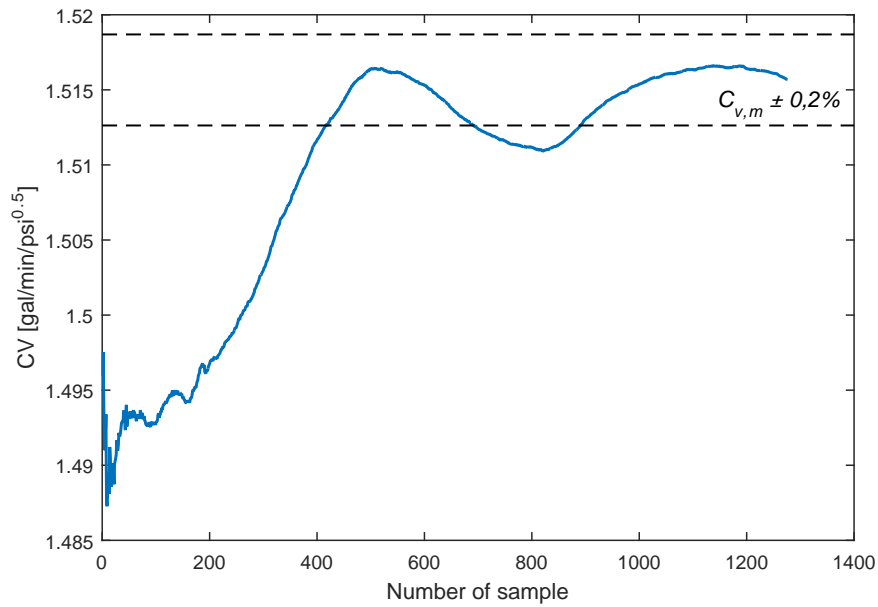
Figura 5.22: N₂: Prova 5 - Dati acquisiti in unità di corrente



(a) Portata

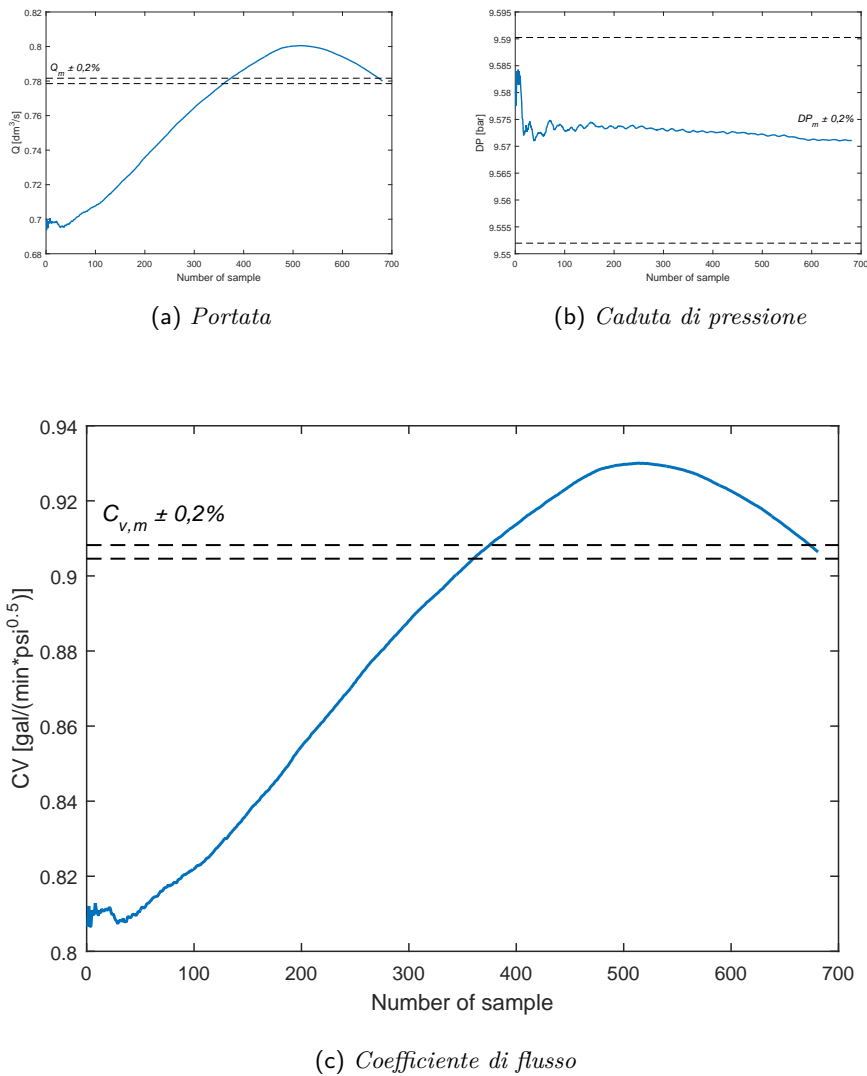


(b) Caduta di pressione



(c) Coefficiente di flusso

Figura 5.23: N₂: Prova 5.1 - Andamenti delle medie cumulate

Figura 5.24: N_2 : Prova 5.2 - Andamenti delle medie cumulate

Prova 6

In figura 5.25 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti prima della loro conversione in unità ingegneristiche, è stato evidenziato l'unico intervallo di dati presi in considerazione.

La tabella 5.12 riporta le grandezze medie maggiormente significative nei due intervalli di dati scelti.

Tabella 5.12: N₂: Grandezze caratteristiche - Prova 6

Prova 6 - $\beta = 0,06$									
Intervallo	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T ₃ [°C]	P ₁ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	μ [$\times 10^{-5}$ Pa · s]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	-178,6	-179,6	-182,7	11,94	8,549	1,189	736,75	8,75	1,45

Si riportano gli andamenti delle medie cumulate di portata, caduta di pressione e coefficiente di flusso, con i relativi intervalli di confidenza (fig. 5.26).

Anche per questo unico intervallo individuato la media cumulata della portata non tende a stabilizzarsi attorno al valor medio, quindi non può essere considerato significativo.

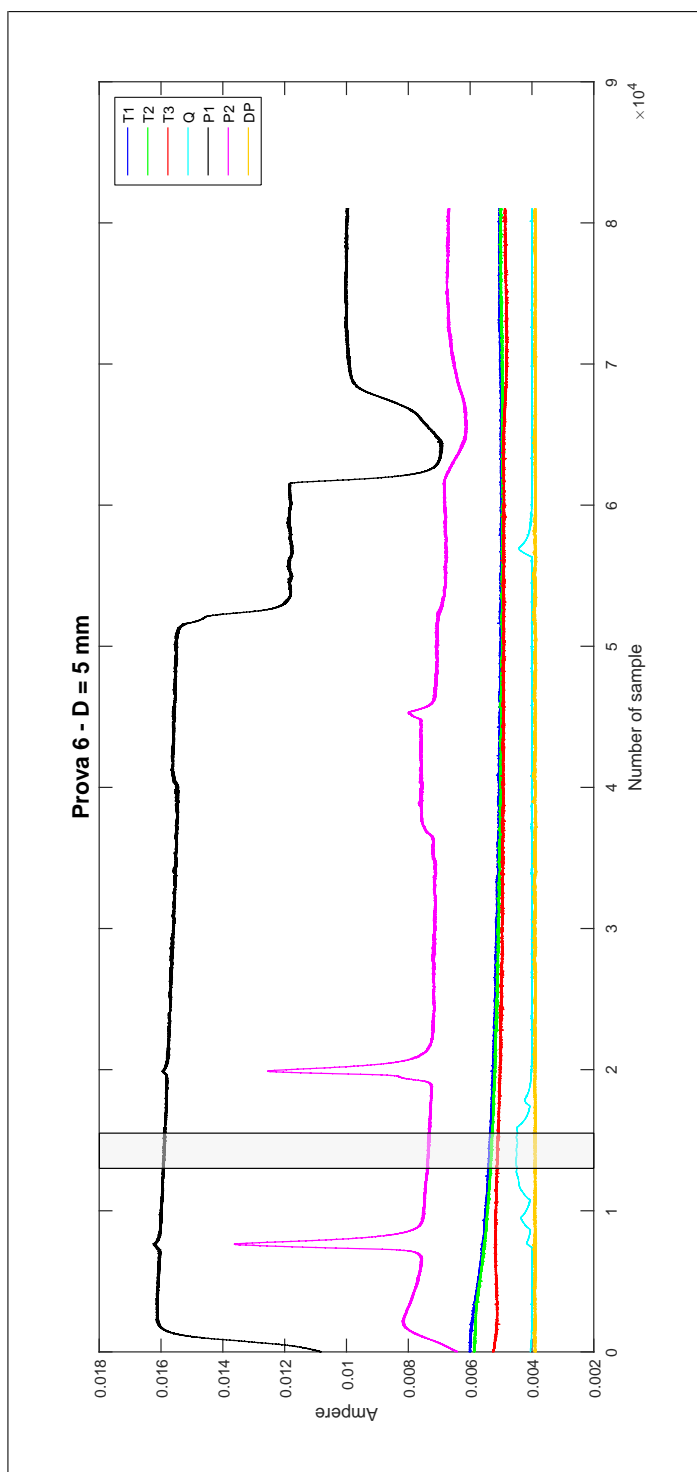
In tabella 5.13 si riassumono i dati caratteristici dell'intervallo individuato.

Tabella 5.13: N₂: Riepilogo dati della Prova 6

Prova 6 - $\beta = 0,06$				
Intervallo	Q [$\frac{dm^3}{s}$]	ΔP [bar]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]	Significativo?
1	1,189	8,5488	1,45	NO

Per le prove riferite al piatto con foro minore, il cui diametro è pari a 5 mm, è necessario fare qualche considerazione riguardo la bontà delle acquisizioni. Osservando le due acquisizioni in oggetto nelle immagini 5.22 e 5.25, si può notare che il comportamento del flussimetro è piuttosto atipico: per la maggior parte della durata delle due prove, infatti, da questo strumento sono stati registrati valori nulli. Gli intervalli considerati sono stati ricercati in corrispondenza degli unici periodi in cui il flussimetro ha registrato dei valori di portata.

Nel manuale [**flussimetro**] sono state trovate delle informazioni a proposito, riguardanti il massimo errore di misurazione dello strumento, che aumenta per bassi valori del numero di Reynolds.

Figura 5.25: N₂: Prova 6 - Dati acquisiti in unità di corrente

Durante queste due prove, la bassa velocità del fluido ha effettivamente comportato bassi valori del numero Reynolds (v. grafico di figura 5.39): questo fatto potrebbe aver causato la lettura di valori caratterizzati da un'incertezza elevata, quindi non affidabili.

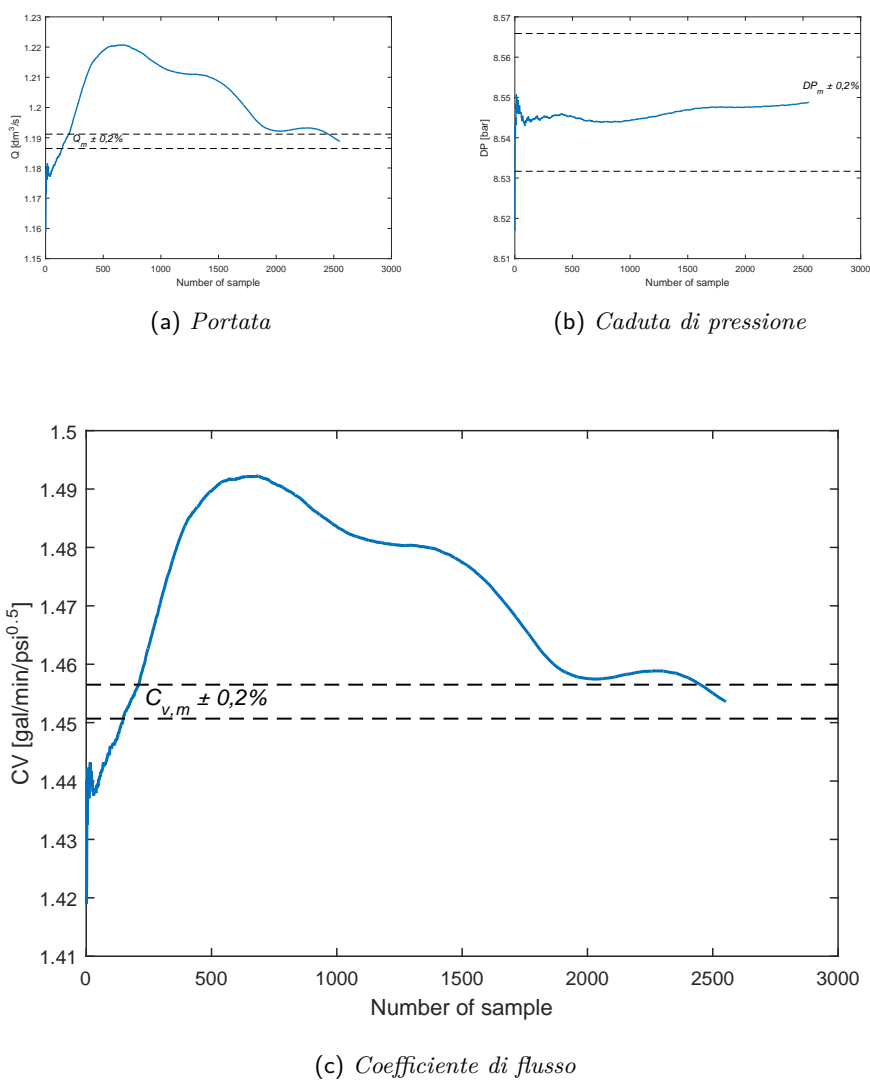


Figura 5.26: N_2 : Prova 6.1 - Andamenti delle medie cumulate

Prova 7

In figura 5.27 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti prima della loro conversione in unità ingegneristiche, sono stati evidenziati cinque intervalli di dati presi in considerazione.

La tabella 5.14 riporta le grandezze medie maggiormente significative nei due intervalli di dati scelti.

Tabella 5.14: N₂: Grandezze caratteristiche - Prova 7

Prova 7 - $\beta = 0,30$									
Intervallo	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T ₃ [°C]	P ₁ [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	μ [$\times 10^{-5}$ Pa · s]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	-186,4	-187,5	-188,5	11,52	0,206	2,326	774,73	11,17	18,79
2	-186,8	-187,7	-188,6	9,72	0,178	2,087	774,43	11,14	18,12
3	-187,0	-187,9	-188,6	8,12	0,130	1,860	773,80	11,09	18,93
4	-187,1	-188,0	-188,6	5,88	0,087	1,450	773,19	11,03	18,01
5	-187,2	-188,0	-188,4	4,15	0,043	1,027	772,59	10,98	18,20

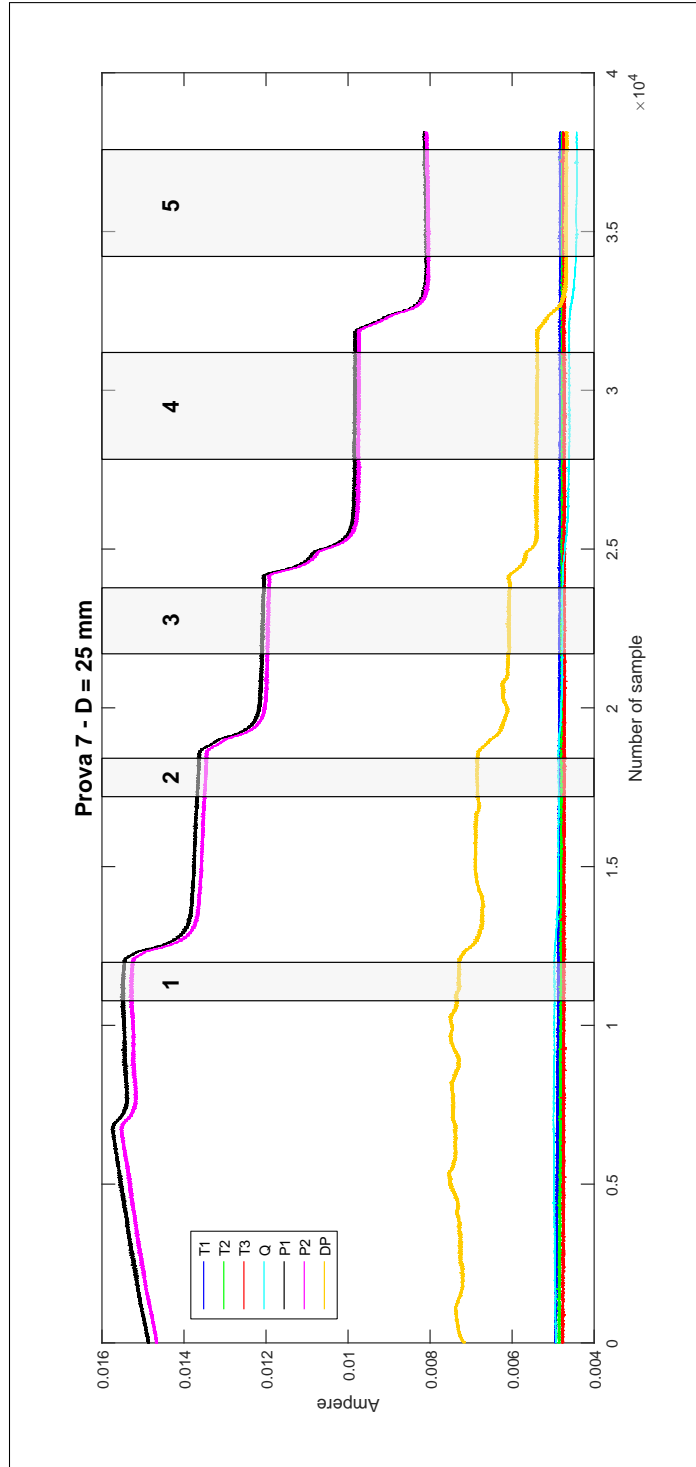
Si riportano gli andamenti delle medie cumulate di portata, caduta di pressione e coefficiente di flusso, con i relativi intervalli di confidenza (fig. 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32).

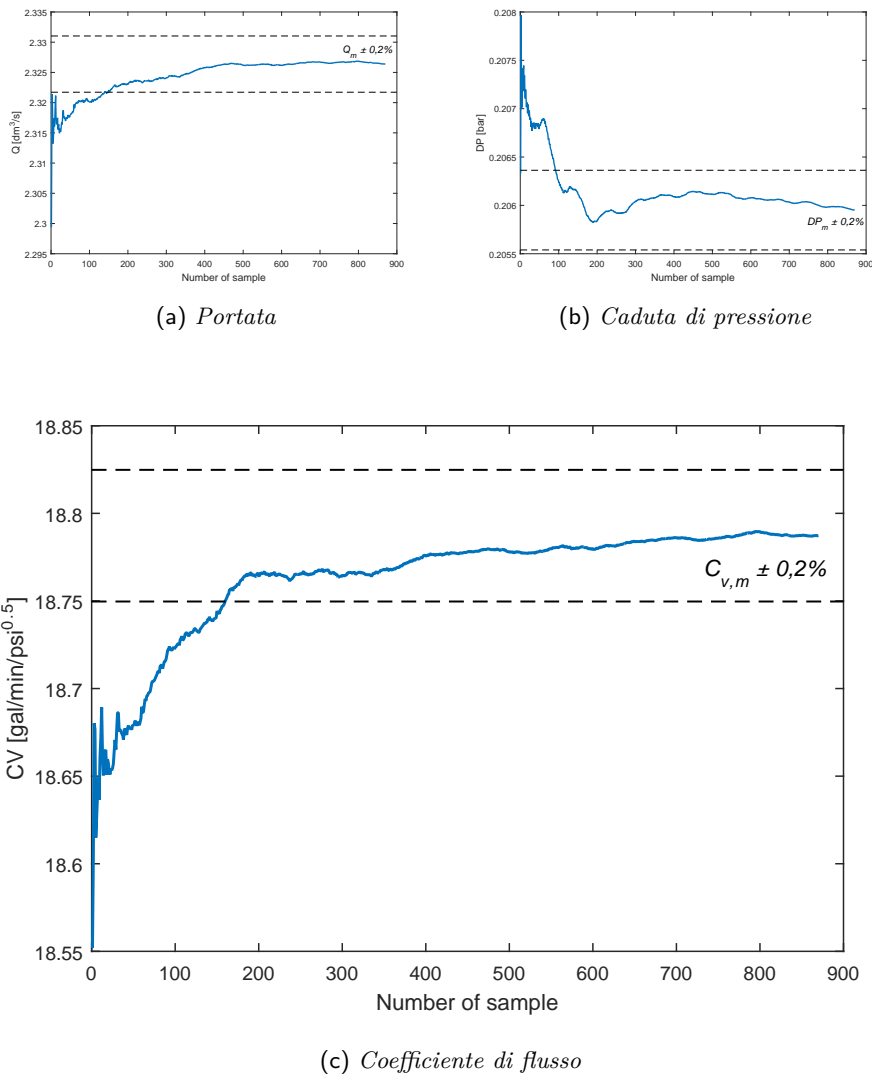
Esaminando gli andamenti delle medie cumulate è possibile stabilire, con una certa sicurezza, che i primi tre intervalli di dati sono significativi per la determinazione del coefficiente di flusso. Gli intervalli 4 e 5, invece, non sono considerati indicativi perché gli andamenti delle medie cumulate presentano gli stessi problemi esposti nelle precedenti prove.

