



Università della
Calabria



Politecnico di Bari



Università degli Studi
della Basilicata



UNIVERSITÀ DEL SALENTO

Università del
Salento

*Dottorato di Ricerca in Ingegneria Idraulica per l'Ambiente e il
Territorio – Ciclo XVII bis*

Settore scientifico-disciplinare ICAR/02

Dissertazione per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca

*RIOSSIGENAZIONE NATURALE DEI CORSI
D'ACQUA*

Giuseppe Maradei

Coordinatore
Prof. Ing. Paolo Veltri

Tutor
Prof. Ing. Paolo Veltri

Cosenza, Novembre 2007

....
La prima regola era di non accettare mai nulla per vero, senza conoscerlo evidentemente come tale: cioè di evitare scrupolosamente la precipitazione e la prevenzione; e di non comprendere nei miei giudizi niente più di quanto si fosse presentato alla mia ragione tanto chiaramente e distintamente da non lasciarmi nessuna occasione di dubitarne.

La seconda, di dividere ogni problema preso in esame in tante parti quanto fosse possibile e richiesto per risolverlo più agevolmente.

La terza, di condurre ordinatamente i miei pensieri cominciando dalle cose più semplici e più facili a conoscersi, per salire a poco a poco, come per gradi, sino alla conoscenza delle più complesse; supponendo altresì un ordine tra quelle che non si precedono naturalmente l'un l'altra.

E l'ultima, di fare in tutti i casi enumerazioni tanto perfette e rassegne tanto complete, da essere sicuro di non omettere nulla.

....

*Renè Descartes (1596-1650)
Discorso sul metodo
Parte seconda*

INDICE

PREMESSA..... 1

1. LA QUALITÀ DELLE ACQUE NEI RICETTORI NATURALI: INTRODUZIONE AL PROBLEMA E CENNI NORMATIVI... 6

INTRODUZIONE..... 6

1.1. L'INQUINAMENTO DELLE ACQUE: GENESI E TIPOLOGIE 7

1.2. LA MODELLAZIONE DEI BILANCI DI MASSA NEI CORPI IDRICI
..... 10

1.2.1. Sistemi a miscelazione completa..... 11

1.2.2. Sistemi a miscelazione incompleta..... 17

1.3. CENNI DI NORMATIVA EUROPEA, NAZIONALE E REGIONALE .
..... 22

1.3.1. Le recenti direttive europee22

1.3.2. Il contesto normativo in Italia.....28

1.3.3. Recepimento della normativa nazionale dalla Regione Calabria: la legge
regionale 10/9736

2. IL PROCESSO DI RIOSSIGENAZIONE NELLE CORRENTI LIQUIDE: STATO DELL'ARTE DEGLI STUDI..... 37

INTRODUZIONE..... 37

2.1. TEORIA DELLA TURBOLENZA: CENNI..... 38

2.1.1. Le scale del moto turbolento e i trasferimenti di energia43

2.2. IL TRASFERIMENTO DI OSSIGENO DALL'ARIA ALL'ACQUA . 46

2.2.1. Le grandezze fisiche del fenomeno52

2.3. L'EQUAZIONE DI STREETER&PHELPS 53

2.4. LE INDAGINI SPERIMENTALI 55

2.4.1. Le applicazioni in laboratorio della tecnica dell'equilibrio disturbato.... 57

2.4.2. I dati dell'U.S.G.S.60

2.4.3.	Le esperienze di di Moog&Jirka	61
2.4.4.	Le esperienze di Balmè&Tagizadeh Nassèr	63
2.5.	IL COEFFICIENTE DI RIOSSIGENAZIONE: METODI DI STIMA .	65
2.5.1.	Lo schema di Horng-Guang Leu.	70
2.5.2.	Lo schema di Gualtieri&Gualtieri	71
2.5.3.	L'analisi di Melching&Flores	74
2.5.4.	Lo schema di Balmè&Tagizadeh Nassèr	76
2.5.5.	Re-interpretazione dei dati di letteratura tramite l'analisi dimensionale.	77
2.5.6.	Rielaborazione dei dati di laboratorio di letteratura	79
2.5.7.	Rielaborazione dei dati dell'U.S.G.S.	82
2.5.8.	Rassegna delle formule di letteratura	84
2.5.9.	Le formule di letteratura di maggiore uso	86

3. L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE DI LABORATORIO

CONDOTTA ALL'UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA..... 88

INTRODUZIONE..... 88

3.1. DESCRIZIONE DEL PRIMO APPARATO SPERIMENTALE 89

3.2. PROGETTO E REALIZZAZIONE DEL NUOVO APPARATO SPERIMENTALE..... 92

3.2.1. Progettazione della nuova canaletta 92

3.2.2. Realizzazione e montaggio della nuova canaletta 95

3.3. ANALISI IDRAULICA DELLE ESPERIENZE DI LABORATORIO 106

4. ANALISI E INTERPRETAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI 123

INTRODUZIONE..... 123

4.1. ELABORAZIONE DEI DATI DELL'ULTIMA CAMPAGNA SPERIMENTALE..... 126

4.1.1. Prove di riossigenazione..... 127

4.1.2. Prove bianche 130

4.1.3.	Elaborazione delle prove bianche.....	130
4.1.4.	Il lavoro degli attriti.....	139
4.1.5.	Elaborazione dei dati di riossigenazione	143
4.1.6.	Analisi dei dati per sezione semicircolare e scabrezza con $d_{50}=0.25$ mm	146
4.1.7.	Analisi dei dati per sezione semicircolare e scabrezza con $d_{50}=3.0$ mm	148
4.1.8.	Elaborazione dei dati per sezione rettangolare e scabrezza con $d_{50}=0.25$ mm.....	150
4.1.9.	Analisi dei dati per sezione rettangolare e scabrezza con $d_{50}=3.0$ mm .	152
4.2.	INTERPRETAZIONE DEI DATI DI SPERIMENTALI.....	154
4.2.1.	L'analisi dimensionale.....	154
4.2.2.	Struttura del legame funzionale.....	156
4.2.3.	Applicazione del modello interpretativo ai dati di letteratura.....	158
	CONCLUSIONI.....	161
	BIBLIOGRAFIA.....	164
	ALLEGATO 1: TABELLA RIASSUNTIVA DELLE FORMULE DI RIOSSIGENAZIONE ANALIZZATE	i
	ALLEGATO 2: ANALISI GRANULOMETRICHE DEI CAMPIONI DI SABBIA COSTITUENTI IL CONTORNO BAGNATO DELLE SEZIONI DI DEFLUSSO UTILIZZATE NELLE SPERIMENTAZIONI CONDOTTE PRESSO L'UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA.....	xiii
	ALLEGATO 3: DISTINTA DELLE GRANDEZZE GEOMETRICHE E IDRAULICHE DELLE PROVE SPERIMENTALI CONDOTTE PRESSO L'UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA	xv

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Sistema completamente miscelato, CSTR (Chapra 1997, modificato)	11
Figura 2: Sistema di reattori CSTRs di tipo Feedforward (Chapra, 1997)	14
Figura 3: Sistema di due reattori in serie con funzionamento Feedforward (Chapra, 1997)	15
Figura 4: Sistema di reattori CSTRs di tipo Feedback (Chapra,1997)	15
Figura 5: Sistema di due reattori feedback (Chapra,1997)	16
Figura 6: Trasporto advettivo (a) e diffusivo (b) di un inquinante (Chapra, 1997)	17
Figura 7: Reattore di tipo Plug Flow Reactor (PFR) (Chapra, 1997)	18
Figura 8: Fenomeni di trasporto in un PFR (Chapra, 1997)	19
Figura 9: Fenomeni di trasporto in un MFR (Chapra, 1997).....	20
Figura 10: Evoluzione della turbolenza per fluido perfetto (Ghetti, 1980)	40
Figura 11: Andamento reale della velocità delle particelle lungo una direzione	41
Figura 12: Fluttuazioni di velocità sulla verticale	41
Figura 13: Schematizzazione del doppio film	48
Figura 14: Andamento delle concentrazioni di ossigeno nella zona d'interfaccia	50
Figura 15: Schema del corpo idrico	51
Figura 16: Schematizzazione di un corso d'acqua	54
Figura 17: Andamento "a sacco" di una prova di riossigenazione in laboratorio.....	58
Figura 18: Regressione lineare dei dati di riossigenazione	59
Figura 19: Apparato sperimentale di Moog&Jirka	62
Figura 20: Apparato sperimentale di Balmèr & Tagizadeh Nassèr	63
Figura 21: Schema concettuale della riossigenazione (<i>Hornng-Guang Leu et al., 1997</i>)	71
Figura 22: Schema di Gualtieri&Gualtieri (2004)	72
Figura 23: Regressioni per condizione "pool and riffle" (Melching&Flores, 1999)	75
Figura 24: Regressione per "channel control" (Melching&Flores, 1999)	75
Figura 25: Regressione dati fra K_L e il prodotto $E^{0.375} h_S^{0.4}$	76
Figura 26: Regressione dati fra K_L e il prodotto $E^{0.375} (h_S/D)^{0.4}$	77
Figura 27: Grafico della correlazione fra KR^* e BR – Balmèr&Tagizadeh Nassèr	79
Figura 28: Grafico della correlazione fra KR^* e BR – Moog&Jirka	80
Figura 29: Grafico di correlazione K_r misurato - K_r calcolato per i dati di Balmèr e Tagizadeh Nasser	81
Figura 30: Grafico di correlazione K_r misurato - K_r calcolato per i dati di Moog&Jirka	81
Figura 31: Grafico della correlazione fra KR^* e BR , pendenze superiori allo 0,1% - Dati U.S.G.S.....	83
Figura 32: Grafico della correlazione fra KR^* e BR , pendenze superiori allo 0,5% - Dati U.S.G.S.....	83
Figura 33: Grafico della correlazione fra KR^* e BR , pendenze superiori all'1,0% - Dati U.S.G.S.	84
Figura 34: Campo di validità delle formule di riossigenazione (Chapra, 1997).....	87
Figura 35: Strumentazione del primo apparato sperimentale	91
Figura 36: Vasca di valle e di monte.....	93
Figura 37: Particolare dello sbocco vasca di valle	93
Figura 38: Modello 3D del canale con sezione semicircolare	94
Figura 39: Modello 3D del canale con sezione rettangolare	94
Figura 40: Operazioni di montaggio	95
Figura 41: Particolari della cerniera	96
Figura 42: Particolare vasca di accumulo di valle.....	97
Figura 43: Particolare dello scarico e della "T".....	97