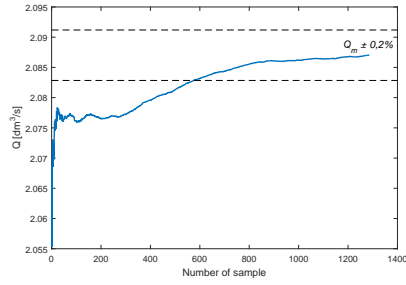
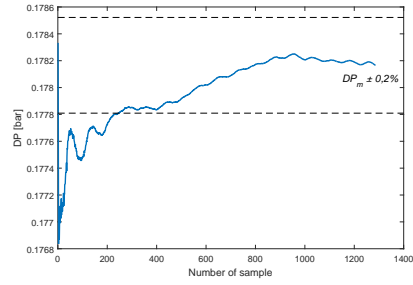
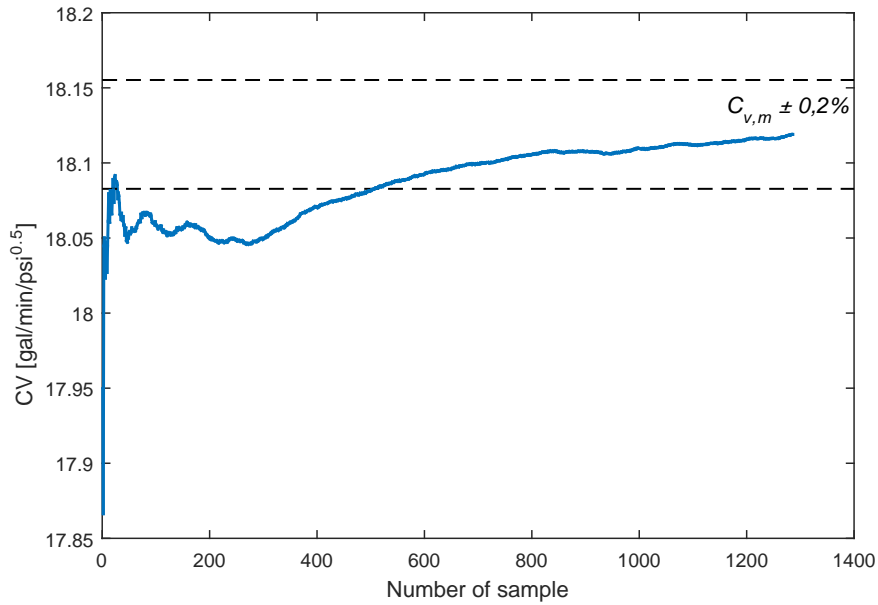
In tabella 5.15 si riassumono i dati caratteristici degli intervalli individuati.

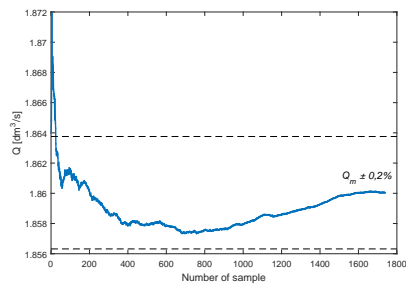
Tabella 5.15: N₂: Riepilogo dati della Prova 7

Prova 7 - $\beta = 0,30$				
Intervallo	Q [$\frac{dm^3}{s}$]	ΔP [bar]	C _V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]	Significativo?
1	2,326	0,2060	18,79	SI
2	2,087	0,1782	18,12	SI
3	1,860	0,1296	18,93	SI
4	1,450	0,0871	18,01	NO
5	1,027	0,0427	18,20	NO

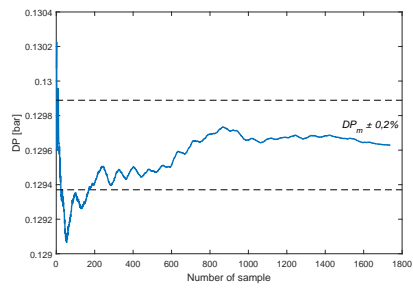
Figura 5.27: N₂: Prova 7 - Dati acquisiti in unità di corrente

Figura 5.28: N_2 : Prova 7.1 - Andamenti delle medie cumulate

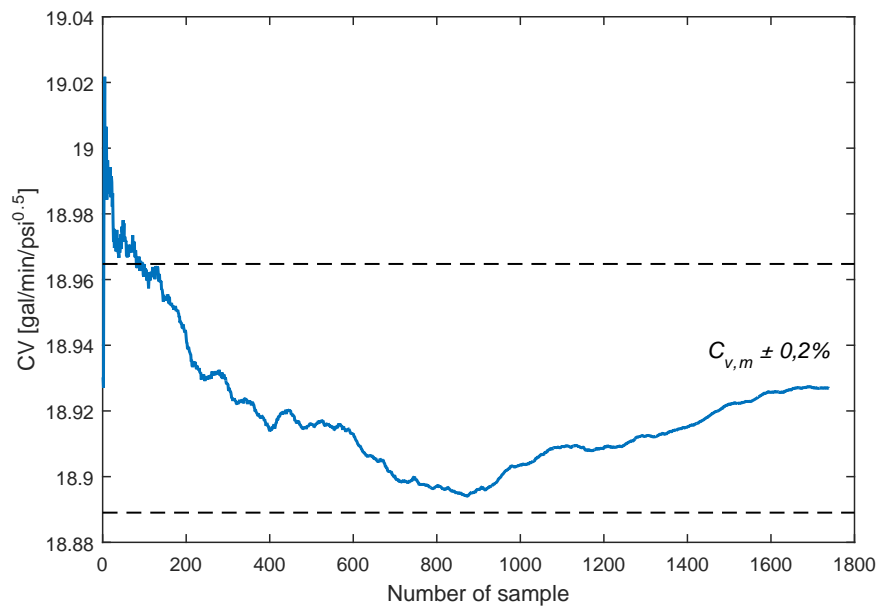
(a) *Portata*(b) *Caduta di pressione*(c) *Coefficiente di flusso*Figura 5.29: N_2 : Prova 7.2 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata

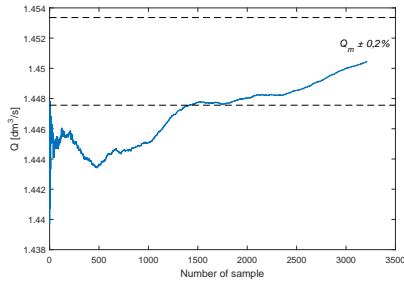


(b) Caduta di pressione

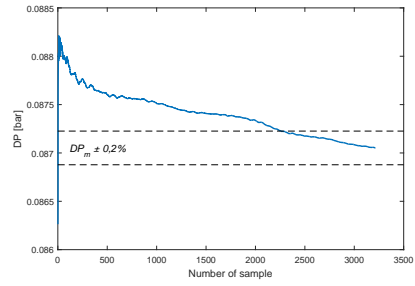


(c) Coefficiente di flusso

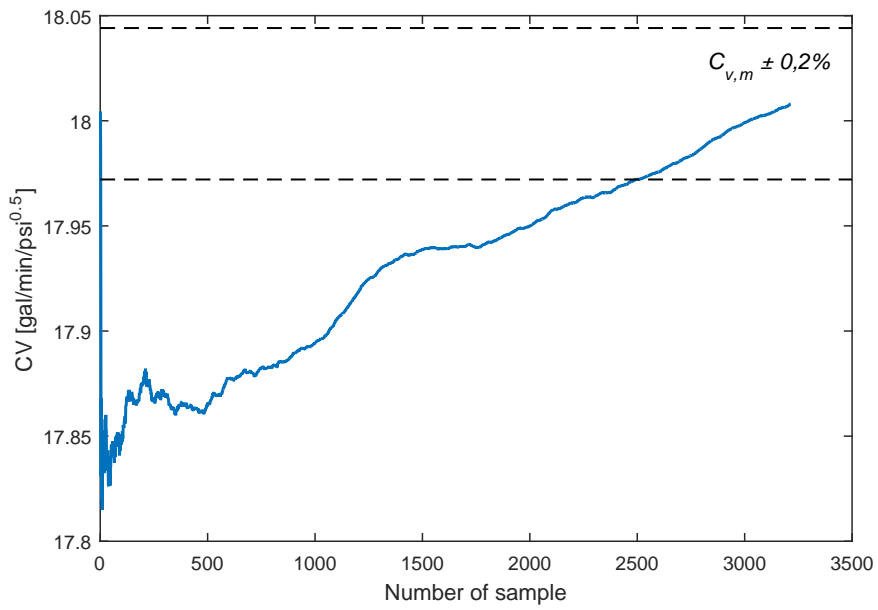
Figura 5.30: N₂: Prova 7.3 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata

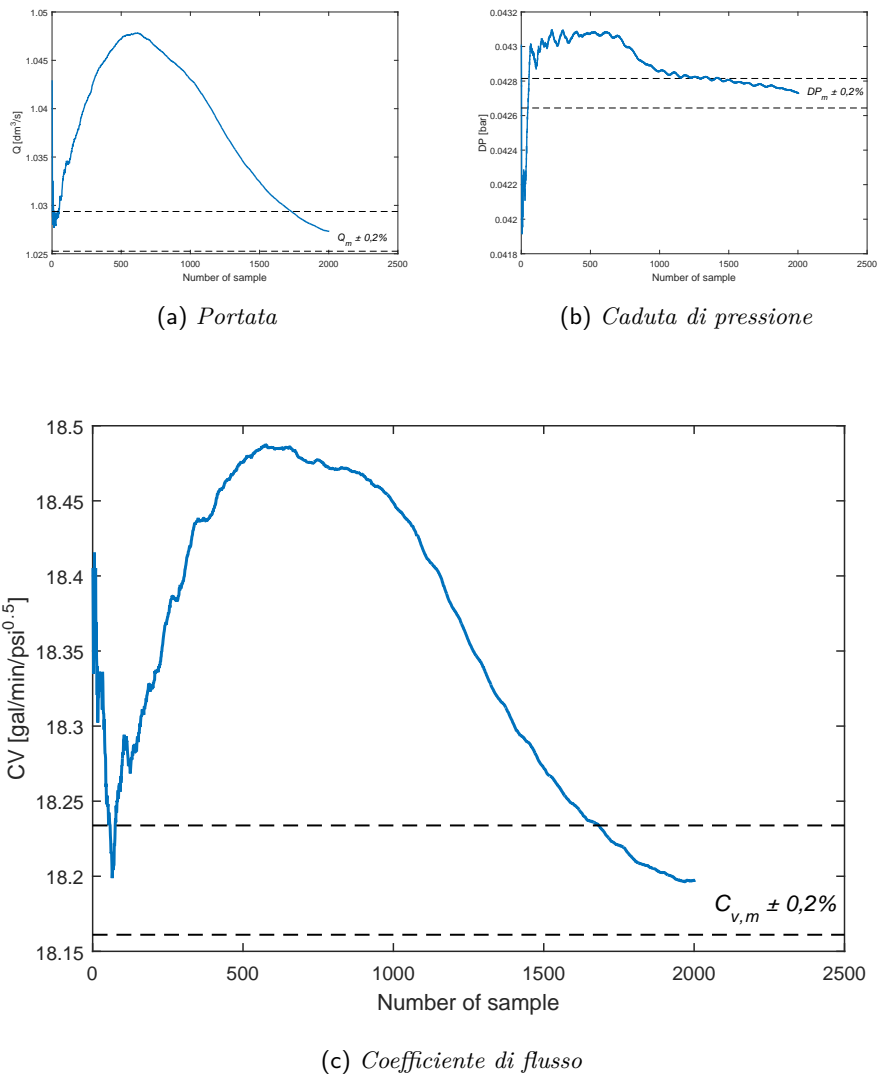


(b) Caduta di pressione



(c) Coefficiente di flusso

Figura 5.31: N₂: Prova 7.4 - Andamenti delle medie cumulate

Figura 5.32: N₂: Prova 7.5 - Andamenti delle medie cumulate

Prova 8

In figura 5.33 è riportata l'intera acquisizione con gli andamenti delle grandezze misurate da tutti gli strumenti prima della loro conversione in unità ingegneristiche, sono stati evidenziati i cinque intervalli di dati presi in considerazione.

La tabella 5.16 riporta le grandezze medie maggiormente significative nei due intervalli di dati scelti.

Tabella 5.16: N_2 : Grandezze caratteristiche - Prova 8

Prova 8 - $\beta = 0,47$									
Intervallo	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	P_1 [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	μ [$\times 10^{-5}$ $Pa \cdot s$]	C_V [$\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}$]
1	-180,6	-182,9	-184,6	6,20	0,012	1,492	752,49	9,57	49,60
2	-183,6	-185,2	-186,6	7,86	0,018	1,778	763,62	10,30	48,53
3	-184,4	-185,9	-187,1	9,14	0,023	1,975	763,97	10,33	48,04
4	-185,0	-186,3	-187,2	11,09	0,029	2,243	769,73	10,76	48,05
5	-185,8	-187,0	-187,3	13,46	0,038	2,544	770,37	10,81	47,84

Si riportano gli andamenti delle medie cumulate di portata, caduta di pressione e coefficiente di flusso, con i relativi intervalli di confidenza (fig. 5.34, 5.35, 5.36, 5.37 e 5.38).

Esaminando i grafici delle medie cumulate di portata per gli intervalli 3 e 5 si nota ancora la mancata stabilizzazione attorno al valor medio; ne consegue che le due serie di dati non sono significative.

Gli andamenti riferiti all'intervallo 2, invece, sono molto buoni: le medie delle due grandezze considerate si stabilizzano attorno al valore medio, tali andamenti si riflettono così anche nella media cumulata del coefficiente di flusso, che mostra una buona convergenza.

Sono molto interessanti gli andamenti delle medie cumulate per gli intervalli di dati 2 e 4. I valori di caduta di pressione si trovano effettivamente all'interno degli intervalli di confidenza solo nelle parti finali delle curve, ma per buona parte dell'intervallo vi si mantengono molto vicini. L'andamento delle portate è molto significativo: si notano infatti oscillazioni di ampiezza progressivamente minore, con una spiccata tendenza a convergere verso i valori medi.

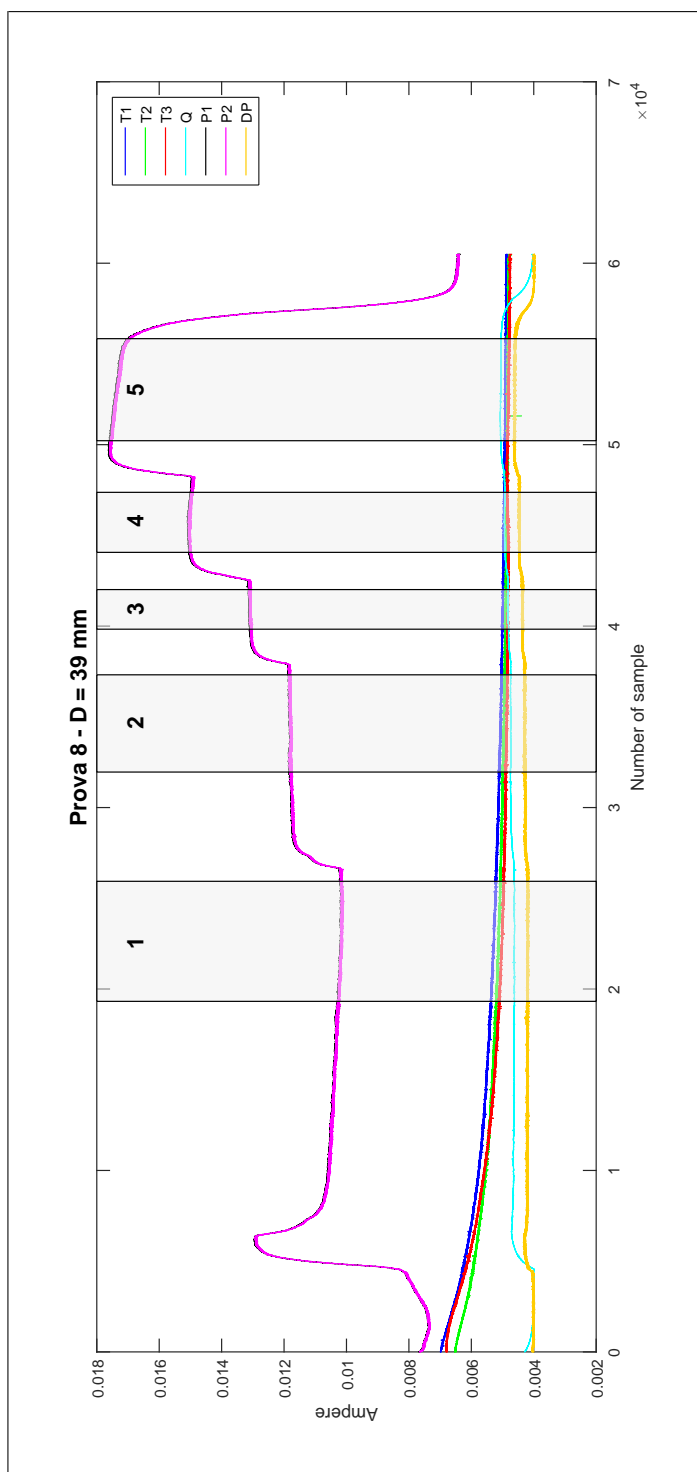
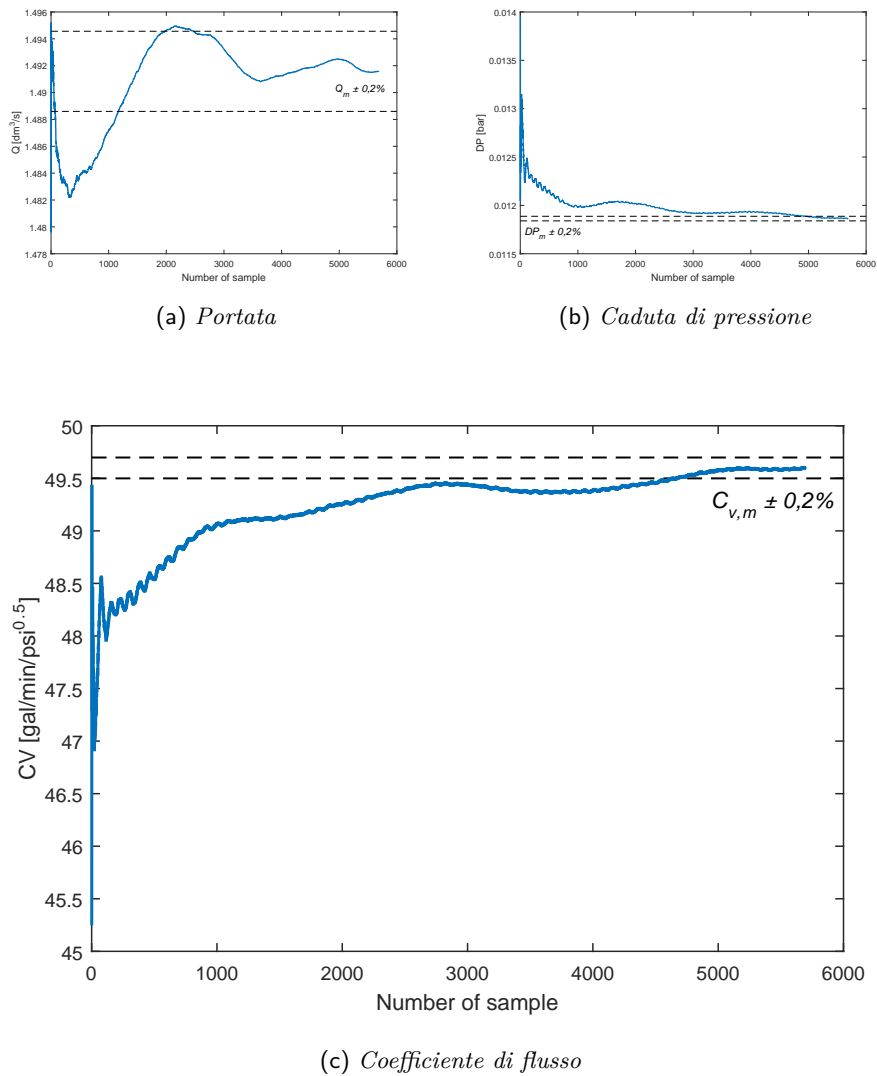


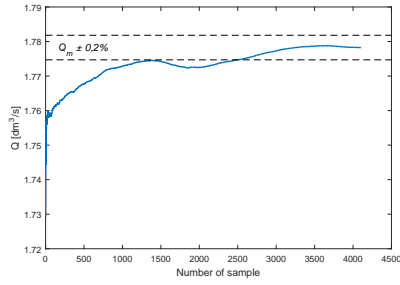
Figura 5.33: N₂: Prova 8 - Dati acquisiti in unità di corrente

In tabella 5.17 si riassumono i dati caratteristici degli intervalli individuati.

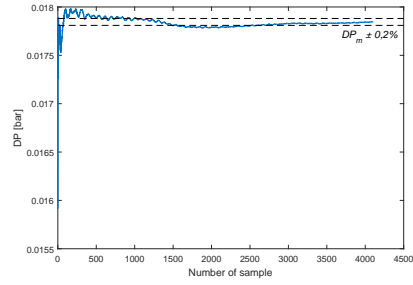
Tabella 5.17: Riepilogo dati della Prova 8

Prova 8 - $\beta = 0,47$				
Intervallo	Q $\left[\frac{dm^3}{s}\right]$	ΔP [bar]	Cv $\left[\frac{gal}{min \cdot psi^{0,5}}\right]$	Significativo?
1	1,492	0,0119	49,60	SI
2	1,778	0,0178	48,53	SI
3	1,975	0,0225	48,04	NO
4	2,243	0,0291	48,05	SI
5	2,544	0,0379	47,84	NO

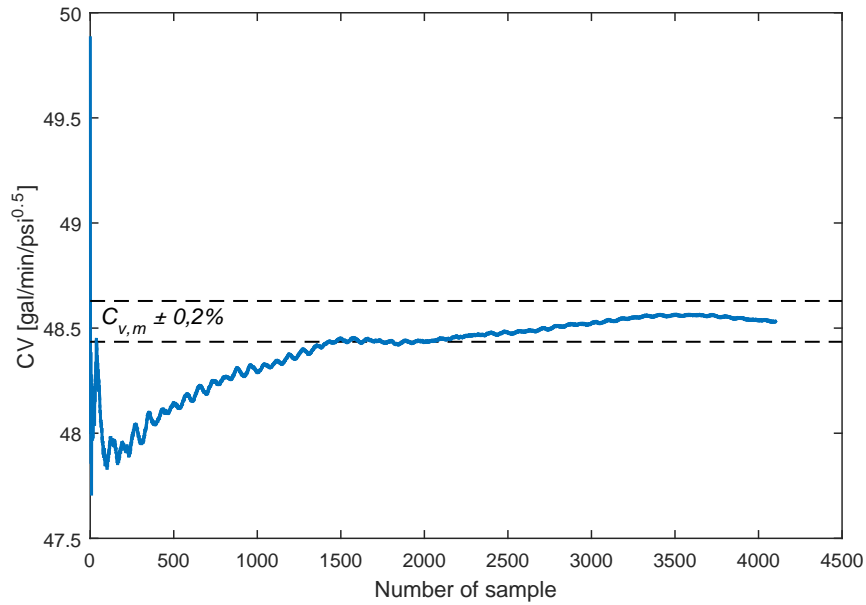
Figura 5.34: N_2 : Prova 8.1 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata

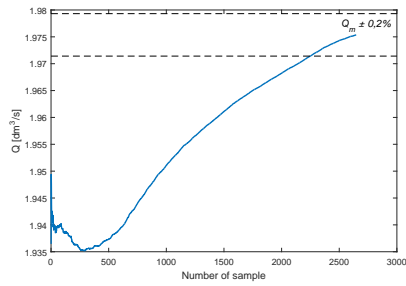


(b) Caduta di pressione

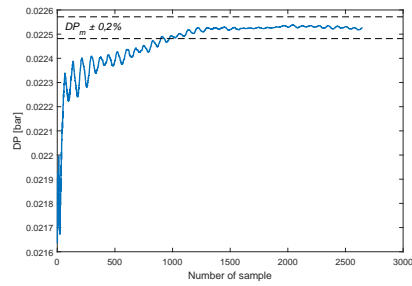


(c) Coefficiente di flusso

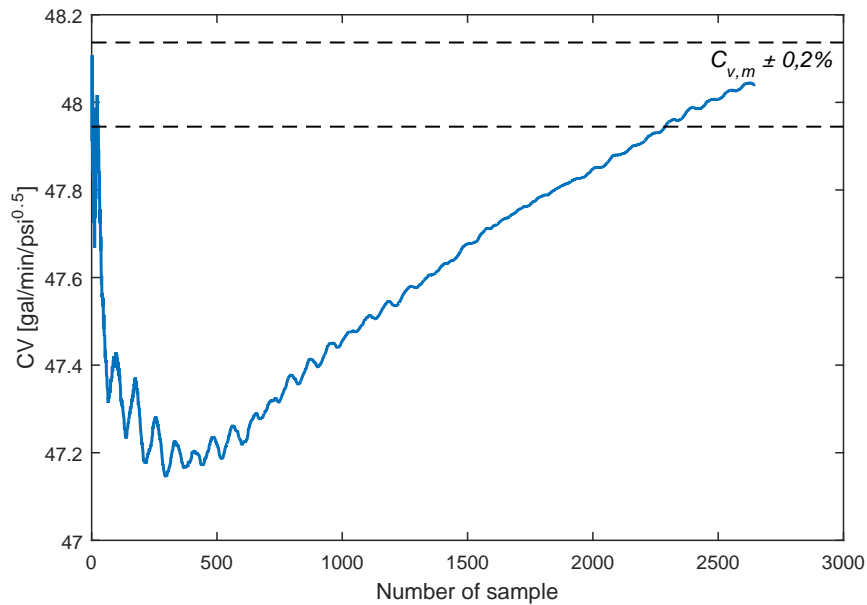
Figura 5.35: N₂: Prova 8.2 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata

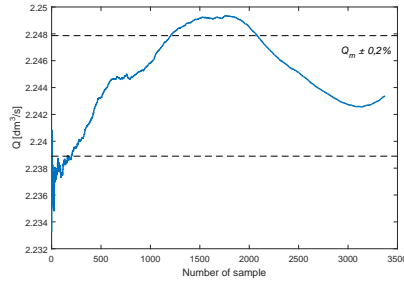


(b) Caduta di pressione

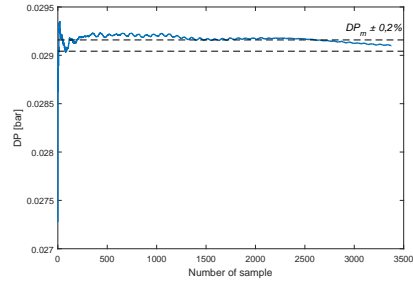


(c) Coefficiente di flusso

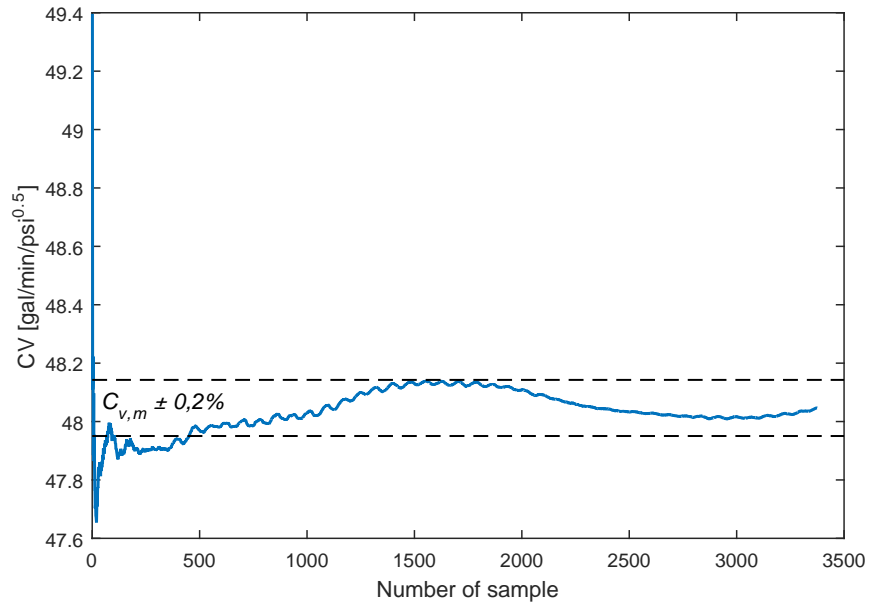
Figura 5.36: N₂: Prova 8.3 - Andamenti delle medie cumulate



(a) Portata

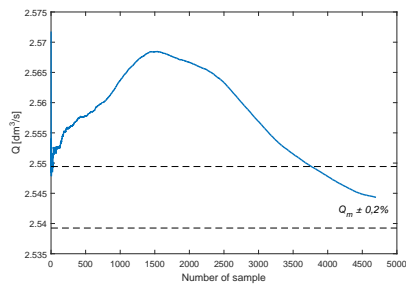
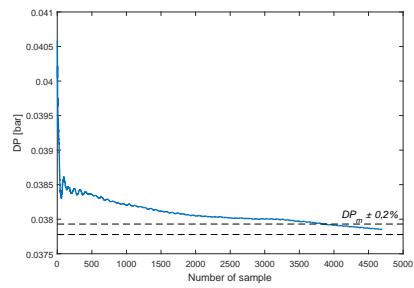
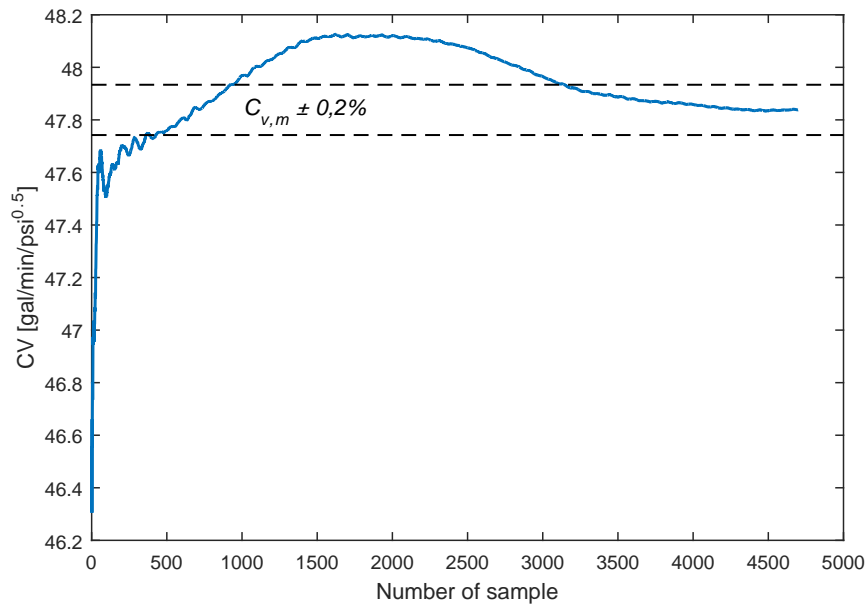


(b) Caduta di pressione



(c) Coefficiente di flusso

Figura 5.37: N₂: Prova 8.4 - Andamenti delle medie cumulate

(a) *Portata*(b) *Caduta di pressione*(c) *Coefficiente di flusso*Figura 5.38: N₂: Prova 8.5 - Andamenti delle medie cumulate

A seguito delle osservazioni riportate è stato possibile individuare i valori di C_V medi di maggiore significatività, calcolati a partire dalle grandezze acquisite all'interno degli intervalli maggiormente indicativi.

I grafici 5.39, 5.40, 5.41 e 5.42 riportano il valore dei C_V calcolati, al variare del numero di Reynolds; per avere una migliore panoramica delle analisi svolte, sono stati riportati e indicati diversamente anche i dati esclusi. Dei dati ritenuti idonei sono stati calcolati il valore medio e il discostamento massimo (tabella 5.18), fanno ovviamente eccezione i test sul piatto con foro di diametro pari a 5 mm siccome è stato ritenuto significativo un solo intervallo di dati.

Tabella 5.18: N_2 : Valori medi del coefficiente di flusso

β	C_V $\left[\frac{\text{gal}}{\text{min} \cdot \text{psi}^{0,5}} \right]$
0,06	1,52
0,30	$18,61 \pm 2,7\%$
0,18	$6,35 \pm 0,6\%$
0,47	$48,73 \pm 1,8\%$

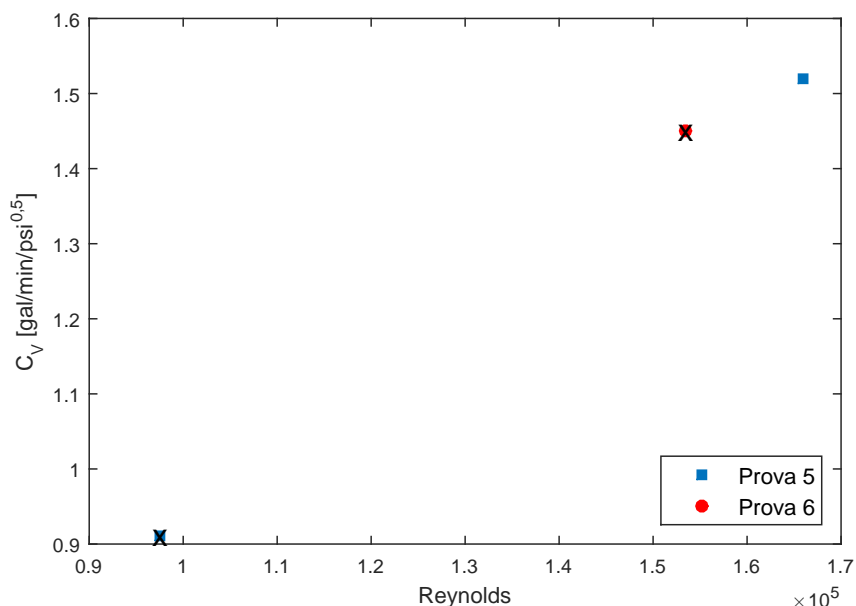


Figura 5.39: N_2 : $\beta = 0,06$ - Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re

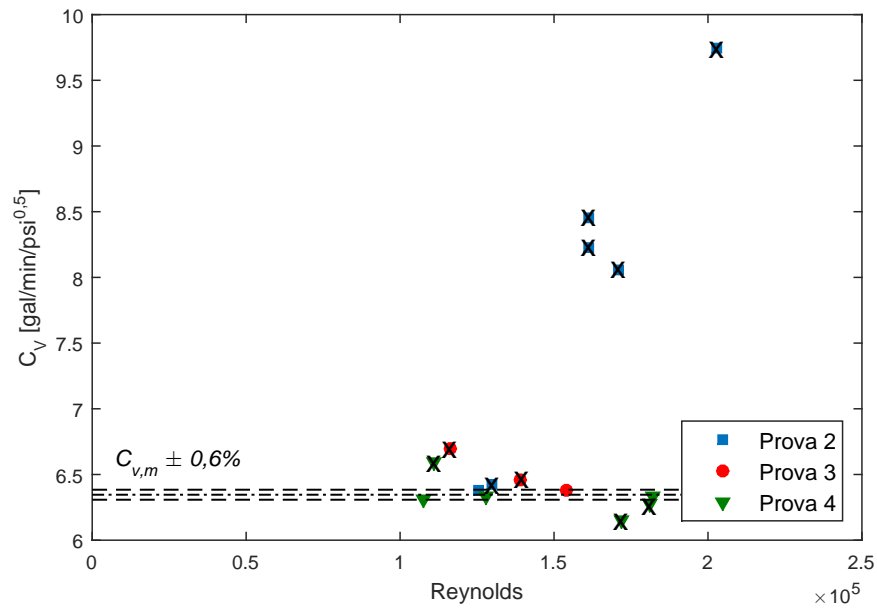


Figura 5.40: N_2 : $\beta = 0,18$ - Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re

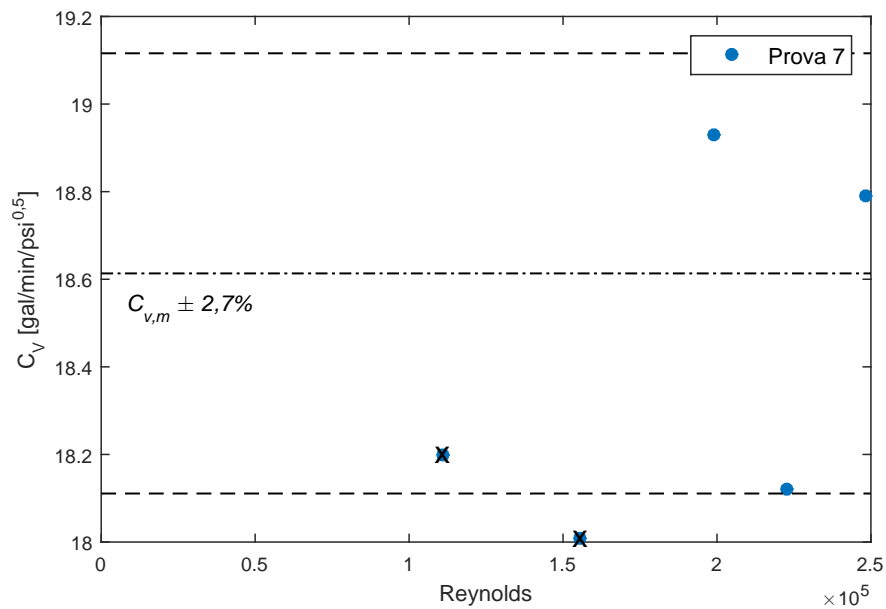


Figura 5.41: N_2 : $\beta = 0,30$ - Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re

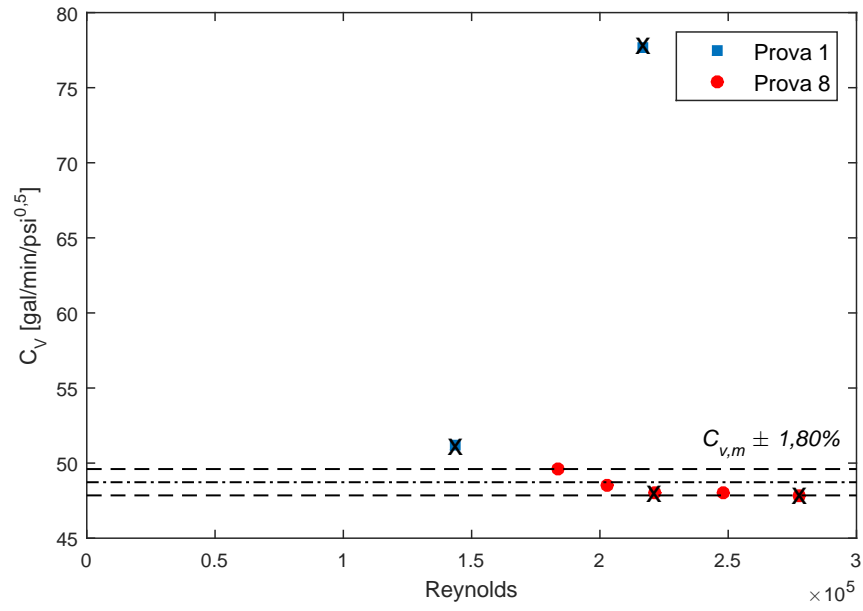


Figura 5.42: N_2 : $\beta = 0,47$ - Sensibilità del coefficiente C_V al variare di Re

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

6.1 Conclusioni

Terminati gli studi e le analisi dei dati acquisiti durante i test in acqua e in azoto liquido, le due serie di dati devono venire rappresentate sullo stesso grafico per cercare di individuare eventuali affinità e differenze.