Figura 44: Particolare della pompa sommersa e della saracinesca.....	98
Figura 45: Misuratore di portata elettromagnetico.....	98
Figura 46: Particolare del giunto al cassone di monte.....	99
Figura 47: Particolare giunto di immissione nella vasca di valle.....	100
Figura 48: Particolare giunto tubazione di deflusso, dei puntoni in legno e della sabbia.....	100
Figura 49: Particolare dell'imbocco dalla vasca di monte.....	101
Figura 50: Griglie di dissipazione nella vasca di monte e di valle.....	101
Figura 51: Autoclave esterno e impianto idraulico interno al capannone.....	101
Figura 52: Particolari dei tubi insistenti sui cassoni.....	102
Figura 53: Pannelli di PVC per la sezione rettangolare.....	103
Figura 54: Angolari e piedritti di appoggio alla sezione rettangolare.....	103
Figura 55: Sezione rettangolare di deflusso.....	104
Figura 56: Fissaggio in testa delle sponde.....	104
Figura 57: Particolare dei puntoni.....	105
Figura 58: Particolare dell'imbocco.....	105
Figura 59: sviluppo longitudinale del canale.....	107
Figura 60: Andamento della viscosità cinematica in funzione della temperatura.....	109
Figura 61: Posizione punti sperimentali sull'abaco di Yen.....	118
Figura 62: Determinazione di K_s con tutte le prove.....	122
Figura 63: Determinazione di K_s senza le prove a pendenza $i=0.5\%$	122
Figura 64: Scabrezza del fondo - sezione circolare - 0.25 e 3.0 mm.....	127
Figura 65: Grafico di "Tipo 1" – prova bianca.....	131
Figura 66: Grafico di "Tipo 2" – prova bianca.....	131
Figura 67: Suddivisione della prova “bianca”.....	132
Figura 68: Andamento di OD in funzione di T - prove bianche - sezione circolare.....	133
Figura 69: Andamento di OD in funzione di T- rielaborazione prove bianche - sezione circolare.....	133
Figura 70: Andamento OD misurato - OD calcolato - prove bianche - sezione circolare.....	134
Figura 71: Andamento dell'OD in funzione di T - prove bianche - sezione rettangolare.....	135
Figura 72: Andamento dell'OD in funzione di T- rielaborazione prove bianche - sezione rettangolare.....	135
Figura 73: Andamento OD mis - OD calc - prove bianche - sezione rettangolare.....	136
Figura 74: Allineamento dei punti delle prove bianche per le due sezioni.....	137
Figura 75: Regressione completa dei dati delle prove bianche.....	137
Figura 76: Confronto OD misurato-OD calcolato - prove bianche.....	138
Figura 77: Confronto OD calcolato a saturazione e in condizioni dinamiche in funzione di T.....	138
Figura 78: Grafico della prova di riossigenazione.....	144
Figura 79: Schema concettuale dell'impianto di prova.....	144
Figura 80: Variazione di K_r in funzione di portata e pendenza – sez circolare – $d_{50}=0.25$	148
Figura 81: Variazione di K_r in funzione di portata e pendenza – sez circolare – $d_{50}=3.0$ mm.....	150
Figura 82: Variazione di K_r in funzione di portata e pendenza – sez rettangolare – $d_{50}=0.25$	152
Figura 83: Variazione di K_r in funzione di portata e pendenza – sez rettangolare – $d_{50}=3.0$ mm.....	154
Figura 84: Confronto tra KR misurato e KR calcolato.....	158
Figura 85: Confronto tra K_r misurato e K_r calcolato.....	158
Figura 86: Confronto tra KR misurato e KR calcolato per tutti i dati sperimentali disponibili.....	160
Figura 87: Confronto tra KR misurato, KRcal(1) e KRcal(2).....	160
Figura 88: Curva granulometrica - sedimenti - $d_{50}=0.25$ mm.....	xiii
Figura 89: Curva granulometrica - sedimenti - $d_{50}=3.0$ mm.....	xiv

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Produzione e rimozione di ossigeno.....	47
Tabella 2: Dati sperimentali di Moog e Jirka.....	62
Tabella 3: Dati di Balmè&Tagizadeh Nassèr (1995).....	65
Tabella 4: Dati idraulici $d_{50}=0.25$ mm – sezione circolare.....	112
Tabella 5: Dati idraulici – $d_{50}=3.0$ mm – sezione circolare.....	113
Tabella 6: Dati idraulici $d_{50}=0.25$ mm – sezione rettangolare.....	114
Tabella 7: Dati idraulici $d_{50}=3.0$ mm – sezione rettangolare.....	115
Tabella 8: Coefficienti della formula di Yen (Yen, 2002).....	116
Tabella 9: Parametri caratteristici del moto – $d_{50}=0.25$ mm – sezione circolare.....	118
Tabella 10: Parametri caratteristici del moto – $d_{50}=3.0$ mm – sezione circolare.....	119
Tabella 11: Parametri caratteristici del moto - $d_{50}=0.25$ mm - sezione rettangolare.....	120
Tabella 12: Parametri caratteristici del moto - $d_{50}=3.0$ mm - sezione rettangolare.....	120
Tabella 13: Valutazione della scabrezza media.....	121
Tabella 14: Calcolo dei lavori d'attrito per sezione circolare con scabrezza $d_{50}=0.25$ mm.....	142
Tabella 15: Dati generali di prova.....	143
Tabella 16: Equazione della prova bianca.....	143
Tabella 17: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=0.5\%$	146
Tabella 18: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=1.0\%$	146
Tabella 19: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=1.5\%$	146
Tabella 20: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=2.0\%$	147
Tabella 21: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=2.5\%$	147
Tabella 22: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=3.0\%$	147
Tabella 23: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=0.5\%$	148
Tabella 24: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=1.0\%$	148
Tabella 25: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=1.5\%$	149
Tabella 26: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=2.0\%$	149
Tabella 27: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=2.5\%$	149
Tabella 28: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=3.0\%$	149
Tabella 29: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=0.5\%$	150
Tabella 30: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=1.0\%$	151
Tabella 31: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=1.5\%$	151
Tabella 32: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=2.0\%$	151
Tabella 33: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=2.5\%$	151
Tabella 34: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=3.0\%$	151
Tabella 35: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=0.5\%$	152
Tabella 36: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=1.0\%$	153
Tabella 37: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=1.5\%$	153
Tabella 38: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=2.0\%$	153
Tabella 39: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=2.5\%$	153
Tabella 40: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=3.0\%$	153
Tabella 41: Range dei parametri adimensionali.....	156
Tabella 42: Range dei parametri utilizzati da Moog e Jirka (1999).....	159
Tabella 43: Range dei parametri utilizzati da Balmè e Tagizadeh Nassèr (1995).....	159