Il confronto tra il comportamento dei due fluidi con il piatto $\beta = 0,06$ (figura 6.1) mostra una notevole discrepanza per quanto riguarda i valori del coefficiente di flusso, che per l'azoto è stato valutato circa il doppio che per l'acqua. E' necessario considerare, però, che i numeri di Reynolds sono molto diversi.

Diversi studi di questo tipo (come ad esempio [18]), mostrano l'esistenza di un intervallo di autosimilitudine del numero di Eulero rispetto al numero di Reynolds. Questo è stato osservato anche in queste pagine in relazione al coefficiente di flusso C_V , proporzionale a $Eu^{-0,5}$. Non è stato possibile, però, definire il comportamento del C_V al di fuori di questo intervallo. Lo studio citato mostra che Eu può assumere valori maggiori o minori di quello medio dell'intervallo di autosimilitudine per Reynolds piccoli, mentre assume valori maggiori per Reynolds elevati. Osservando la formula del numero di Eulero

$$Eu = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \bar{V}^2}$$

si può notare che il termine di caduta di pressione è situato al numeratore, mentre nella formula per la determinazione del coefficiente di flusso si trova al denominatore. Questa osservazione permette di affermare che, in fase di cavitazione, il coefficiente di flusso mostrerà una tendenza a diminuire rispetto al suo valore medio.

Questa riflessione non permette quindi di spiegare l'aumento del coefficiente di flusso per Reynolds maggiori.

Bisogna però ricordare l'anomalo funzionamento del flussimetro durante le prove con questo diaframma; senza altre informazioni non è possibile

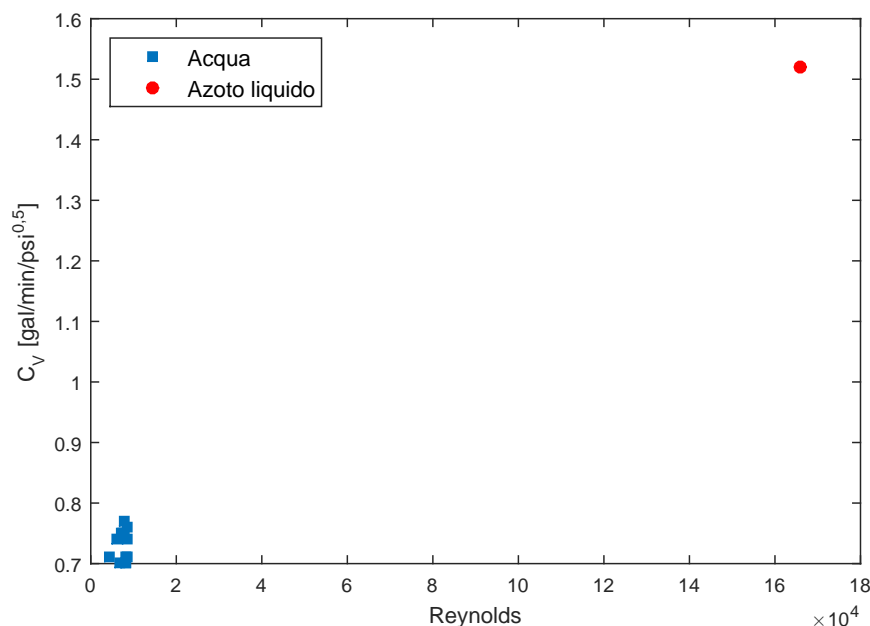


Figura 6.1: Confronto C_V N_2 e H_2O - $\beta = 0,06$

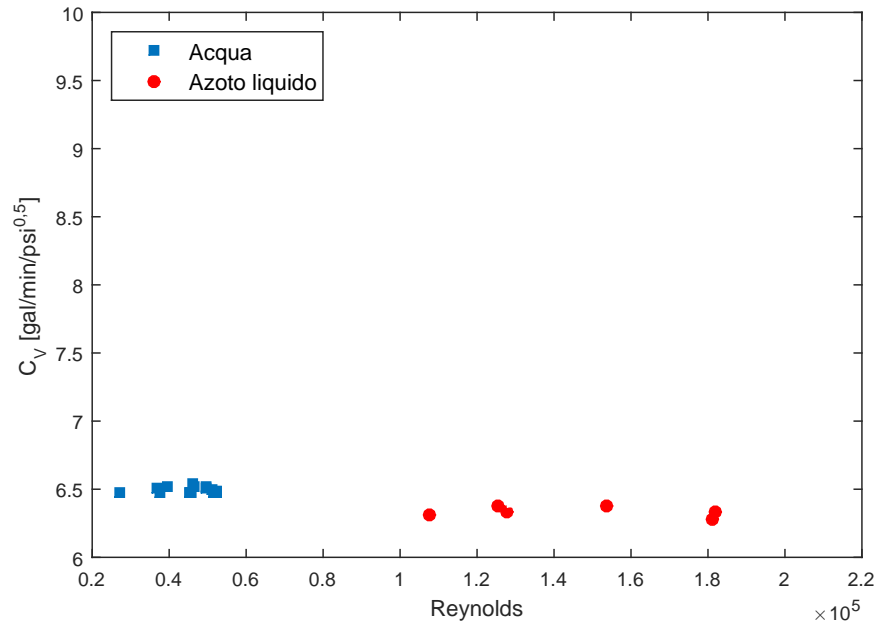
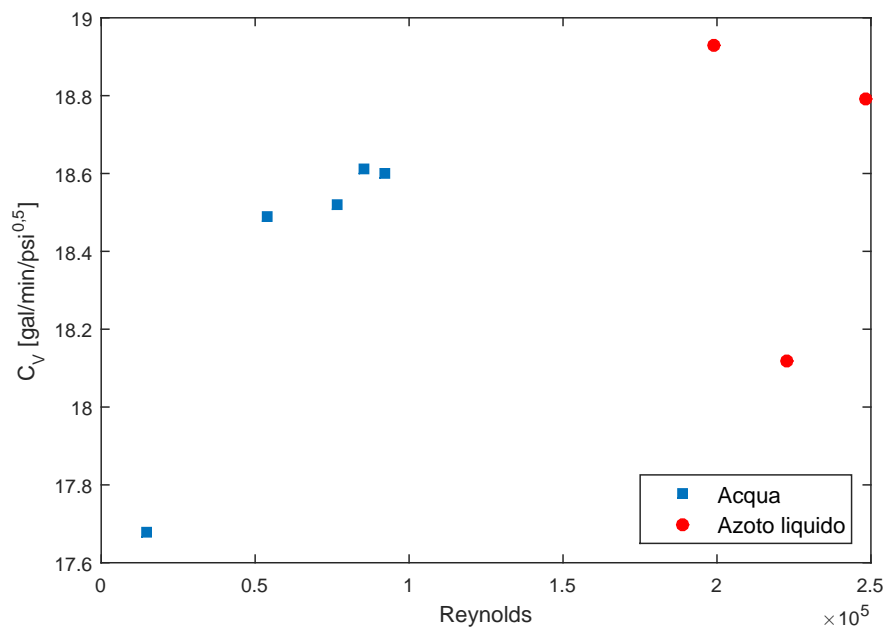
spiegare questo comportamento, che potrebbe invece essere corretto e dovuto semplicemente al diverso comportamento dell'azoto liquido rispetto all'acqua.

Questo aspetto merita ulteriori prove e analisi, con la conseguente acquisizione di un numero maggiore di dati significativi in un più ampio intervallo di Reynolds.

Il confronto tra il comportamento dei due fluidi con il piatto $\beta = 0,18$ (figura 6.2) mostra un andamento piuttosto costante del C_V al variare del numero di Reynolds, anche se si nota una lieve ma sistematica sottostima dello stesso in azoto rispetto che in acqua. Se questo sia dovuto o meno al superamento dell'intervallo di autosimilarità di Reynolds si può comprendere solo ripetendo le medesime prove, che però dovrebbero essere eseguite in modo che i Reynolds dei test in acqua risultino simili a quelli dei test in azoto.

Il confronto tra il comportamento dei due fluidi con il piatto $\beta = 0,30$ (figura 6.3) mostra una variabilità dei dati maggiore rispetto al piatto precedente. Anche in questo caso sarebbe necessario eseguire altre prove, sia in acqua che in azoto liquido, da cui ottenere un numero maggiore di dati significativi e con Reynolds confrontabili.

Il confronto tra il comportamento dei due fluidi con il piatto $\beta = 0,47$ (figura 6.4) è molto interessante, in quanto esiste un intervallo per cui i Reynolds delle prove in acqua sono confrontabili con quelli delle prove in

Figura 6.2: Confronto C_V N_2 e H_2O - $\beta = 0,18$ Figura 6.3: Confronto C_V N_2 e H_2O - $\beta = 0,30$

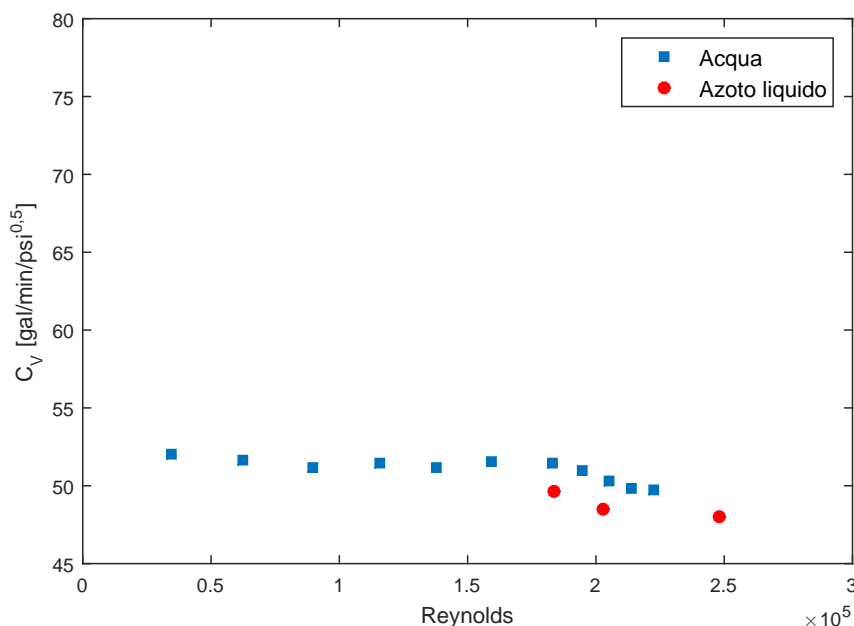


Figura 6.4: Confronto C_V N_2 e H_2O - $\beta = 0,47$

azoto.

Come per il piatto $\beta = 0,18$ si nota una sottostima generale del C_V rispetto ai dati di riferimento per l'acqua. Nonostante ciò è molto interessante notare che i dati caratterizzati dagli stessi Reynolds mostrano la stessa tendenza a decrescere. Siccome questo è stato l'unico piatto per cui si è stato possibile calcolare il coefficiente F_L , tale andamento potrebbe essere spiegato con il superamento dell'intervallo di autosimilarità di Reynolds.

Alla luce di tali analisi si può concludere che, per quanto riguarda la determinazione del coefficiente di flusso relativamente ad un piatto forato, la discrepanza tra acqua e azoto liquido rientra nel range richiesto dalla normativa, ma è importante sottolineare che ciò avviene solo sotto determinate condizioni, piuttosto scomode da ricreare. Il controllo di temperatura e pressione, ad esempio, necessario per il mantenimento dell'azoto allo stato liquido, è stato un processo abbastanza lungo, che ha causato il consumo di molti litri di azoto.

Un altro aspetto ha riguardato la difficoltà di gestire il flusso a causa delle elevatissime perdite di carico situate a valle dell'impianto: se non fosse stato possibile regolare la portata a monte, infatti, probabilmente non sarebbe stato nemmeno possibile acquisire i dati riportati.

Un'altra osservazione non banale riguarda la coibentazione: lo spesso strato isolante installato attorno all'impianto ha permesso il raggiungimento piuttosto rapido delle temperature di processo, sempre tenute sotto controllo

grazie alle tre sonde di temperatura.

In conclusione si può affermare che questo lavoro ha contribuito a porre le basi per successivi studi, dagli esiti interessanti, che conferiranno una maggiore confidenza nei confronti dei fluidi criogenici e delle loro applicazioni, ad esempio in vista di una possibile normativa che li riguardi.

6.2 Sviluppi futuri

Siccome non sono note indicazioni circa la presenza di studi di questo tipo sui fluidi criogenici, le possibilità di futuri sviluppi sono veramente ampie.

- Innanzitutto la definizione di condizioni operative meno restrittive di quelle seguite permetterebbe l'acquisizione di un numero maggiore di dati significativi; se si riuscisse, nello specifico, a riprodurre quelle prescritte dalla normativa [7] sarebbe possibile operare un miglior confronto dei risultati con quelli caratteristici per l'acqua.

Per raggiungere questo obiettivo si potrebbe, ad esempio, progettare un impianto in pressione e, eventualmente, prevedere un collegamento tra i serbatoi di scarico e di mandata dotato della strumentazione adeguata per ristabilire la pressione di monte. Questo accorgimento permetterebbe il riutilizzo dell'azoto, mantenendo le condizioni di pressione e temperatura necessarie per la sua permanenza allo stato liquido, con notevole risparmio di tempo e denaro.

- Un possibile studio futuro potrebbe prevedere il confronto del comportamento dei due fluidi non solo dal punto di vista della caduta di pressione, e quindi del coefficiente di flusso C_V , ma anche del fenomeno della cavitazione. Come già spiegato, infatti, la cavitazione è un fenomeno da tenere fortemente in considerazione nella progettazione di valvole di regolazione, e la caratterizzazione del fenomeno per i fluidi criogenici rappresenterebbe un importante passo avanti per il corretto dimensionamento e applicazione.
- Siccome la normativa fornisce le indicazioni progettuali per testare valvole e dispositivi su scala minore, è possibile che una diversa conformazione geometrica agevoli la determinazione del coefficiente di recupero sia in acqua che in azoto liquido. Questo permetterebbe di aggiungere un altro termine di confronto oltre al coefficiente di flusso e ai coefficienti caratteristici della cavitazione.
- Lo studio di un flusso di azoto liquido al passaggio attraverso un piatto forato merita di essere eseguito anche dal punto di vista computazionale. La fluidodinamica computazionale o CFD (*Computational Fluid Dynamics*) è infatti la tecnica che permette lo studio computazionale

di problemi di fluidodinamica, mediante la risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes e delle equazioni ad esse associate. La risoluzione di casi reali come questo, in cui compaiono flussi turbolenti, richiedono obbligatoriamente un approccio numerico basato su diversi modelli. Questo studio permetterebbe di disporre della possibilità di confrontare i risultati sperimentali con quelli numerici e di utilizzare il modello numerico, dopo la validazione, per estendere il campo dei risultati.

- Infine si potrà prevedere di sviluppare questo tipo di studio mediante prove su valvole, che costituiscono geometrie ben più complesse rispetto ai piatti forati. Le stesse condizioni operative che risultano idonee per i test sui diaframmi considerati, infatti, potrebbero non essere idonee ai test su vere e proprie valvole. Per questo motivo questa evoluzione necessiterà di uno studio apposito.