Tabella 44: Range dei parametri adimensionali per tutti i dati sperimentali analizzati	159
Tabella 45: Percentuali di passate - sedimenti - $d_{50}=0.25\text{mm}$	xiii
Tabella 46: Percentuali di passate - sedimenti - $d_{50}=3.0\text{ mm}$	xiv

INDICE DEI PRINCIPALI SIMBOLI

- A [L^2]: area della sezione liquida;
- B [L]: larghezza della superficie libera ovvero dell'interfaccia aria-acqua;
- BOD_5 [ML^{-3}]: richiesta biochimica di ossigeno a cinque giorni;
- BR [-]: Rapporto fra larghezza della superficie libera e tirante idrico;
- c [ML^{-3}]: concentrazione in acqua del generico contaminante;
- c_{SAT} [ML^{-3}]: concentrazione a saturazione in acqua del generico contaminante
- C, OD [ML^{-3}]: concentrazione di ossigeno disciolto in acqua;
- COD [ML^{-3}]: richiesta chimica di ossigeno;
- C_{SAT}, OD_{SAT} [ML^{-3}]: concentrazione a saturazione di ossigeno disciolto in acqua;
- D [L]: diametro della condotta;
- DO [ML^{-3}]: deficit di ossigeno disciolto in acqua;
- D_m : [L^2T^{-1}]: diffusività molecolare dell'ossigeno in acqua;
- δ [L]: spessore del sottostrato limite viscoso;
- δ_g [L]: spessore della regione a moto laminare nel volume gassoso;
- δ_l [L]: spessore della regione a moto laminare nel volume liquido;
- δ_s [L]: spessore dello strato laminare che controlla la diffusione dell'ossigeno in acqua (schema di Gualtieri);
- ε [L]: scabrezza equivalente in sabbia del contorno bagnato;
- ε_K [L^2/T^3]: tasso di dissipazione di energia cinetica turbolenta;
- Fr [-]: numero di Froude;
- g [LT^{-2}]: accelerazione di gravità;
- γ [$ML^{-2}T^{-2}$]: peso specifico dell'acqua;
- h [L]: tirante idrico;
- h/D [-]: grado di riempimento;
- h_s [L]: altezza significativa media della corrente;
- i [-]: pendenza del fondo canale;
- J [$ML^{-2}T^{-1}$]: flusso di ossigeno attraverso l'interfaccia aria-acqua;
- J_E [-]: pendenza della cadente piezometrica
- k [-]: costante universale di von Kàrmàn;
- K_d [T^{-1}]: coefficiente di deossigenazione;
- k_f [L^2T^{-1}]: coefficiente di Fick;
- k_g [MT^{-1}]: velocità di trasferimento di ossigeno relativo alla fase gassosa;
- k_l [MT^{-1}]: velocità di trasferimento di ossigeno in ambiente liquido nel flusso laminare;
- K_S [$L^{1/3}T^{-1}$]: coefficiente di Gauckler-Strickler;
- K_L [MT^{-1}]: coefficiente di trasferimento di ossigeno dall'aria all'acqua;
- K_L^+ [-]: coefficiente di riossigenazione adimensionale;
- K_r [T^{-1}]: coefficiente di riossigenazione;
- λ [-]: indice di resistenza;
- M [M]: massa di reagente;

μ [ML⁻¹T⁻¹]: viscosità dinamica dell'acqua;
 ν [L²T⁻¹]: viscosità cinematica dell'acqua;
 Pe [-]: numero di Peclet;
 Q [L³T⁻¹]: portata liquida fluente;
 Q_C [ML²T⁻²]: energia termica della massa liquida;
 ρ [ML⁻³]: densità dell'acqua;
 R [-]: costante universale dei gas;
 Re [-]: numero di Reynolds;
 Re^* [-]: numero di Reynolds d'attrito;
 R_H [L]: raggio idraulico;
 R_{Hf} [L]: raggio idraulico modificato con il coefficiente di forma di Marchi;
 S [-]: rapporto fra scabrezza equivalente in sabbia e tirante idrico;
 Sc [-]: numero di Schmidt;
 σ [MT⁻²]: tensione tangenziale sulla superficie libera;
 T [t]: temperatura dell'acqua;
 Ta [t]: temperatura assoluta;
 t_c : [t]: tempo di contatto;
 τ [ML⁻¹T⁻²]: tensione tangenziale al fondo canale;
 U [LT⁻¹]: velocità media della corrente lungo la direzione del moto;
 u [LT⁻¹]: velocità della corrente lungo la direzione del moto;
 u^* [LT⁻¹]: velocità d'attrito;
 U_C [LT⁻¹]: velocità critica della corrente lungo la direzione del moto;
 V [L³]: volume di acqua coinvolto nelle reazioni;
 W [-]: numero di Weber.

PREMESSA

Da quando la civiltà umana ha iniziato a organizzarsi in agglomerati urbani, è sorta l'esigenza di assicurare alla popolazione in maniera preordinata una quantità necessaria di cibo e di acqua, per permettere le normali attività.

Fin quando la pressione antropica è stata di modesta entità, la natura da sola riusciva a smaltire senza particolari problemi i reflui derivati dalle attività umane, eccetto i casi eccezionali, dai quali nascevano e imperversavano le epidemie.

Riferendosi ai soli reflui liquidi, era sufficiente riuscire ad allontanarli dall'agglomerato principale e sversarli nel lago, nel fiume più vicino o direttamente nel mare, per scongiurare il pericolo delle malattie.

Le modeste quantità di reflui, peraltro a elevata concentrazione organica a causa delle basse dotazioni idriche, non creavano scompensi eccessivi anche se non depurate e la sola diluizione del recettore era sufficiente per assicurarne lo smaltimento.

Lo sviluppo dei centri urbani e il miglioramento delle condizioni di vita hanno determinato anche maggiori aspettative sulla qualità stessa della vita, che, unite a una crescente sensibilità per le problematiche ambientali, hanno portato alla ribalta delle civiltà economicamente sviluppate il problema della abnorme produzione di rifiuti, sia solidi sia liquidi e la corrispondente necessità di un'efficace ed efficiente politica di trattamento e smaltimento.

Numerosi sono stati i disastri ambientali, più o meno annunciati, che hanno indotto gli enti decisionali, sotto la pressione sempre crescente dell'opinione pubblica, ad accogliere i continui appelli di tanti ricercatori che presentavano il problema e cercavano di dare soluzioni scientificamente basate. Da questo punto in poi è nata e si è sempre più diffusa la ricerca in campo ambientale, novità rispetto a tutta la ricerca precedente, sia riguardo all'oggetto della ricerca medesima, sia riguardo all'approccio che non era più strettamente limitato a una materia, ma contemplava conoscenze di carattere multidisciplinare.

La ricerca di carattere ambientale, infatti, non può prescindere dalla conoscenza delle materie base quali la chimica, la biologia, la termodinamica, l'idrologia e l'idraulica e molto spesso singole persone o un gruppo di persone specializzate in una sola di queste discipline non riescono a restituire risultati appropriati.

Il lavoro, quindi, prevede l'individuazione di obiettivi specifici e la scelta delle figure che possono assolvere a questo compito, fermo restando il continuo contatto con altre figure.

Il continuo progresso della ricerca ha permesso di perfezionare la normativa consentendo al legislatore di usufruire di maggiori e più approfondite conoscenze per permettere di scegliere al meglio.

Questo lavoro di tesi di dottorato si inserisce nell'ambito di un filone di ricerca nato sulla scia dell'emanazione del D. L.vo 152/99 che, in Italia, ha rivoluzionato l'approccio della precedente normativa riguardo allo scarico dei reflui nei corpi idrici ricettori.

La precedente Legge 319/76 (Legge "Merli"), infatti, prevedeva concentrazioni massime sullo scarico nei corpi idrici a prescindere dalle capacità intrinseche dello stesso di accoglierle, diluirle e, soprattutto, autodepurarsi.

Il versamento di reflui contenenti materiale organico, infatti, ha un impatto diverso a seconda dei corpi idrici ricettori: una stessa concentrazione di inquinante versata in un fiume a bassa portata per un certo periodo di tempo ha un diverso impatto rispetto a quello in un corpo idrico con elevata portata, così come a parità di portata sono diversi gli effetti al variare delle caratteristiche di forma e di pendenza dell'alveo.

Il lavoro di ricerca ha seguito questa traccia, cercando di comprendere al meglio i meccanismi, soprattutto idrodinamici, che permettono al corpo idrico di smaltire il carico organico che viene inevitabilmente versato in esso a seguito dei processi di depurazione o di recapito di acque di ruscellamento urbano.

L'attività degli anni di dottorato, inoltre, si è concentrata in modo particolare sui processi di autodepurazione delle correnti idriche, con particolare riguardo all'ossigeno disciolto in acqua, partendo dallo studio dello stato attuale delle conoscenze fino a progettare un'attività sperimentale che permettesse di avere dati originali da elaborare per scrivere relazioni in grado di predire, con sufficiente approssimazione, le modalità e i tempi di recupero delle concentrazioni di ossigeno disciolto.

Il versamento di sostanza organica, infatti, determina lo sviluppo di batteri aerobi che tendono a degradare la stessa, consumando l'ossigeno disciolto e sottraendolo, così, alle specie superiori (pesci) e determinandone la morte per asfissia.

L'ossigeno, inoltre, è una specie chimica poco solubile in acqua e la sua concentrazione massima, detta concentrazione a saturazione, dipende fortemente dalla temperatura. I periodi critici per i corsi d'acqua, quindi, risultano essere quelli caratterizzati da basse portate e alte temperature, tipicamente quelli estivi, con l'aggravante, per molti corsi d'acqua non perenni, che contemporaneamente aumenta anche il carico organico scaricatovi.