Appendice A

Valori di densità per l'azoto liquido

Tabella A.1: Valori di densità ρ [kg m^{-3}] per l'azoto liquido ($T = 70\text{K} \div 86\text{K}$)

P [bar]	T [K/°C]																
	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
1	840,87	836,67	831,86	827,32	822,79	818,27	813,75	808,61									
2	841,04	836,84	832,15	827,67	823,18	818,69	814,19	809,67	805,13	800,55	796,41	791,27	786,55	781,42			
3	841,21	837,01	832,43	827,99	823,54	819,08	814,60	810,09	805,54	800,96	796,67	791,65	786,91	781,77	777,24	772,29	767,27
4	841,37	837,18	832,69	828,29	823,88	819,44	814,97	810,47	805,92	801,33	796,94	792,00	787,25	782,11	777,55	772,59	767,55
5	841,54	837,34	832,93	828,57	824,19	819,77	815,31	810,82	806,28	801,69	797,20	792,34	787,58	782,44	777,86	772,89	767,84
6	841,71	837,51	833,16	828,83	824,47	820,07	815,63	811,14	806,60	802,01	797,46	792,67	787,90	782,76	778,17	773,19	768,14
7	841,87	837,68	833,38	829,08	824,73	820,35	815,91	811,44	806,90	802,32	797,72	792,97	788,21	783,07	778,47	773,50	768,45
8	842,04	837,83	833,59	829,31	824,99	820,61	816,19	811,72	807,20	802,62	797,98	793,27	788,51	783,68	778,77	773,80	768,75
9	842,20	838,01	833,78	829,50	825,19	820,83	816,41	811,95	807,44	802,87	798,24	793,54	788,79	783,97	779,08	774,12	769,08
10	842,37	838,18	833,96	829,70	825,39	821,04	816,63	812,18	807,67	803,11	798,49	793,81	789,07	784,26	779,38	774,43	769,41
11	842,53	838,36	834,14	829,88	825,58	821,24	816,84	812,40	807,90	803,35	798,74	794,06	789,33	784,53	779,67	774,73	769,73
12	842,70	838,53	834,32	830,07	825,78	821,44	817,06	812,62	808,13	803,59	798,99	794,33	789,60	784,82	779,96	775,04	770,05
13	842,86	838,70	834,50	830,26	825,98	821,65	817,27	812,84	808,36	803,83	799,24	794,59	789,87	785,10	780,26	775,35	770,37
14	843,03	838,87	834,68	830,45	826,18	821,85	817,49	813,07	808,60	804,07	799,49	794,85	790,14	785,38	780,55	775,65	770,68
15	843,19	839,05	834,87	830,64	826,37	822,06	817,70	813,29	808,83	804,31	799,74	795,11	790,41	785,66	780,84	775,95	771,00
16	843,35	839,17	834,93	830,67	826,38	822,05	817,69	813,29	808,85	804,37	799,99	795,24	790,60	785,90	781,13	776,30	771,40
17	843,52	839,35	835,11	830,85	826,57	822,25	817,90	813,51	809,07	804,60	800,24	795,50	790,86	786,17	781,42	776,60	771,72
18	843,68	839,52	835,29	831,04	826,76	822,45	818,10	813,72	809,30	804,83	800,48	795,75	791,13	786,45	781,71	776,90	772,03
19	843,84	839,69	835,47	831,22	826,95	822,65	818,31	813,93	809,52	805,06	800,73	796,00	791,39	786,72	781,99	777,20	772,34
20	844,00	839,83	835,58	831,31	827,02	822,71	818,38	814,02	809,62	805,18	800,98	796,17	791,60	786,97	782,28	777,52	772,70
21	844,17	840,03	835,82	831,59	827,33	823,04	818,72	814,36	809,96	805,52	801,23	796,50	791,91	787,26	782,56	777,79	772,96
22	844,33	840,19	835,99	831,77	827,52	823,24	818,92	814,57	810,19	805,75	801,47	796,75	792,17	787,54	782,84	778,09	773,27
23	844,49	840,36	836,17	831,95	827,71	823,44	819,13	814,79	810,41	805,99	801,72	797,00	792,43	787,81	783,13	778,39	773,58
24	844,65	840,53	836,35	832,14	827,90	823,63	819,34	815,00	810,63	806,22	801,96	797,25	792,70	788,08	783,41	778,68	773,89
25	844,81	840,70	836,52	832,32	828,09	823,83	819,54	815,22	810,85	806,45	802,21	797,50	792,96	788,36	783,70	778,98	774,20

Tabella A.2: Valori di densità ρ [kg m^{-3}] per l'azoto liquido ($T = 87\text{K} \div 103\text{K}$)

P [bar]	T [K/°C]																
	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	-186	-185	-184	-183	-182	-181	-180	-179	-178	-177	-176	-175	-174	-173	-172	-171	-170
1																	
2																	
3	762,15																
4	762,42	757,21	751,90	746,15													
5	762,71	757,49	752,19	746,56	741,28	735,68	729,97										
6	763,01	757,79	752,49	746,96	741,61	736,02	730,33	724,54	718,52								
7	763,32	758,11	752,81	747,36	741,95	736,38	730,72	724,95	719,03	713,11	707,02	700,88					
8	763,62	758,42	753,13	747,76	742,30	736,75	731,10	725,36	719,53	713,59	707,55	701,41	695,15	688,79			
9	763,97	758,78	753,51	748,15	742,71	737,18	731,56	725,85	720,03	714,12	708,11	701,99	695,77	689,44	683,00		
10	764,31	759,14	753,89	748,55	743,13	737,62	732,02	726,32	720,54	714,65	708,67	702,58	696,39	690,09	683,68	677,16	670,52
11	764,65	759,49	754,25	748,93	743,53	738,04	732,46	726,79	721,03	715,17	709,21	703,15	696,99	690,73	684,35	677,87	671,27
12	764,98	759,84	754,62	749,31	743,93	738,46	732,90	727,25	721,51	715,68	709,75	703,72	697,59	691,35	685,01	678,56	672,00
13	765,31	760,18	754,98	749,69	744,33	738,88	733,34	727,71	722,00	716,19	710,28	704,28	698,18	691,97	685,66	679,25	672,72
14	765,64	760,53	755,34	750,07	744,72	739,29	733,77	728,17	722,47	716,69	710,81	704,83	698,76	692,59	686,31	679,93	673,44
15	765,97	760,87	755,70	750,44	745,11	739,70	734,20	728,62	722,95	717,19	711,33	705,39	699,34	693,20	686,96	680,61	674,16
16	766,43	761,38	756,26	750,81	745,75	740,37	734,89	729,31	723,64	717,86	711,98	705,98	699,88	693,81	687,31	680,84	674,25
17	766,76	761,73	756,62	751,18	746,14	740,78	735,32	729,76	724,11	718,36	712,50	706,53	700,45	694,41	687,93	681,50	674,93
18	767,09	762,07	756,97	751,54	746,54	741,19	735,75	730,21	724,58	718,85	713,01	707,07	701,01	695,01	688,56	682,15	675,62
19	767,41	762,41	757,33	751,90	746,92	741,59	736,17	730,66	725,05	719,34	713,53	707,61	701,58	695,61	689,17	682,79	676,29
20	767,81	762,85	757,80	752,26	747,46	742,15	736,75	731,25	725,65	719,93	714,11	708,17	702,11	696,20	689,62	683,17	676,59
21	768,06	763,08	758,04	752,62	747,70	742,41	737,02	731,55	725,98	720,31	714,55	708,67	702,69	696,80	690,40	684,08	677,63
22	768,38	763,42	758,39	752,99	748,09	742,81	737,45	731,99	726,44	720,80	715,05	709,21	703,25	697,38	691,01	684,71	678,30
23	768,71	763,76	758,74	753,35	748,47	743,21	737,87	732,43	726,91	721,28	715,56	709,74	703,80	697,96	691,61	685,35	678,96
24	769,03	764,10	759,10	753,71	748,86	743,62	738,29	732,87	727,37	721,76	716,06	710,26	704,35	698,54	692,22	685,98	679,62
25	769,35	764,44	759,45	754,07	749,24	744,02	738,71	733,31	727,82	722,24	716,56	710,78	704,90	699,12	692,82	686,60	680,28

Tabella A.3: Valori di densità ρ [kg m^{-3}] per l'azoto liquido ($T = 104\text{K} \div 119\text{K}$)

P [bar]	T [$K/^{\circ}C$]																		
	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119			
1	-169	-168	-167	-166	-165	-164	-163	-162	-161	-160	-159	-158	-157	-156	-155	-154			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11	664,56																		
12	665,32	658,53	651,63																
13	666,09	659,34	652,47	645,49															
14	666,85	660,14	653,32	646,38	639,32														
15	667,60	660,94	654,16	647,27	640,26	633,14													
16	667,52	660,67	653,67	646,54	639,26	631,83	624,22	616,53											
17	668,24	661,42	654,46	647,36	640,12	632,73	625,15	617,51	609,66										
18	668,95	662,16	655,24	648,17	640,97	633,62	626,08	618,48	610,68	602,72									
19	669,66	662,90	656,01	648,99	641,82	634,51	627,01	619,45	611,69	603,77	595,70								
20	669,87	663,01	656,00	648,83	641,51	634,03	626,32	618,57	610,59	602,42	594,08	585,55							
21	671,07	664,38	657,55	650,59	643,50	636,27	628,84	621,37	613,69	605,87	597,88	589,74	581,44						
22	671,77	665,10	658,31	651,39	644,33	637,14	629,75	622,32	614,68	606,90	598,97	590,87	582,62						
23	672,46	665,83	659,07	652,18	645,16	638,00	630,65	623,26	615,67	607,93	600,04	591,99	583,78	575,41					
24	673,15	666,55	659,83	652,97	645,99	638,86	631,55	624,20	616,65	608,96	601,11	593,11	584,95	576,63	568,14				
25	673,83	667,27	660,57	653,75	646,80	639,72	632,44	625,13	617,63	609,97	602,17	594,21	586,10	577,83	569,40	560,80			

Appendice B

Valori di viscosità per l'azoto liquido

Tabella B.1: Valori di viscosità dinamica μ [10^{-5} N s m $^{-2}$] per l'azoto liquido ($T = 70K \div 86K$)

P [bar]	T [K/°C]																
	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
1	21,13	20,13	19,19	18,31	17,47	16,67	15,92	15,24									
2	21,17	20,18	19,24	18,35	17,51	16,71	15,96	15,25	14,59	13,96	13,38	12,81	12,29	11,81			
3	21,21	20,22	19,28	18,39	17,55	16,75	16,00	15,29	14,62	13,99	13,42	12,84	12,32	11,84	11,38	10,95	10,55
4	21,26	20,27	19,33	18,43	17,59	16,79	16,04	15,33	14,66	14,03	13,45	12,88	12,35	11,86	11,41	10,98	10,58
5	21,30	20,31	19,37	18,48	17,63	16,83	16,08	15,36	14,69	14,06	13,48	12,91	12,39	11,89	11,44	11,01	10,60
6	21,35	20,36	19,41	18,52	17,67	16,87	16,12	15,40	14,73	14,10	13,52	12,94	12,42	11,92	11,46	11,03	10,63
7	21,39	20,40	19,46	18,56	17,71	16,91	16,15	15,44	14,77	14,13	13,55	12,97	12,45	11,95	11,49	11,06	10,66
8	21,44	20,45	19,50	18,60	17,76	16,95	16,19	15,48	14,80	14,17	13,59	13,01	12,48	11,98	11,52	11,09	10,68
9	21,49	20,49	19,54	18,65	17,80	16,99	16,23	15,51	14,84	14,20	13,62	13,04	12,51	12,01	11,55	11,11	10,71
10	21,54	20,54	19,59	18,69	17,84	17,03	16,27	15,55	14,87	14,23	13,66	13,07	12,54	12,04	11,58	11,14	10,73
11	21,58	20,58	19,63	18,73	17,88	17,07	16,31	15,59	14,91	14,27	13,69	13,10	12,57	12,07	11,61	11,17	10,76
12	21,62	20,63	19,68	18,77	17,92	17,11	16,35	15,63	14,95	14,30	13,72	13,13	12,60	12,10	11,63	11,20	10,79
13	21,67	20,67	19,72	18,82	17,96	17,15	16,39	15,66	14,98	14,34	13,76	13,17	12,63	12,13	11,66	11,22	10,81
14	21,71	20,72	19,76	18,86	18,00	17,19	16,43	15,70	15,02	14,37	13,79	13,20	12,76	12,16	11,69	11,25	10,84
15	21,76	20,76	19,81	18,90	18,04	17,23	16,46	15,74	15,05	14,41	13,83	13,23	12,69	12,19	11,72	11,28	10,86
16	21,81	20,81	19,85	18,95	18,09	17,27	16,50	15,78	15,09	14,44	13,86	13,26	12,72	12,22	11,75	11,30	10,89
17	21,85	20,85	19,90	18,99	18,13	17,31	16,54	15,81	15,13	14,48	13,89	13,29	12,75	12,25	11,77	11,33	10,91
18	21,90	20,90	19,94	19,03	18,17	17,35	16,58	15,85	15,16	14,51	13,93	13,33	12,79	12,28	11,80	11,36	10,94
19	21,94	20,94	19,98	19,07	18,21	17,39	16,62	15,89	15,20	14,55	13,96	13,36	12,82	12,31	11,83	11,38	10,97
20	21,97	20,97	20,01	19,11	18,24	17,43	16,66	15,92	15,23	14,58	14,00	13,39	12,85	12,34	11,86	11,42	11,00
21	22,03	21,03	20,07	19,16	18,29	17,47	16,70	15,96	15,27	14,62	14,03	13,42	12,88	12,37	11,89	11,44	11,02
22	22,08	21,08	20,11	19,20	18,33	17,51	16,73	16,00	15,31	14,65	14,06	13,45	12,91	12,40	11,92	11,47	11,04
23	22,13	21,12	20,16	19,24	18,37	17,55	16,77	16,04	15,34	14,69	14,10	13,49	12,94	12,43	11,94	11,49	11,07
24	22,17	21,17	20,20	19,28	18,42	17,59	16,81	16,07	15,38	14,72	14,13	13,52	12,97	12,46	11,97	11,52	11,10
25	22,22	21,21	20,24	19,33	18,46	17,63	16,85	16,11	15,41	14,76	14,17	13,55	13,00	12,49	12,00	11,55	11,12

Tabella B.2: Valori di viscosità dinamica $\mu [10^{-5} \text{ N s m}^{-2}]$ per l'azoto liquido ($T = 87\text{K} \div 103\text{K}$)

$P [\text{bar}]$	$T [K/^{\circ}\text{C}]$																							
	87 -186	88 -185	89 -184	90 -183	91 -182	92 -181	93 -180	94 -179	95 -178	96 -177	97 -176	98 -175	99 -174	100 -173	101 -172	102 -171	103 -170							
1																								
2																								
3	10,18																							
4	10,20	9,86	9,53	9,21																				
5	10,23	9,88	9,55	9,23	8,96	8,70	8,45																	
6	10,25	9,90	9,57	9,25	8,98	8,72	8,46	8,23	8,01															
7	10,28	9,93	9,60	9,27	9,00	8,73	8,48	8,25	8,02	7,81	7,61	7,42												
8	10,30	9,95	9,62	9,29	9,02	8,75	8,50	8,27	8,04	7,83	7,63	7,44	7,26	7,10										
9	10,33	9,978	9,64	9,31	9,04	8,77	8,52	8,28	8,06	7,85	7,65	7,46	7,27	7,11	6,92									
10	10,35	10,00	9,67	9,33	9,07	8,79	8,54	8,30	8,08	7,87	7,66	7,47	7,29	7,13	6,94	6,67	6,60							
11	10,38	10,02	9,69	9,35	9,09	8,81	8,56	8,32	8,10	7,88	7,68	7,49	7,30	7,15	6,95	6,78	6,61							
12	10,40	10,04	9,71	9,37	9,11	8,83	8,58	8,34	8,11	7,90	7,70	7,50	7,32	7,16	6,97	6,80	6,63							
13	10,43	10,07	9,73	9,39	9,13	8,85	8,60	8,36	8,13	7,92	7,71	7,52	7,34	7,18	6,98	6,81	6,64							
14	10,45	10,09	9,76	9,41	9,15	8,87	8,62	8,37	8,15	7,93	7,73	7,54	7,35	7,20	7,00	6,83	6,66							
15	10,48	10,12	9,78	9,43	9,17	8,89	8,63	8,39	8,17	7,95	7,75	7,55	7,37	7,21	7,01	6,84	6,68							
16	10,50	10,14	9,80	9,45	9,19	8,91	8,65	8,41	8,18	7,97	7,76	7,57	7,38	7,23	7,03	6,86	6,69							
17	10,53	10,16	9,82	9,47	9,21	8,93	8,67	8,43	8,20	7,98	7,78	7,59	7,40	7,25	7,05	6,88	6,71							
18	10,55	10,19	9,85	9,49	9,23	8,95	8,69	8,45	8,22	8,00	7,80	7,60	7,42	7,26	7,06	6,89	6,72							
19	10,58	10,21	9,87	9,51	9,25	8,97	8,71	8,47	8,24	8,02	7,81	7,62	7,43	7,28	7,08	6,91	6,74							
20	10,60	10,24	9,89	9,53	9,27	8,99	8,73	8,48	8,25	8,03	7,83	7,63	7,44	7,29	7,09	6,92	6,75							
21	10,62	10,26	9,91	9,55	9,29	9,01	8,75	8,50	8,27	8,05	7,85	7,65	7,46	7,31	7,11	6,94	6,77							
22	10,65	10,28	9,94	9,57	9,31	9,03	8,77	8,52	8,29	8,07	7,86	7,67	7,48	7,33	7,13	6,96	6,79							
23	10,67	10,30	9,96	9,59	9,33	9,05	8,79	8,54	8,31	8,09	7,88	7,68	7,50	7,34	7,14	6,97	6,80							
24	10,70	10,33	9,98	9,61	9,35	9,07	8,81	8,56	8,32	8,10	7,90	7,70	7,51	7,36	7,16	6,99	6,82							
25	10,72	10,35	10,00	9,63	9,37	9,09	8,82	8,58	8,34	8,12	7,91	7,72	7,53	7,38	7,17	7,00	6,84							

Appendice C

Calcolo dei volumi di azoto liquido

Per stabilire i volumi di azoto liquido necessari allo svolgimento delle prove è necessario calcolare la portata transitante nei vari casi considerati. Per raggiungere tale obiettivo è necessario considerare idealmente due sezioni: la sezione 1, situata all'ingresso della linea, e la sezione 2, situata invece all'uscita della stessa. Per il principio di conservazione dell'energia si ha che l'energia totale posseduta dal fluido nella sezione 1 è pari a quella nella sezione 2 sommata alle perdite di carico che il fluido subisce nel passaggio all'interno dell'impianto.

$$H_1 = H_2 + \Delta H$$

Nella figura C.1 sono indicate le perdite considerate, rappresentate da:

- le perdite distribuite dovute alla scabrezza del tubo lungo la linea principale,
- i due tubi tronco-conici divergenti,
- il raddrizzatore di flusso,
- il piatto forato,
- i due tubi tronco-conici convergenti,
- la valvola di chiusura DN40,
- il brusco restringimento di sezione tra la sezione di passaggio della valvola e il tubo flessibile,
- le perdite distribuite lungo il tubo flessibile,
- le perdite di sbocco nella vasca.

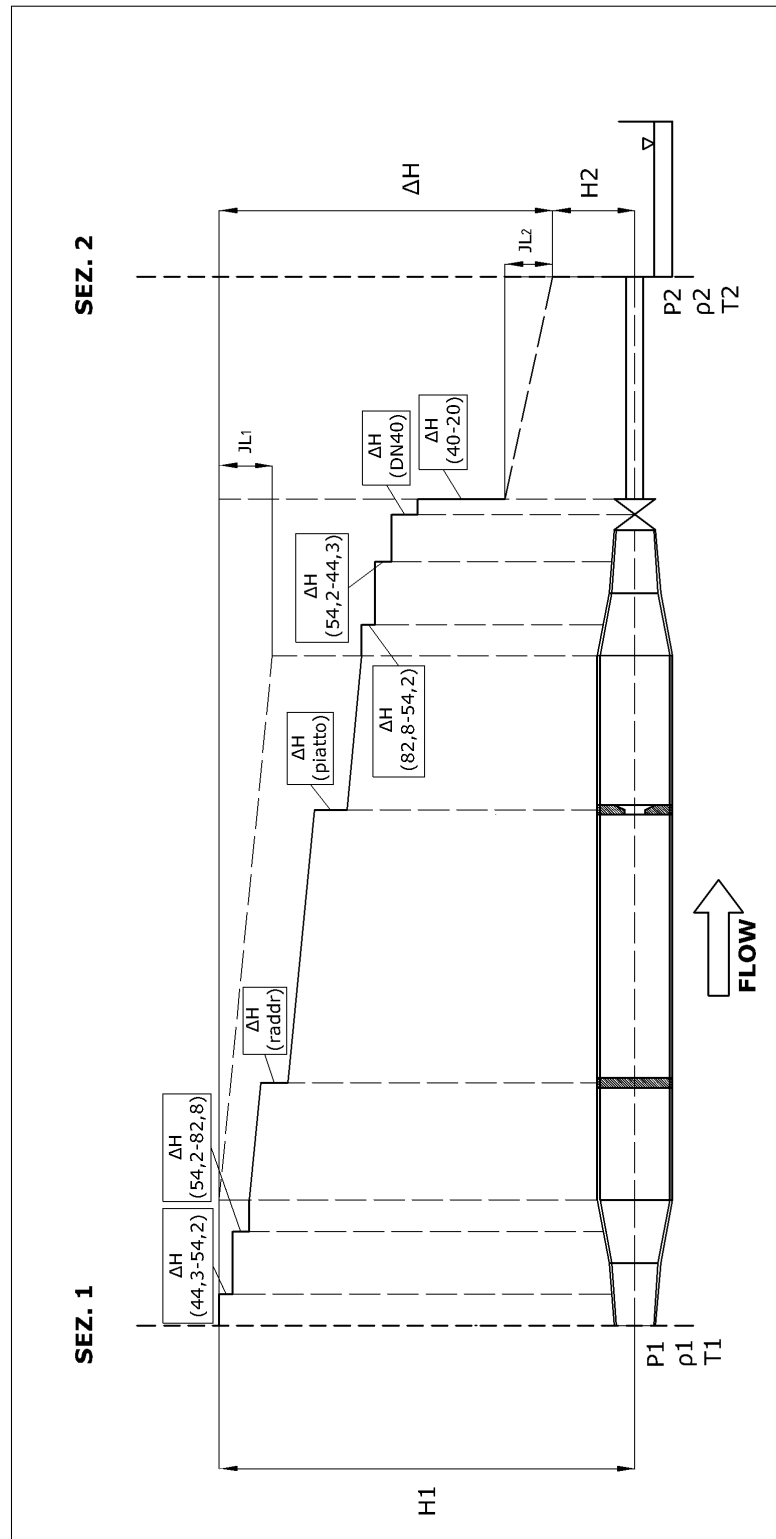


Figura C.1: Perdite di carico del flusso circolante

Esprimendo il principio di conservazione dell'energia tramite il teorema di Bernoulli, si può scrivere la seguente equazione, dove la simbologia utilizzata viene esplicitata in figura C.1.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + JL_1 + \Delta H_{DN40} + \Delta H_{44,3-54,2} + \Delta H_{54,2-82,1} + \Delta H_{raddr} + \Delta H_{piatto} + \Delta H_{82,1-54,2} + \Delta H_{54,2-44,3} + \Delta H_{40-20} + JL_2 \quad (C.1)$$

Si considera la quota geodetica della prima sezione z_1 pari a 0 e quella della seconda, z_2 , pari a 115 cm. Come si vede dalla fotografia di figura 3.12, il tubo flessibile si congiunge alla vasca nella sua parte alta, più precisamente ad un'altezza di 115 cm rispetto all'asse della linea principale. L'equazione si può quindi riscrivere come segue:

$$-z_2 + \frac{1}{g} \left[\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} + Q^2 \left(\frac{1}{2A_1^2} - \frac{1}{2A_2^2} \right) \right] = JL_1 + \Delta H_{DN40} + \Delta H_{44,3-54,2} + \Delta H_{54,2-82,1} + \Delta H_{raddr} + \Delta H_{piatto} + \Delta H_{82,1-54,2} + \Delta H_{54,2-44,3} + \Delta H_{40-20} + JL_2 \quad (C.2)$$

Ipotizzando di applicare il teorema di Bernoulli immediatamente a monte e a valle del flussometro, del piatto forato e della valvola di regolazione, si può notare che tali discontinuità non determinano cambiamenti né della quota geodetica né della velocità del flusso. Ne consegue che la perdita di carico si può rappresentare mediante il solo termine piezometrico.

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

Per questo studio sono molto importanti le condizioni di pressione e temperatura del fluido all'ingresso e all'uscita dall'impianto; quest'ultima, però, risulta incognita in corrispondenza della sezione 2, si ipotizza quindi che la coibentazione le permetta di rimanere costante all'interno dell'impianto. A partire da questi dati, grazie alle tabelle riportate nelle appendici A e B, è possibile stabilire i valori di densità e di viscosità cinematica (tabella C.1).

Di seguito sono riportate le equazioni utilizzate per ricavare le perdite di carico.

- ΔH_{DN40}

Purtroppo non si dispone del coefficiente di flusso caratteristico di questa valvola, è stata quindi effettuata una ricerca in rete su valvole aventi le stesse caratteristiche di quella in questione; tale ricerca ha condotto all'attribuzione di massima

$$C_V = 30 \frac{USgal}{\min\sqrt{psi}}$$

Tabella C.1: Caratteristiche fisiche dell'azoto in ingresso e in uscita

	Ingresso	Uscita
Pressione	14 bar	1 bar
Temperatura	-196 °C	-196 °C
Densità ρ	813,07 kg m ⁻³	808,61 kg m ⁻³
Viscosità dinamica μ	15,70 × 10 ⁻⁵ Pa s	15,24 × 10 ⁻⁵ Pa s

Introducendo una costante, pari a 14,42, che permette di correlare il coefficiente C_V con la portata misurata in $l \text{ min}^{-1}$ e la pressione in bar , si applica la definizione 2.1 di pag. 11 e si ricava

$$C_V \left[\frac{l}{\text{min}\sqrt{\text{bar}}} \right] = \frac{Q \left[\frac{l}{\text{min}} \right]}{14,42} \sqrt{\frac{SG}{\Delta P [\text{bar}]}} \quad (\text{C.3})$$

Si può quindi ricavare la caduta di pressione, sistemando l'unità di misura della pressione:

$$\Delta P [\text{Pa}] \cdot \frac{1}{10^5} \left[\frac{\text{bar}}{\text{Pa}} \right] = \left(\frac{Q^2 \left[\frac{l}{\text{min}} \right]}{14,42^2 \cdot C_V^2 \left[\frac{l}{\text{min}\sqrt{\text{bar}}} \right]} \cdot \frac{\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}{\rho_{H_2O} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} \right) \times 10^5 \left[\frac{\text{Pa}}{\text{bar}} \right] \quad (\text{C.4})$$

Si noti, per ora, che l'unica incognita in questa equazione è rappresentata dalla portata Q , mentre tutti gli altri termini sono noti. In definitiva si ricava che

$$\begin{aligned} \Delta H_{DN40} [m] &= \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \left[\frac{\cancel{\text{kg}}}{\cancel{\text{m}} \cdot \cancel{\text{s}^2}} \cdot \frac{\cancel{\text{s}^2} \cdot \cancel{\text{m}^2}}{\cancel{\text{kg}}} \right] \\ &= \frac{Q^2 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \cdot 60^2 \left[\frac{\text{s}}{\text{min}} \right]^2 \cdot 1000^2 \left[\frac{l}{\text{m}^3} \right]^2}{g \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 14,42^2 \cdot C_V^2 \left[\frac{l}{\text{min}\sqrt{\text{bar}}} \right] \cdot \rho_{H_2O} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} \times 10^5 \left[\frac{\text{Pa}}{\text{bar}} \right] \\ &= \left(\frac{Q^2 \cdot 60000^2}{9,81 \cdot 14,42^2 \cdot 30^2 \cdot 998} \times 10^5 \right) \\ &\quad \left[\frac{\cancel{\text{m}^6} \cdot \cancel{\text{s}^2} \cdot \cancel{\text{l}^2} \cdot \cancel{\text{s}^2} \cdot \cancel{\text{min}^2} \cdot \cancel{\text{bar}} \cdot \cancel{\text{kg}} \cdot \cancel{\text{m}^3}}{\cancel{\text{m}} \cdot \cancel{\text{s}^2} \cdot \cancel{\text{s}^2} \cdot \cancel{\text{min}^2} \cdot \cancel{\text{m}^6} \cdot \cancel{\text{m}} \cdot \cancel{\text{l}^2} \cdot \cancel{\text{kg}} \cdot \cancel{\text{bar}}} \right] \\ &= \left(196485 \cdot Q^2 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \right) [m] \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

- ΔH_{raddr}

Nel manuale del flussimetro [19, p. 18] è riportata una formula che

lega la caduta di pressione con la velocità del flusso, e quindi anche con la sua portata:

$$\begin{aligned}\Delta P_{raddr} [mbar] &= 0,0085 \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot v^2 \left[\frac{m}{s} \right] \\ &= 0,0085 \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \frac{Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{A^2 [m^2]}\end{aligned}$$

Si ricava nuovamente la caduta di pressione, rendendo coerenti le unità di misura:

$$\begin{aligned}\Delta P [Pa] \cdot \frac{1}{10^2} \left[\frac{mbar}{Pa} \right] &= 0,85 \cdot \frac{1}{10^2} \left[\frac{mbar}{Pa} \right] \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \frac{Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{A^2 [m^2]} \\ \Delta P [Pa] \cdot &= 0,85 \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \frac{Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{A^2 [m^2]}\end{aligned}$$

Per stabilire l'area di passaggio del flusso bisogna considerare il diametro interno del tubo:

$$\Phi_{int} = 88,9 - (2 \cdot 3,05) = 82,8 \text{ mm}$$

$$A = \frac{82,8^2}{4} \cdot \pi = 5384,56 \text{ mm}^2 = 53,85 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (C.6)$$

In definitiva si ricava che

$$\begin{aligned}\Delta H_{raddr} [m] &= \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \left[\frac{\cancel{kg} \cdot \cancel{s^2} \cdot m^2}{\cancel{m} \cdot \cancel{s^2} \cdot \cancel{kg}} \right] \\ &= \frac{0,85 \cdot Q^2}{9,81 \cdot (53,85 \times 10^{-4})^2} \left[\frac{\cancel{s^2} \cdot m^6}{\cancel{m} \cdot \cancel{m^4} \cdot \cancel{s^2}} \right] \\ &= \left(2988 \cdot Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right] \right) [m]\end{aligned} \quad (C.7)$$

- ΔH_{piatto}

Si considera inizialmente il piatto normato, caratterizzato da un foro di dimensione maggiore rispetto agli altri, che quindi consentirà il passaggio di una portata maggiore. Si considera ovviamente il valore di C_V indicato dalla normativa, pari a 52 (formula 2.7 di pag. 22). Si segue quindi il medesimo procedimento utilizzato per ricavare ΔH_{DN40} , operando un cambiamento di unità di misura all'coefficiente di flusso e uniformando le unità di misura, come riportato nelle equazioni C.3 e C.4.

Si ricava quindi:

$$\begin{aligned}
 \Delta H_{\text{piatto}} [m] &= \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \left[\frac{\cancel{kg} \cdot \cancel{s^2} \cdot m^2}{m \cdot \cancel{s^2}} \cdot \frac{\cancel{s^2} \cdot m^2}{\cancel{kg}} \right] \\
 &= \frac{Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot 60^2 \left[\frac{s}{min} \right]^2 \cdot 1000^2 \left[\frac{l}{m^3} \right]^2}{g \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot 14,42^2 \cdot C_V^2 \left[\frac{l}{min \sqrt{bar}} \right] \cdot \rho_{H_2O} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \times 10^5 \left[\frac{Pa}{bar} \right] \\
 &= \left(\frac{Q^2 \cdot 60000^2}{9,81 \cdot 14,42^2 \cdot 52^2 \cdot 998} \times 10^5 \right) \\
 &\quad \left[\frac{m^6 \cdot \cancel{s^2} \cdot l^2 \cdot \cancel{s^2} \cdot min^2 \cdot bar \cdot \cancel{kg} \cdot m^3}{m \cdot \cancel{s^2} \cdot \cancel{s^2} \cdot min^2 \cdot m^6 \cdot m \cdot l^2 \cdot \cancel{kg} \cdot bar} \right] \\
 &= \left(65398 \cdot Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right] \right) [m]
 \end{aligned}
 \tag{C.8}$$

Ci si appresta ora a determinare le perdite di carico causate dai tratti di tubo tronco-conici convergenti e divergenti (figura C.2)

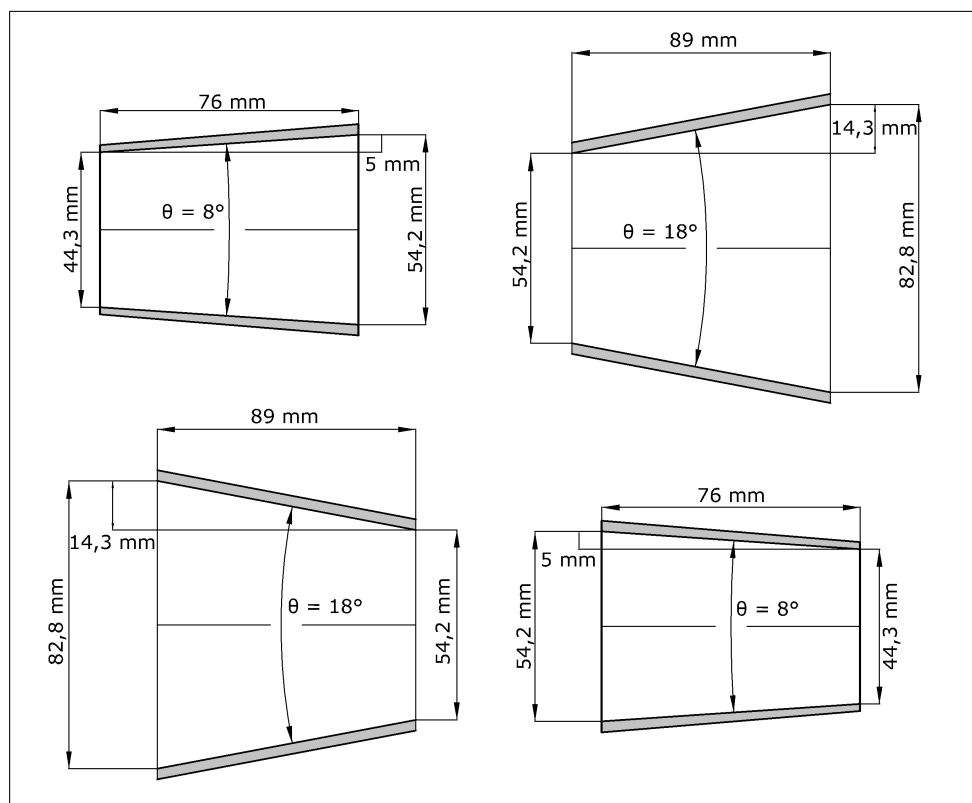


Figura C.2: Particolari geometrici dei tratti tronco-conici

In linea generale tali perdite si quantificano facendo ricorso a formule empiriche corredate da coefficienti numerici variabili caso per caso, detti coefficienti di resistenza localizzata. Tali perdite sono proporzionali all'energia cinetica posseduta dal fluido secondo la seguente formula:

$$\Delta H = K \frac{v^2}{2g} \quad (\text{C.9})$$

- $\Delta H_{82,8-54,2}$ $\Delta H_{54,2-44,3}$

Tali discontinuità consistono in due convergenti, che quindi riducono gradualmente il diametro della sezione di passaggio del fluido, da 82,1 mm a 54,2 mm nel primo caso e da 54,2 mm a 44,3 mm nel secondo. In linea generale si può affermare che questo tipo di discontinuità comporta una perdita di carico molto bassa; senza precisare l'entità della riduzione di sezione, infatti, si può assegnare al coefficiente K un valore pari a 0,05. Le sezioni di passaggio del fluido sono:

$$A_{54,2} = \frac{54,2^2 \cdot \pi}{4} = 2307,2 \text{ mm}^2 = 23,07 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (\text{C.10})$$

$$A_{44,3} = \frac{44,3^2 \cdot \pi}{4} = 1541,3 \text{ mm}^2 = 15,41 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (\text{C.11})$$

Ne consegue che

$$\Delta H_{82,8-54,2} = 0,05 \frac{Q^2}{2 \cdot 9,81 \cdot (23,07 \times 10^{-4})^2} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \cancel{\text{s}^2}}{\cancel{\text{s}^2} \cdot \cancel{\text{m}^2}} \right] \quad (\text{C.12})$$

$$\Delta H_{82,8-54,2} = \left(478,8 \cdot Q^2 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \right) [\text{m}] \quad (\text{C.13})$$

$$\Delta H_{54,2-44,3} = 0,05 \frac{Q^2}{2 \cdot 9,81 \cdot (15,41 \times 10^{-4})^2} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \cancel{\text{s}^2}}{\cancel{\text{s}^2} \cdot \cancel{\text{m}^2}} \right] \quad (\text{C.14})$$

$$\Delta H_{54,2-44,3} = \left(1073,2 \cdot Q^2 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \right) [\text{m}] \quad (\text{C.15})$$

- $\Delta H_{44,3-54,2}$ $\Delta H_{54,2-82,8}$

Tali discontinuità consistono in due divergenti, che quindi aumentano gradualmente il diametro della sezione di passaggio del fluido, da 44,3 mm a 54,2 mm nel primo caso e da 54,2 mm a 82,8 mm nel secondo. Per questo tipo di discontinuità il valore del coefficiente K dipende dalla geometria, secondo lo schema C.3.

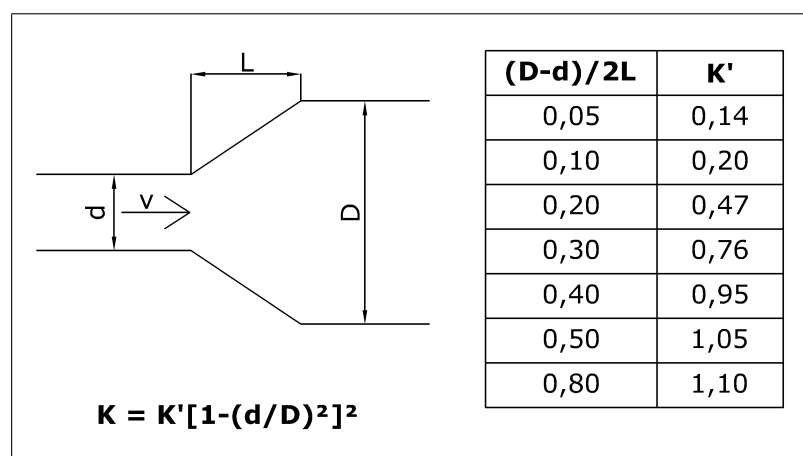


Figura C.3: Coefficiente di resistenza localizzata nel divergente

$$\frac{(54,2 - 44,3)}{2 \cdot 76} = 0,07$$

$$\frac{(82,8 - 54,2)}{2 \cdot 89} = 0,16$$

Operando un'interpolazione lineare rispetto ai dati riportati nella tabella di figura C.3 si ottengono i seguenti valori di K' :

$$\frac{0,07 - 0,05}{0,10 - 0,05} = \frac{K'_{44,3-54,2} - 0,14}{0,20 - 0,14} K'_{44,3-54,2} = 0,16$$

ù

$$\frac{0,16 - 0,10}{0,20 - 0,10} = \frac{K'_{54,2-82,8} - 0,20}{0,47 - 0,20} K'_{54,2-82,8} = 0,36$$

Si ricavano quindi i due coefficienti di resistenza localizzata K :

$$K_{44,3-54,2} = 0,16 \cdot \left(1 - \frac{44,3^2}{54,2^2}\right)^2$$

$$K_{44,3-54,2} = 0,02$$

$$K_{54,2-82,8} = 0,36 \cdot \left(1 - \frac{54,2^2}{82,8^2}\right)^2$$

$$K_{54,2-82,8} = 0,18$$

E' ora possibile determinare le perdite di carico dovute ai divergenti.

$$\Delta H_{44,3-54,2} = 0,02 \frac{Q^2}{2 \cdot 9,81 \cdot (15,41 \times 10^{-4})^2} \left[\frac{m^2 \cdot s^2}{s^2 \cdot m} \right] \quad (C.16)$$

$$\Delta H_{44,3-54,2} = \left(429,3 \cdot Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right] \right) [m] \quad (C.17)$$

$$\Delta H_{54,2-82,8} = 0,18 \frac{Q^2}{2 \cdot 9,81 \cdot (23,07 \times 10^{-4})^2} \left[\frac{m^2 \cdot s^2}{s^2 \cdot m} \right] \quad (C.18)$$

$$\Delta H_{54,2-82,8} = \left(1723,8 \cdot Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right] \right) [m] \quad (C.19)$$

- ΔH_{40-20}

Si calcola ora la perdita di carico che subisce il flusso nel momento in cui la sezione di passaggio subisce un brusco restringimento. Come per i convergenti e i divergenti la perdita di carico è proporzionale all'energia cinetica posseduta dal fluido secondo la C.9. Siccome il diametro della sezione di passaggio si riduce della metà il valore del coefficiente di contrazione è pari a 0,5. Il valore di velocità da inserire nella formula è quello proprio della sezione ristretta, quindi si ha:

$$\Delta H_{40-20} = 0,5 \cdot \frac{Q^2}{A_{20}^2} \cdot \frac{1}{2g}$$

$$\Delta H_{40-20} = 0,5 \cdot \frac{Q^2}{A_{20}^2} \cdot \frac{1}{2g} \left[\frac{m^6 \cdot s^2}{s^2 \cdot m^4 \cdot m} \right]$$

La sezione ristretta è pari a:

$$A_{20} = \frac{20^2 \cdot \pi}{4} = 314,16 \text{ mm}^2 = 3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (C.20)$$

Ne consegue che

$$\Delta H_{40-20} = 0,5 \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot 9,81 \cdot (3,14 \times 10^{-4})^2} \quad (C.21)$$

$$\Delta H_{40-20} = \left(258471 \cdot Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right] \right) [m] \quad (C.22)$$

- JL_1

Questo termine rappresenta le perdite di carico distribuite, dovute alla viscosità del fluido, e quindi indipendenti dalle singolarità presenti lungo il tubo e dalla sua particolare geometria. L'espressione più generale

che lega la perdita di carico J per unità di lunghezza L della condotta di un fluido incomprimibile in moto permanente (ipotesi accettabili) è quella di *Darcy-Weisbach*.

$$J = \frac{\lambda v^2}{2gD} \quad (\text{C.23})$$

dove λ è un coefficiente adimensionale di resistenza, funzione generalmente della scabrezza relativa al tubo e al numero di Reynolds. Il numero di Reynolds (Re) è un gruppo adimensionale, proporzionale al rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosive.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (\text{C.24})$$

Tale gruppo permette di valutare se il flusso di scorrimento di un fluido è in regime laminare (per valori più bassi del numero di Reynolds) o turbolento (per valori più elevati del numero di Reynolds). In caso di moto turbolento di tubo liscio λ dipende, come nel moto laminare, unicamente dal numero di Reynolds, secondo la relazione

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (\text{C.25})$$

che nel piano bilogarithmico presenta andamento lineare. E' importante sottolineare che l'ipotesi di moto turbolento andrà dimostrata a posteriori, verificando che il numero di Reynolds è compreso tra 4000 e 100000.