L'andamento dell'ossigeno disciolto in acqua a seguito del versamento di sostanza organica è un problema che viene studiato da circa 80 anni, risalendo il primo studio scientifico a Streeter&Phelps (1925), che elaborarono una semplificazione del fenomeno pervenendo a un'equazione in cui il deficit di ossigeno (differenza fra la quantità di ossigeno disciolto a saturazione a una data temperatura e la quantità di l'ossigeno presente in un certo istante temporale) dipende dal carico organico e da due parametri:

- il coefficiente di deossigenazione, che è una misura della velocità con la quale si degrada la sostanza organica;
- il coefficiente di riossigenazione, che è una misura della velocità con la quale la corrente idrica riacquisisce la quantità di ossigeno disciolto alla saturazione.

Il primo dei due parametri dipende sensibilmente dalla tipologia di inquinante e il suo valore è ricavabile unicamente dallo studio della tipologia di scarico; il secondo, invece, dipende dalle caratteristiche idrodinamiche del corpo idrico ricettore e la sua predizione è, allo stato attuale, oggetto di indagine scientifica.

In quanto si è finora richiamato, non si è precisata l'origine delle acque inquinanti, intendendo che esse possono essere di origine sia domestica sia meteorica, nè si è fatto cenno alla tipologia di ricettore naturale.

In realtà il problema dell'inquinamento delle acque non può limitarsi ai soli fiumi, in quanto sono gravi anche gli effetti su laghi, mare e falde acquifere.

Molto spesso, però, la degradazione ambientale di laghi, mare e falde dipende fortemente dalla degradazione ambientale dei fiumi e dei torrenti, essendo molto stretto il legame fra i corsi d'acqua e gli altri ricettori naturali.

E' da aggiungere che è diverso l'impatto che ha il versamento delle acque nere rispetto a quello delle acque di pioggia; le prime, infatti, sono molto più controllate e nella maggior parte dei casi si conosce il loro percorso e intervenire diventa un problema di scelta di allocazione delle risorse economiche.

Per le acque di pioggia, invece, il problema è più complesso, in quanto le superfici che vengono dilavate, in particolare quelle cittadine e industriali ma anche quelle agricole, sono per lo più cariche di sostanze inquinanti e/o nutrienti e molto spesso è ignota la loro destinazione.

Questo tipo di acque, inoltre, molto spesso alimenta rivoli che finiscono direttamente in mare o nei laghi oppure alimentano le falde acquifere, in particolare quelle freatiche, trasportando in esse le sostanze disciolte.

Trascurando del tutto le problematiche di depurazione presso gli impianti di trattamento, che esulano dagli scopi della tesi, diventa di prioritaria importanza, in primo luogo, ridurre la quantità di inquinanti che vengono immessi in natura, sia riducendo le fonti di inquinamento, sia cercando di veicolare al meglio le acque inquinate - permettendo cioè un maggiore controllo - sia ottimizzando i processi di smaltimento in base alla tipologia stessa di carico inquinante.

A questo scopo risultano fondamentali le politiche di sensibilizzazione sul consumo (o meglio sullo spreco) delle risorse naturali, la costruzione e la razionalizzazione di infrastrutture idrauliche di collettamento e allontanamento (fogne bianche, nere e miste, scoli e canali di bonifica) e degli impianti di depurazione in grado di smaltire le diverse forme di inquinamento presenti.

Molto si è fatto in passato per perfezionare le tecniche di smaltimento delle acque nere, differenziandole, anche per ragioni economiche, da quelle di pioggia. Oggi, però, è diffusa la consapevolezza che le acque di pioggia, molto spesso, producono una tipologia di inquinamento molto più pericolosa e, nel tempo, devastante per gli effetti di accumulo di sostanze non smaltibili naturalmente, che, quindi, vanno ad accumularsi nell'ambiente provocando inquinamento nella stessa catena alimentare.

Nell'ambito della problematica vasta cui si è fatto cenno, il lavoro di tesi è circoscritto alla comprensione e descrizione della fenomenologia dei processi riossigenativi delle correnti liquide, elaborando relazioni in grado di quantificare la capacità di riossigenazione dei corsi d'acqua.

Il meccanismo riossigenativo, infatti, è fortemente influenzato dalle caratteristiche del corpo idrico, anche se il processo è il medesimo in qualsivoglia fiume. Allorquando, infatti, un corpo idrico si trova in condizioni di deficit di ossigeno, si instaura naturalmente un processo di assorbimento di ossigeno dall'atmosfera per effetto della diluizione e della diffusione molecolare, una sorta di processo osmotico. Il passaggio avviene attraverso un sottile strato al limite della superficie libera, all'interno del quale si instaura un forte gradiente di concentrazione, dal valore praticamente infinito dell'atmosfera a quello finito all'interno del volume liquido sotteso dalla superficie di contatto aria-acqua.

Il moto dell'acqua a causa della turbolenza va a erodere lo spessore di questo strato, aumentando in questo modo il gradiente, favorendo il trasporto di massa all'interno della corrente medesima e, di fatto, aumentando l'efficienza del fenomeno. Questo fattore risulta

essere preponderante per lo studio in quanto permette di elaborare schemi di calcolo “ad hoc”, non applicabili al caso di acqua ferma o in lentissimo movimento.

L'attività di ricerca culminata con questa Tesi di Dottorato è parte integrante di un filone che, ormai da anni, impegna un gruppo di lavoro del Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria. Le prime valutazioni risalgono al 2000, all'indomani dell'entrata in vigore del citato D.Lvo 152/99, approdate poi ad approfondimenti sia in corsi d'acqua naturali, sia tramite il ricorso a esperienze in laboratorio appositamente progettate.

L'attività sui corsi d'acqua è stata condotta in primo luogo sul fiume Lao per poi spostarsi sul fiume Crati, nel tratto che attraversa la città di Cosenza, fino alla confluenza con il torrente Liguori.

In laboratorio, invece, l'attività è iniziata nel 2003 con le prime indagini per poi proseguire nel 2004 e, infine, nel 2007. Ciascuna attività di laboratorio effettuata ha permesso di perfezionare le procedure e ricavare risultati utili alla comprensione qualitativa e quantitativa del fenomeno riossigenativo.

La configurazione finale del canale sperimentale, sul quale sono state eseguite le ultime prove nel 2007, discende direttamente dalle osservazioni scaturite nelle precedenti campagne sperimentali.

Attività non secondaria è stata, inoltre, quella dedicata all'esame critico dello stato della ricerca all'interno della comunità scientifica internazionale.

1. LA QUALITÀ DELLE ACQUE NEI RICETTORI NATURALI: INTRODUZIONE AL PROBLEMA E CENNI NORMATIVI

INTRODUZIONE

Un consistente insieme di attività di ricerca e di normativa ha da alcuni decenni a questa parte l'obiettivo della qualità delle acque dei ricettori fluviali.

Non esiste una definizione generale e oggettiva di qualità; è possibile, però, fornire una definizione in base agli effetti che l'acqua medesima ha sull'ambiente, sulle specie animali e vegetali e sull'uomo.

Si sa che l'acqua da sola non ha né odore né sapore, quindi la presenza di odore e/o sapore di per sé è indice di alterazione delle caratteristiche organolettiche; non è detto, però, che in generale siano alterazioni negative ma, come nel caso di acque minerali e termali, possono apportare benefici.

La definizione di qualità, quindi, è assolutamente arbitraria e la normativa italiana vigente, contenuta nei D. L. vi 152/99 e 152/06 "Codice dell'ambiente", ne dà una classificazione in base a precisi indicatori di carattere fisico-chimico (macrodescrittori) ed ecologico (Indice Biotico Esteso), incrociandone le caratteristiche in apposite tabelle.

L'effetto dell'inquinamento delle acque è ormai sotto gli occhi di tutti: alterazione o addirittura scomparsa di habitat, riduzione di biotipi, aumento di rischio per la specie umana. Diverse sono le fonti di inquinamento e diversi sono anche gli effetti che queste producono sull'ambiente: si va dall'inquinamento organico (versamenti non controllati di liquami e percolati di discarica nei corpi idrici, dilavamento di aree a elevata densità di reflui animali), all'inquinamento chimico (scarti delle lavorazioni di prodotti industriali, percolati da discariche di rifiuti pericolosi, dilavamento delle strade a elevata concentrazione di traffico), per giungere all'inquinamento di tipo radioattivo, meno presente in termini quantitativi ma sicuramente di gran lunga il più pericoloso.

Come accennato in premessa, questo lavoro di tesi si concentra su uno degli effetti provocati dall'inquinamento organico: la riduzione del quantitativo di ossigeno disciolto

nei corpi idrici, con particolare riferimento alle correnti e, scendendo nello specifico, sulla capacità che queste hanno di autodepurarsi.

L'ossigeno disciolto è uno dei principali parametri usati per la classificazione dello stato di salute di un corso d'acqua, in quanto da esso dipende fortemente la possibilità di vita delle specie ittiche nei corsi d'acqua e l'alterazione della qualità delle acque di falda alimentate dai corsi d'acqua medesimi.

1.1. L'INQUINAMENTO DELLE ACQUE: GENESI E TIPOLOGIE

L'inquinamento dei corsi d'acqua rappresenta uno dei principali problemi che gli Stati devono affrontare, in quanto rimandare ancora la soluzione del problema potrebbe pregiudicare, in ultima analisi, la continuazione stessa della specie umana.

Riferendosi al caso dei corpi idrici, si può dire che essi sono inquinati quando subiscono negative alterazioni di natura antropica rispetto alle condizioni naturali.

La normativa, come meglio sarà in seguito analizzato, definisce 7 parametri (definiti macrodescrittori) da rilevare per definire lo stato chimico di un corso d'acqua:

1. OD (mg/l) : ossigeno disciolto in acqua;
2. BOD₅ (mg/l): richiesta biochimica di ossigeno, ovvero la quantità di ossigeno necessaria all'ossidazione naturale, a opera dei batteri, della sostanza organica biodegradabile;
3. COD (mg/l): Richiesta chimica di ossigeno, ovvero la quantità di ossigeno necessaria all'ossidazione chimica, a opera di processi chimici, della sostanza organica;
4. NH₄ (mg/l): Azoto ammoniacale disciolto in acqua;
5. NO₃ (mg/l): Nitrati;
6. Fosforo totale (mg/l): quantità di fosforo totale presente nelle diverse forme;
7. Escherichia coli (UFC/100 ml): Coliformi fecali, ovvero le forme batteriche che, di norma, vivono all'interno dell'intestino dell'uomo.

Alcuni dei parametri prima definiti sono fra loro correlati anche se non direttamente, ovvero non è detto che quantità diverse di uno corrispondano necessariamente alle quantità di un altro, nonostante si influenzino a vicenda.