Nella formulazione del numero di Reynolds vengono attribuiti valori di densità ρ e viscosità dinamica μ medi tra quelli caratteristici delle condizioni di monte e di valle, usufruendo delle tabelle riportate nelle appendici A e B.

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\bar{\rho} \left[\frac{kg}{m^3} \right] Q \left[\frac{m^3}{s} \right] D [m]}{\bar{\mu} [Pa \cdot s] A [m^2]} \\ &= \frac{810,075 \cdot Q \cdot 82,8 \times 10^{-3}}{15,5 \times 10^{-5} \cdot 53,85 \times 10^{-4}} \left[\frac{\cancel{kg} \cdot m^3 \cdot m \cdot m \cdot s^2}{m^3 \cdot s \cdot \cancel{kg} \cdot m^2} \right] \\ &= \left(8,04 \times 10^7 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] \right) \end{aligned} \quad (\text{C.26})$$

Combinando le equazioni C.23, C.25 e C.26 si ricava l'espressione delle perdite distribuite JL.

$$\begin{aligned}
 JL_1 [m] &= \frac{0,316}{(8,04 \times 10^7 \cdot Q)^{0,25}} \cdot \frac{Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{2g \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot D [m] \cdot A^2 [m^2]} \cdot L [m] \\
 &= \frac{0,316}{(8,04 \times 10^7 \cdot Q)^{0,25}} \cdot \frac{Q^2 \cdot 4,6}{2 \cdot 9,81 \cdot 82,8 \times 10^{-3} \cdot (53,85 \times 10^{-4})^2} \\
 &\quad \left[\frac{m^6 \cdot s^2 \cdot m}{m \cdot m \cdot m^4 \cdot s^2} \right] \\
 JL_1 &= \left(325,86 \cdot Q^{1,75} \left[\frac{m^3}{s} \right] \right) [m]
 \end{aligned} \tag{C.27}$$

- JL_2

Questo termine rappresenta le perdite di carico distribuite lungo il tubo flessibile. Tali perdite si ricavano diversamente da quelle appena viste, in quanto il tubo flessibile metallico è caratterizzato da un coefficiente di scabrezza non trascurabile. Nello specifico

$$\epsilon = 4,6 \text{ mm} = 4,6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Dato il diametro limitato e la condizione di tubo fortemente scabro, il moto al suo interno è da ritenersi puramente turbolento. Per questo caso, generalmente, il coefficiente λ si valuta mediante la formula di Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3,71} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right)$$

A causa dell'implicita natura dell'equazione di Colebrook, la determinazione del coefficiente d'attrito λ richiederebbe alcune iterazioni o l'utilizzo di un metodo di risoluzione. Siccome questo studio conduce già di per sè ad un'equazione implicita nella portata Q , si preferisce utilizzare un'equazione esplicita. La letteratura fornisce alcune formule approssimate che conducono ugualmente ad una soluzione. Un esempio è costituito dalla formula di Haaland, così definita:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \log \left[\left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right]$$

Esplicitando λ si ottiene:

$$\lambda = \left(-1,8 \log \left[\left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \right)^{-2}$$

Per determinare le perdite di carico si utilizzano anche le formule già riportate, la C.24 e la C.23.

Il numero di Reynolds è in questo caso:

$$\begin{aligned} Re &= \frac{810,075 \cdot Q \cdot 0,02}{15,5 \times 10^{-5} \cdot 3,14 \times 10^{-4}} \left[\frac{kg \cdot m^3 \cdot m \cdot m \cdot s^2}{m^3 \cdot s \cdot kg \cdot m^2} \right] \\ &= \left(3,33 \times 10^8 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] \right) \end{aligned}$$

In definitiva le perdite distribuite sono:

$$\begin{aligned} JL_2 [m] &= \left(-1,8 \log \left[\left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \right)^{-2} \cdot \frac{Q^2 \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot L [m]}{2 \cdot g \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot D [m] \cdot A^2 [m^2]} \\ &= \left(-1,8 \log \left[\left(\frac{\frac{4,6}{20}}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{3,3 \times 10^{-8} Q} \right] \right)^{-2} \cdot \\ &\quad \frac{Q^2}{2 \cdot 9,81 \cdot (3,14 \times 10^{-5})^2 \cdot 0,02} \cdot 6 \left[\frac{m^6 \cdot s^2 \cdot m}{m \cdot m \cdot m^4 \cdot s^2} \right] \\ JL_2 &= \left[-1,8 \log \left(45,80 \times 10^{-3} + \frac{2,091 \times 10^{-8}}{Q} \right) \right]^{-2} \cdot \frac{Q^2}{1,55 \times 10^{10}} \end{aligned} \quad (C.28)$$

Definite tutte le perdite di carico si procede a sostituire le equazioni C.5, C.7, C.8, C.12, C.14, C.16, C.18, C.21, C.27 e C.28 nella formulazione generale C.2, dove compaiono anche i valori di pressione e di densità del fluido nelle due sezioni:

$$\begin{aligned} P_1 &= 1,4 \times 10^6 \text{ Pa} & \rho_1 &= 813,07 \frac{kg}{m^3} \\ P_2 &= 10^5 \text{ Pa} & \rho_2 &= 808,61 \frac{kg}{m^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-1,15 + \frac{1}{9,81} \\ &\cdot \left[\frac{1,4 \times 10^6}{813,07} - \frac{10^5}{808,61} + Q^2 \left(\frac{1}{2(15,41 \times 10^{-4})^2} - \frac{1}{2(3,14 \times 10^{-4})^2} \right) \right] \\ &= 196485 \cdot Q^2 + 2988 \cdot Q^2 + 65398 \cdot Q^2 + 478,8 \cdot Q^2 + 1073,2 \cdot Q^2 \\ &\quad + 429,3 \cdot Q^2 + 1723,8 \cdot Q^2 + 258471 \cdot Q^2 + 325,86 \cdot Q^{1,75} \\ &+ \left[-1,8 \log \left(45,80 \times 10^{-3} + \frac{2,091 \times 10^{-8}}{Q} \right) \right]^{-2} \cdot \frac{Q^2}{1,55 \times 10^{10}} \end{aligned} \quad (C.29)$$

Questa è un'equazione implicita nella portata Q , che può essere risolta mediante un qualunque software di calcolo. Il risultato è

$$Q(\Phi = 39 \text{ mm}) = 0,00241 \frac{m^3}{s} = 2,41 \frac{dm^3}{s} \quad (\text{C.30})$$

Il valore calcolato è sovrastimato, in quanto rappresenta la portata che si registra quando la valvola di valle è completamente aperta. Come riportato nella sezione 2.3, la determinazione del coefficiente di flusso per ogni provino deve avvenire eseguendo almeno tre prove ad aperture diverse della valvola; si decide, però, di considerare, a favore di sicurezza, tale valore di portata anche per i diversi intervalli di apertura.

Il procedimento seguito per determinare la portata circolante è da ripetere anche per i casi in cui vengono testati gli altri provini (fig. 3.2). L'unico termine a variare è ovviamente la perdita di carico a cavallo del piatto, che viene calcolata utilizzando i valori di coefficiente di flussi ottenuti mediante le prove in acqua, come si riporta nella sezione 4.2. Di seguito si riportano i valori di portata ottenuti:

$$Q(\Phi = 25 \text{ mm}) = 0,00239 \frac{m^3}{s} = 2,39 \frac{dm^3}{s} \quad (\text{C.31})$$

$$Q(\Phi = 15 \text{ mm}) = 0,00225 \frac{m^3}{s} = 2,25 \frac{dm^3}{s} \quad (\text{C.32})$$

$$Q(\Phi = 25 \text{ mm}) = 0,00067 \frac{m^3}{s} = 0,67 \frac{dm^3}{s} \quad (\text{C.33})$$

Per dare una stima di massima del volume di azoto liquido necessario per portare a termine le prove, si decide di ipotizzare che vengano effettuate 4 prove per ogni provino, ognuna della durata di 30 s. A tale volume, però, è necessario aggiungere quello che si prevede di consumare inizialmente per raffreddare l'impianto fino alla temperatura di esercizio. Per questo fine si decide, a favore di sicurezza, di ipotizzare un volume pari a quello che si consumerebbe durante una prova da 2 minuti a portata massima.

$$V = 2,41 \cdot 240 + 2,39 \cdot 120 + 2,25 \cdot 120 + 0,67 \cdot 120$$

$$V = 1216,6 \text{ dm}^3 \quad (\text{C.34})$$

Siccome il volume della cisterna di azoto liquido a disposizione è 10000 l, il risultato ottenuto ne garantisce la disponibilità minima, permettendo anche, in caso di necessità, di ripetere qualche test o di allungare la durata di ciascuna prova. Il volume di azoto liquido effettivamente utilizzato per le prove è stato pari a 4000 l.

Appendice D

Studio della cavitazione

Sebbene non fosse possibile rispettare tutte le condizioni operative dettate dalla normativa [ISO75.23], si è tentato di studiare il fenomeno della cavitazione per tentare di ricostruirne la curva per il piatto con orifizio calibrato, e di dettrminarla per gli altri tre piatti.

Di seguito sono riportate le condizioni che potrebbero aver influenzato lo svolgimento delle prove.

- la frequenza di funzionamento dell'accelerometro installato è molto più bassa rispetto a quella imposta, più precisamente è pari a 2500 Hz mentre range di frequenze caratteristiche del fenomeno della cavitazione è compreso tra 5000 Hz e 50000 Hz.
- la pressione di monte imposta, da mantenere costante durante l'esecuzione delle prove, è pari a 6,9 bar, molto superiore a quella effettivamente presente nell'impianto.
- la normativa consiglia di cominciare ad acquisire i dati a partire dalla condizione con valvola tutta aperta, per poi chiuderla man mano; in realtà si è deciso di seguire questo procedimento a ritroso, ossia aprendo un po' la valvola dopo ogni prova. Seguendo il procedimento indicato, infatti, le acquisizioni sono cominciate in corrispondenza della condizione di massima cavitazione, che ha causato l'ingresso di bolle d'aria nei sensori, sfalsando le misurazioni successive.

Come già accennato nel capitolo 4 la frequenza di acquisizione dei dati è stata settata a 6500 Hz; questa condizione ha concesso la registrazione di massimo tre diverse portate, in modo da non gravare troppo sul peso computazionale delle acquisizioni.

Rispetto ai test eseguiti con il fine di determinare il C_V , queste prove sono state svolte cercando di sfruttare l'intera apertura della valvola, soffermandosi maggiormente sulle condizioni di cavitazione e nelle vicinanze.

Di seguito si commentano i dati acquisiti durante queste prove.

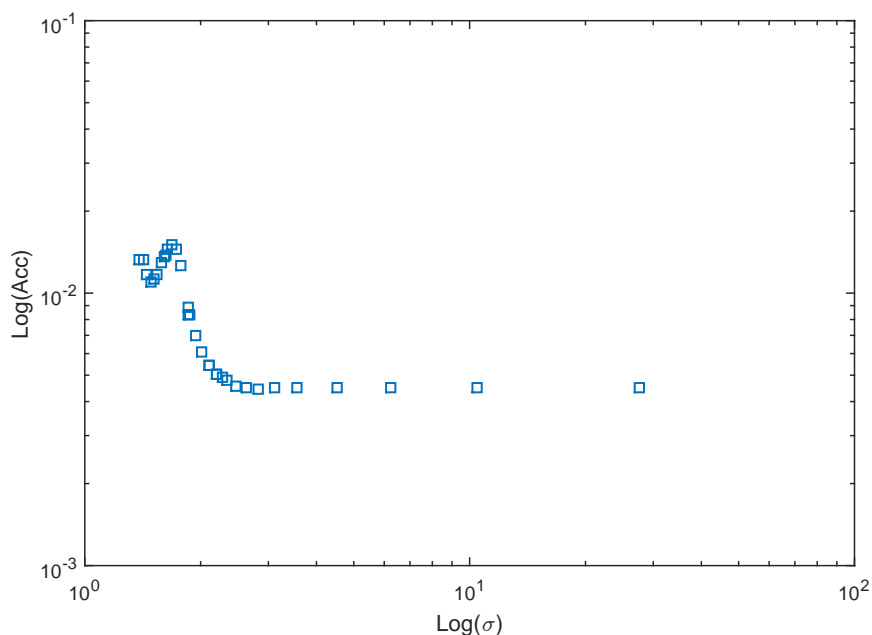


Figura D.1: Ricerca dei σ caratteristici della cavitazione - $\beta = 0,47$

o $\beta = 0,47$

La tabella D.1 riporta i dati acquisiti durante le prove, il coefficiente σ , invece, è ricavato mediante la formula 2.6.

La figura D.1 riporta, su un piano bilogarithmico, la relazione tra accelerazione e σ .

Esaminando l'immagine D.1 si nota subito che l'andamento si discosta molto da quello indicato dalla normativa, e mostrato nel capitolo 2.2.1, figura 2.4. Si è deciso, quindi, di applicare un filtro passa-alto ai dati acquisiti: si spera, in questo modo, di ripulire il segnale dal rumore a bassa frequenza, dovuto dall'ambiente ed alla turbolenza del moto, isolando il rumore ad alta frequenza, caratteristico della cavitazione.

Imponendo una frequenza di soglia pari a 1250 Hz, i nuovi dati sono riportati in tabella D.2.

Il legame tra accelerazione e σ migliora decisamente: dalla figura D.2 si può innanzitutto notare che l'andamento è quello previsto dalla normativa, ma anche che è possibile riconoscere i valori di σ caratteristici.

Tale andamento può ritenersi soddisfacente, in quanto è stato possibile determinare i valori dei tre coefficienti σ caratteristici, che rientra nelle incertezze attorno ai valori definiti dalla normativa (formula 2.9).

Siccome l'applicazione di questo tipo di filtro ha condotto a buoni risultati, è stato applicato anche alle serie di dati acquisite con gli altri provini.

Tabella D.1: Cavitazione - $\beta = 0,47$

$\beta = 0,47$						
Prova	P_1 [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	P_{vap} [bar]	Acc [-]	σ_i [-]
1	1,141	1,014	12,10	0,0248	0,0054	2,10
1	1,138	0,970	11,89	0,0248	0,0051	2,19
1	1,138	0,912	11,61	0,0248	0,0048	2,33
2	1,145	0,866	11,38	0,0248	0,0045	2,47
2	1,146	0,815	11,06	0,0248	0,0045	2,62
2	1,144	0,759	10,70	0,0248	0,0045	2,81
3	1,146	0,686	10,22	0,0248	0,0045	3,12
3	1,146	0,601	9,56	0,0248	0,0045	3,55
3	1,141	0,472	8,45	0,0248	0,0045	4,52
4	1,132	0,342	7,19	0,0248	0,0045	6,21
4	1,142	0,203	5,50	0,0248	0,0045	10,50
4	1,148	0,078	3,38	0,0248	0,0045	27,50
5	1,138	0,932	11,72	0,0248	0,0049	2,29
5	1,138	0,966	11,86	0,0248	0,0050	2,20
5	1,139	1,011	12,10	0,0248	0,0054	2,11
6	1,139	1,061	12,34	0,0248	0,0061	2,01
6	1,138	1,101	12,54	0,0248	0,0070	1,93
6	1,137	1,146	12,75	0,0248	0,0084	1,86
7	1,140	1,136	12,72	0,0248	0,0084	1,88
7	1,138	1,145	12,75	0,0248	0,0089	1,86
7	1,139	1,198	13,03	0,0248	0,0127	1,78
8	1,139	1,233	13,24	0,0248	0,0145	1,73
8	1,139	1,268	13,39	0,0248	0,0150	1,68
8	1,140	1,296	13,56	0,0248	0,0146	1,64
9	1,140	1,314	13,65	0,0248	0,0138	1,62
9	1,138	1,325	13,78	0,0248	0,0136	1,61
9	1,135	1,347	13,86	0,0248	0,0129	1,58
10	1,132	1,380	14,07	0,0248	0,0117	1,54
10	1,130	1,401	14,18	0,0248	0,0113	1,51
10	1,127	1,420	14,26	0,0248	0,0110	1,49
11	1,124	1,456	14,45	0,0248	0,0117	1,45
11	1,122	1,490	14,57	0,0248	0,0133	1,42
11	1,117	1,525	14,78	0,0248	0,0133	1,38
12	1,148	1,943	14,95	0,0248	0,0149	1,10
12	1,148	1,996	14,99	0,0248	0,0144	1,07

Tabella D.2: Cavitazione - Dati filtrati - $\beta = 0,47$

$\beta = 0,47$						
Prova	P_1 [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	P_{vap} [bar]	Acc [-]	σ_i [-]
1	1,141	1,013	12,10	0,0248	0,0030	2,11
1	1,138	0,972	11,91	0,0248	0,0024	2,19
1	1,138	0,912	11,61	0,0248	0,0016	2,33
2	1,144	0,865	11,36	0,0248	0,0008	2,47
2	1,146	0,815	11,06	0,0248	0,0004	2,62
2	1,145	0,760	10,71	0,0248	0,0004	2,81
3	1,146	0,686	10,21	0,0248	0,0003	3,11
3	1,146	0,601	9,56	0,0248	0,0003	3,55
3	1,139	0,472	8,45	0,0248	0,0003	4,52
4	1,132	0,342	7,18	0,0248	0,0004	6,22
4	1,142	0,204	5,51	0,0248	0,0003	10,48
4	1,147	0,078	3,39	0,0248	0,0003	27,51
5	1,138	0,930	11,69	0,0248	0,0019	2,29
5	1,138	0,967	11,88	0,0248	0,0023	2,20
5	1,139	1,011	12,10	0,0248	0,0031	2,11
6	1,139	1,061	12,33	0,0248	0,0042	2,01
6	1,138	1,101	12,54	0,0248	0,0054	1,93
6	1,137	1,146	12,78	0,0248	0,0070	1,86
7	1,140	1,136	12,72	0,0248	0,0084	1,88
7	1,138	1,145	12,75	0,0248	0,0089	1,86
7	1,139	1,198	13,03	0,0248	0,0127	1,78
8	1,139	1,232	13,22	0,0248	0,0138	1,73
8	1,139	1,267	13,39	0,0248	0,0143	1,68
8	1,140	1,296	13,53	0,0248	0,0137	1,64
9	1,140	1,314	13,65	0,0248	0,0131	1,62
9	1,138	1,327	13,76	0,0248	0,0127	1,60
9	1,135	1,347	13,88	0,0248	0,0120	1,58
10	1,132	1,379	14,07	0,024	0,0109	1,54
10	1,130	1,400	14,17	0,0248	0,0103	1,51
10	1,128	1,419	14,27	0,0248	0,0098	1,49
11	1,124	1,456	14,45	0,0248	0,0108	1,45
11	1,122	1,498	14,57	0,0248	0,0133	1,41
11	1,118	1,527	14,78	0,0248	0,0123	1,38

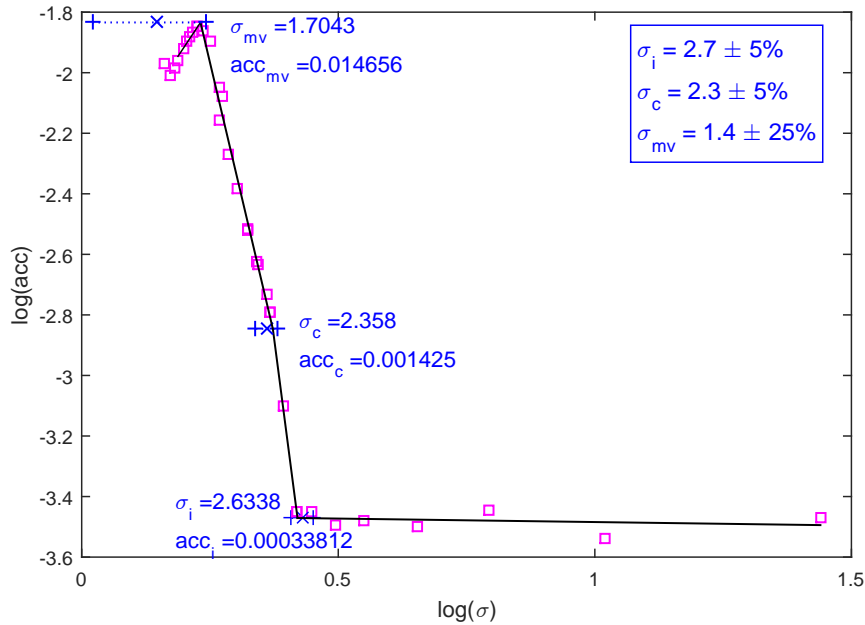


Figura D.2: Ricerca dei σ caratteristici della cavitazione - filtro passa-alto - $\beta = 0,47$

o $\beta = 0,30$

La tabella D.3 riporta i dati acquisiti durante l'installazione del piatto con foro di diametro pari a 25 mm, e filtrati.

La figura D.3 riporta, su un piano bilogarithmico, la relazione tra accelerazione e σ .

Anche in questo caso l'andamento è molto fedele a quello di figura 2.4, è stato possibile definire i valori da attribuire ai tre coefficienti σ_i , σ_c e σ_{mv} .

o $\beta = 0,18$

La tabella D.4 riporta i dati acquisiti durante l'installazione del piatto con foro di diametro pari a 15 mm, e filtrati.

La figura D.4 riporta, su un piano bilogarithmico, la relazione tra accelerazione e σ .

Durante le prove eseguite con i piatti forati $\beta = 0,18$ e $\beta = 0,06$ si è riscontrata una maggiore dispersione dei punti sul grafico, che ha ovviamente portata ad una scarsa precisione delle rette interpolatrici, e quindi dei valori dei coefficienti ricavati.

Per questa prova in particolare, sono stati determinati solo σ_i e σ_c , in quanto non state raggiunte portate di flusso tali da poter individuare anche σ_{mv} .

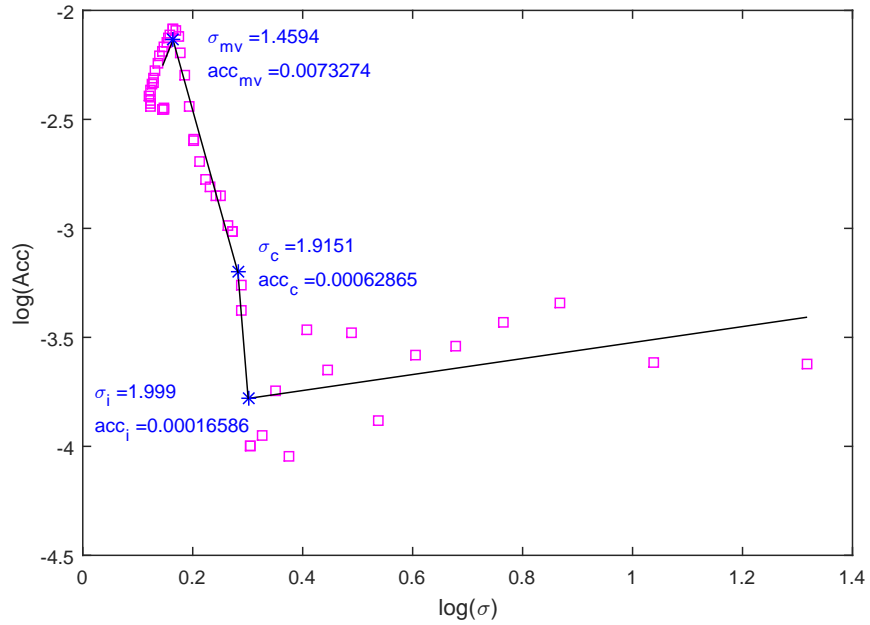


Figura D.3: Ricerca dei σ caratteristici della cavitazione - $\beta = 0,30$

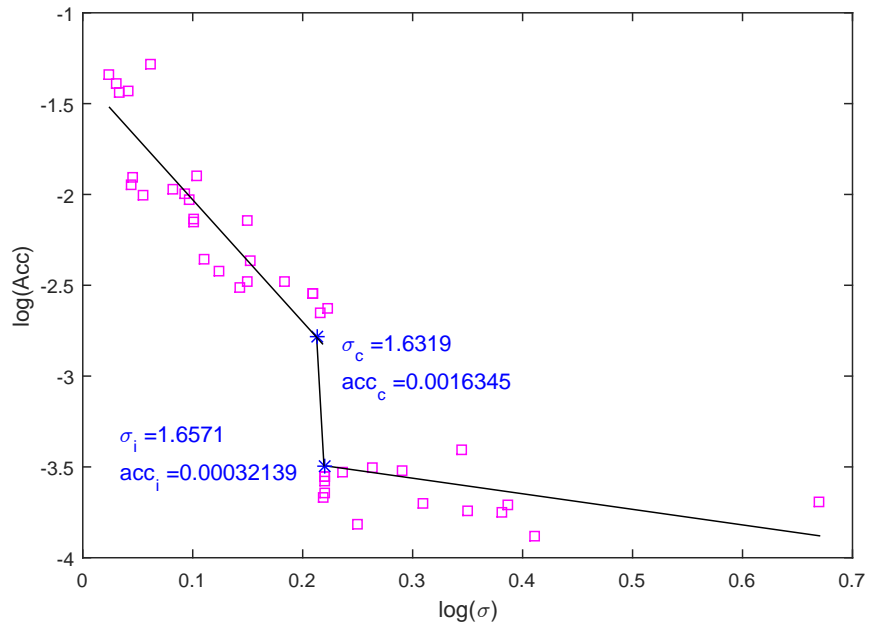


Figura D.4: Ricerca dei σ caratteristici della cavitazione - $\beta = 0,18$

Tabella D.3: Cavitazione - $\beta = 0,30$

$\beta = 0,30$						
Prova	P_1 [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	P_{vap} [bar]	Acc [-]	σ_i [-]
1	1,247	0,108	1,40	0,0261	0,0002	20,71
1	1,243	0,205	1,97	0,0261	0,0002	10,90
1	1,244	0,304	2,43	0,0261	0,0005	7,36
2	1,245	0,385	2,75	0,0261	0,0004	5,81
2	1,243	0,468	3,04	0,0261	0,0003	4,78
2	1,243	0,554	3,30	0,0261	0,0003	4,04
3	1,245	0,648	3,57	0,0261	0,0001	3,45
3	1,246	0,725	3,78	0,0261	0,0003	3,09
3	1,247	0,804	3,99	0,0261	0,0002	2,79
4	1,247	0,876	4,18	0,026	0,0003	2,56
4	1,245	0,943	4,33	0,0261	0,0001	2,38
4	1,246	0,998	4,46	0,0261	0,0002	2,24
5	1,246	1,056	4,59	0,0261	0,0001	2,12
5	1,245	1,108	4,71	0,0261	0,0001	2,02
5	1,245	1,152	4,80	0,0261	0,0004	1,94
6	1,245	1,153	4,80	0,0261	0,0005	1,94
6	1,244	1,192	4,89	0,0261	0,0010	1,88
6	1,244	1,217	4,94	0,0261	0,0010	1,84
7	1,245	1,255	5,02	0,0261	0,0014	1,78
7	1,246	1,286	5,09	0,0261	0,0014	1,74
7	1,246	1,313	5,13	0,0261	0,0016	1,71
8	1,246	1,340	5,20	0,0261	0,0017	1,67
8	1,245	1,371	5,26	0,0261	0,0020	1,63
8	1,246	1,406	5,33	0,0261	0,0025	1,59
9	1,245	1,405	5,33	0,0261	0,0026	1,59
9	1,245	1,434	5,38	0,0261	0,0036	1,56
9	1,245	1,457	5,42	0,0261	0,0051	1,54
10	1,245	1,485	5,48	0,0261	0,0063	1,51
10	1,245	1,502	5,52	0,0261	0,0076	1,49
10	1,245	1,520	5,55	0,0261	0,0081	1,47
11	1,245	1,538	5,58	0,0261	0,0082	1,46
11	1,245	1,554	5,62	0,0261	0,0078	1,44
11	1,245	1,565	5,63	0,0261	0,0075	1,43
12	1,245	1,579	5,66	0,0261	0,0071	1,42
12	1,245	1,591	5,69	0,0261	0,0068	1,41
12	1,245	1,604	5,71	0,0261	0,0065	1,40
13	1,244	1,624	5,76	0,0261	0,0061	1,38
13	1,244	1,636	5,77	0,0261	0,0057	1,37
13	1,244	1,649	5,80	0,0261	0,0053	1,36
13	1,244	1,662	5,82	0,0261	0,0049	1,35
13	1,244	1,668	5,83	0,0261	0,0046	1,34
14	1,244	1,675	5,85	0,0261	0,0046	1,34
14	1,244	1,683	5,86	0,0261	0,0043	1,33
14	1,244	1,692	5,89	0,0261	0,0041	1,32
14	1,244	1,689	5,89	0,0261	0,0038	1,33
14	1,244	1,680	5,91	0,0261	0,0038	1,33
14	1,244	1,682	5,92	0,0261	0,0036	1,33
15	1,245	1,596	5,93	0,0261	0,0035	1,40
15	1,245	1,595	5,95	0,0261	0,0036	1,40
15	1,245	1,600	5,95	0,0261	0,0035	1,40
15	1,245	1,600	5,95	0,0261	0,0034	1,40
15	1,245	1,603	5,96	0,0261	0,0034	1,40

Tabella D.4: Cavitazione - $\beta = 0,18$

$\beta = 0,18$						
Prova	P_1 [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{l}{s}$]	P_{vap} [bar]	Acc [-]	σ_i [-]
1	4,091	4,210	—	0,0264	0,0107	1,21
2	4,070	3,993	—	0,0264	0,0126	1,27
3	4,095	3,661	—	0,0264	0,0031	1,39
4	4,073	3,317	—	0,0264	0,0033	1,53
5	4,069	3,035	—	0,0264	0,0024	1,67
6	4,071	2,943	—	0,0264	0,0003	1,72
7	4,067	2,849	—	0,0264	0,0002	1,78
8	4,068	2,760	—	0,0264	0,0003	1,83
9	4,071	2,595	—	0,0264	0,0003	1,95
10	4,073	2,486	—	0,0264	0,0002	2,04
11	4,068	2,287	—	0,0264	0,0004	2,21
12	4,065	2,104	—	0,0264	0,0002	2,40
13	4,086	1,972	2,20	0,0264	0,0001	2,58
14	4,067	1,082	1,62	0,0264	0,0002	4,68
15	4,041	2,067	2,24	0,0264	0,0002	2,44
16	4,059	2,255	2,35	0,0264	0,0002	2,24
17	4,073	3,129	2,77	0,0264	0,0028	1,62
18	4,071	3,079	2,76	0,0264	0,0022	1,64
19	4,064	3,043	2,72	0,0264	0,0003	1,66
20	4,054	3,046	2,72	0,0264	0,0003	1,66
21	4,057	3,057	2,72	0,0264	0,0002	1,65
22	4,071	3,587	2,97	0,0264	0,0033	1,41
23	4,064	3,578	2,96	0,0264	0,0072	1,41
24	4,062	3,804	3,05	0,0264	0,0038	1,33
25	4,054	3,917	3,08	0,0264	0,0044	1,29
26	4,071	4,013	3,12	0,0264	0,0073	1,26
27	4,064	4,006	3,12	0,0264	0,0071	1,26
28	4,030	4,023	3,13	0,0264	0,0093	1,25
29	4,055	4,444	3,30	0,0264	0,0100	1,14
30	4,064	4,549	3,33	0,0264	0,0125	1,11
31	4,058	4,559	3,34	0,0264	0,0113	1,11
32	8,109	8,607	4,59	0,0264	0,0453	1,06
33	8,118	8,498	4,56	0,0264	0,0408	1,07
34	8,103	8,421	4,52	0,0264	0,0367	1,08
35	8,106	8,265	4,48	0,0264	0,0370	1,10
36	8,091	7,892	4,41	0,0264	0,0525	1,15
37	8,108	7,345	4,23	0,0264	0,0100	1,24
38	8,091	6,388	3,93	0,0264	0,0043	1,42
39	8,106	5,485	3,65	0,0264	0,0002	1,66

Tabella D.5: Cavitazione - $\beta = 0,06$

$\beta = 0,06$						
Prova	P_1 [bar]	ΔP [bar]	Q [$\frac{L}{s}$]	P_{vap} [bar]	Acc [-]	σ_i [-]
1	8,546	8,686	0,50	0,0262	0,0007	1,10
2	8,537	8,618	0,50	0,0262	0,0017	1,11
3	8,531	8,544	0,50	0,0262	0,0017	1,11
4	8,547	8,432	0,49	0,0262	0,0019	1,13
5	8,541	8,246	0,51	0,0262	0,0028	1,16
6	8,544	7,849	0,51	0,0262	0,0080	1,22
7	8,541	6,710	0,48	0,0262	0,0036	1,42
8	8,536	5,724	0,40	0,0262	0,0014	1,67
9	8,555	5,831	0,44	0,0262	0,0015	1,64
10	8,539	6,532	0,46	0,0262	0,0022	1,46
11	8,546	6,500	0,46	0,0262	0,0027	1,47
12	8,536	4,199	0,36	0,0262	0,0013	2,27
13	8,542	2,482	0,27	0,0262	0,0006	3,84

o $\beta = 0,06$

La tabella D.5 riporta i dati acquisiti durante l'installazione del piatto con foro di diametro pari a 15 mm, e filtrati.

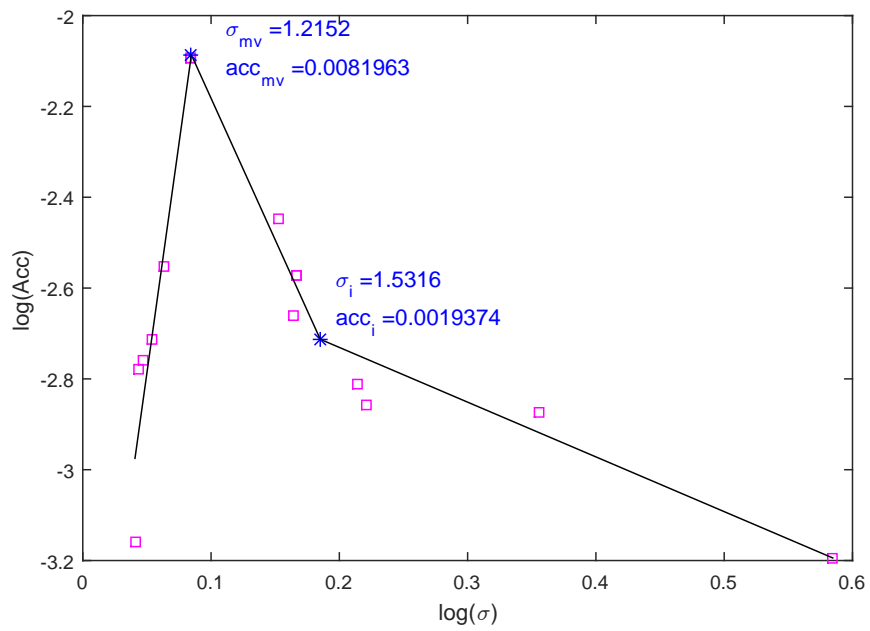
La figura D.5 riporta, su un piano bilogarithmico, la relazione tra accelerazione e σ .

In questo caso si riesce ad individuare il valore massimo di accelerazione, e quindi anche σ_{mv} , ma non è possibile individuare il cambio di pendenza che porta alla determinazione di σ_c .

La tabella D.6 riporta i coefficienti σ ricavati con queste prove.

Tabella D.6: Cavitazione: risultati ottenuti

β	σ_i	σ_c	σ_{mv}
0,47	2,63	2,36	1,70
0,30	2,0	1,92	1,46
0,18	1,66	1,63	-
0,06	1,53	-	1,21

Figura D.5: Ricerca dei σ caratteristici della cavitazione - $\beta = 0,06$

Bibliografia

- [1] *AIR LIQUIDE - Gas Encyclopedia. Nitrogen.*
- [2] J. Blotter D. Maynes G.J. Holt. «Cavitation Inception and Head Loss due to Liquid Flow Through Perforated Plates of Varying Thickness». In: (2012).
- [3] *EJX130A Differential Pressure Transmitter. General Specifications.* 2005.
- [4] *EJX510A and EJX530A Absolute and Gauge Pressure Transmitter. General Specifications.* 2004.
- [5] *IEC 50534-2-1. Flow Capacity - Sizing equations for fluid flow under installed conditions.* 2011.
- [6] *ISA-75.02. Control Valve Capacity Test Procedures.* 1996.
- [7] *ISA-RP75.23. Considerations for Evaluating Control Valve Cavitation.* 1995.
- [8] Ryusuke Ono Jun Ishimoto. «Numerical Study of the two-phase flow characteristics of slush nitrogen». In: (2004).
- [9] Norifumi Takahashi Katsuhide Ohira Kei Nakagomi. «Pressure-drop reduction and heat-transfer deterioration of slush nitrogen in horizontal pipe flow». In: (2011).
- [10] *LabView. Guida all'uso di LabView.* 2003.
- [11] Messa Gianandrea Malavasi Stefano. «Dissipation and Cavitation. Characteristics of Single-Hole Orifices». In: (2011).
- [12] Sukanta K. Dash Manmatha K. Roul. «Single-Phase and Two-Phase Flow Through Thin and Thick Orifices in Horizontal Pipes». In: (2012).
- [13] *NI 9203. Operating Instructions and Specifications.* 2008.
- [14] *NI cDAQ-917x. User Manual - NI CompactDAQ cDAQ-9171/9174/9178 USB Chassis.* 2013.
- [15] «Numerical study of flow and heat-transfer characteristics of cryogenic slush fluid in a horizontal circular pipe». In: (2011).

- [16] «Numerical study of flow and heat-transfer characteristics of cryogenic slush fluid in a horizontal circular pipe». In: (2012).
- [17] «On cavitation occurrence in perforated plates». In: (2014).
- [18] «On the pressure losses through perforated plates». In: (2012).
- [19] *Proline Prowirl 72F, 72W, 73F, 73W Misuratore di portata a vortice. Informazioni tecniche.* 2007.
- [20] PARCOL S.p.A. *Dimensionamento delle valvole di regolazione.*
- [21] *YTA110 Temperature Transmitter. General Specifications.* 1998.