Si consideri, a esempio, il caso del BOD₅ e del COD: dalle definizioni date è evidente come il BOD₅ sia un sottoinsieme del COD, nel senso che tutta la sostanza organica che si può ossidare biologicamente, può essere ossidata anche chimicamente, ma non vale il viceversa.

Alti valori di BOD₅, normalmente, corrispondono ad alti valori di COD, ma può succedere, a esempio, che in un corso d'acqua si riscontrino bassi valori di BOD₅ ma alti valori di COD, derivanti, per esempio, dall'acqua del dilavamento delle strade, contenente, di solito, sostanze non biodegradabili.

Oltre a questi parametri, è possibile definirne degli altri dai quali ricavare altre utili informazioni circa la qualità del corso d'acqua in esame.

Si possono citare, per completezza, gli olii e i grassi, i tensioattivi, i metalli pesanti e alcuni parametri microbiologici. I grassi e gli oli sono miscele di esteri della glicerina con acidi grassi che hanno la caratteristica di essere insolubili in acqua e, per la loro bassa densità, di accumularsi sulla superficie creando dei problemi di carattere estetico e di disturbo alla riossigenazione.

I tensioattivi sono dei composti organici la cui molecola, sviluppata in lunghezza, è per la gran parte non polare mentre a un'estremità è presente un gruppo polare idrofilo. Queste molecole modificano e riducono la tensione superficiale dell'acqua in modo che, se agitata, questa, può inglobare aria e formare schiuma. I metalli pesanti rappresentano, come già esposto in premessa, una pericolosissima fonte di inquinamento, in quanto entrano nella catena alimentare, accumulandosi e producendo effetti spesso cancerogeni. Si rammenta che sono definiti metalli pesanti, quelli caratterizzati da un alto peso atomico, come in Nichel (Ni), il Manganese (Mn), il Piombo (Pb), il Cromo (Cr), il Rame (Cu), lo Zinco (Zn), il Cadmio (Cd), il Ferro (Fe) e il Mercurio (Hg). Altri composti caratterizzati da elevata tossicità sono i cianuri, i fenoli i solventi organici clorurati e azotati, i pesticidi.

La presenza di microrganismi patogeni nelle acque è particolarmente sentita per gli effetti che si possono avere, in particolare, per la balneazione. Oltre agli Escherichia coli, si conducono, quando possibile, analisi per verificare direttamente la presenza di batteri o virus responsabili di malattie che spesso, in seguito ad assunzione da parte dell'uomo, mettono a repentaglio la vita stessa.

Volendo fare una disanima indicativa delle cause dei diversi tipi di inquinamento, si può sicuramente partire dall'inquinamento organico, che è di gran lunga la più diffusa forma di

inquinamento presente sul territorio nazionale e, ancor di più, in regioni come la Calabria a bassa densità industriale.

La causa principale dell'inquinamento è da ricercarsi nella mancanza di efficienti reti fognarie, di impianti di depurazione e di raccolta dei percolati di discarica.

I collettori di fognatura, molto spesso, sono poco curati e nel tempo iniziano a deteriorarsi e a perdere gradualmente la loro funzionalità. Non tutti gli agglomerati urbani, inoltre, sono provvisti di rete fognaria: molti, infatti, si servono ancora di pozzi neri che accumulano carichi organici molto alti e molto spesso è incognita la destinazione finale della raccolta.

Un'altra criticità dei collettori fognari è rappresentata dagli impianti di sollevamento, spesso mal dimensionati, o meglio sottodimensionati e mal costruiti, che nei periodi di picco di utilizzo entrano in crisi, versando il contenuto delle vasche nelle aree circostanti.

Passando agli impianti di depurazione, la loro inefficienza è cronaca quotidiana e durante la stagione estiva raggiunge il picco di popolarità. Il problema fondamentale di questo tipo di impianti è rappresentato in primo luogo dall'età che ne riduce le potenzialità ed è causa di sottodimensionamento, avendo adottato schemi previsionali di sviluppo urbano inadeguati; per di più gli impianti presentano tecnologie oramai superate. Per le località ad alta presenza turistica, inoltre, dove molto spesso gli abitanti fluttuanti superano di gran lunga quelli residenti, si aggiungono problemi gestionali di difficile soluzione: primo fra tutti, la difficoltà di prevedere i picchi di presenze non consente efficaci avviamenti degli impianti che, essendo per lo più di natura biologica, hanno bisogno di un adeguato tempo per la crescita batterica utile ad assorbire la massa organica che giunge all'impianto. In queste condizioni, le vasche di ossidazione entrano in crisi, si sviluppano condizioni anaerobiche che riducono le capacità depurative provocando anche cattivi odori e spesso entrano in funzione gli scarichi di piena che dirottano portate considerevoli non trattate direttamente nei corsi d'acqua.

Per quanto riguarda i percolati di discarica, si è in presenza di un altro grosso problema che provoca squilibri ambientali. I percolati di discarica rappresentano, infatti, una tipologia di acqua inquinata molto pericolosa, dipendente dalla qualità dei rifiuti presenti in discarica e dall'età della discarica medesima.

Una seconda fonte di inquinamento, di minor impatto quantitativo ma di maggior impatto qualitativo, è rappresentata dall'inquinamento inorganico.

Questa tipologia di inquinamento è tipica dei reflui industriali non trattati adeguatamente e delle acque di dilavamento delle strade e parcheggi ad alta capacità di traffico. Le acque reflue, infatti, sono caratterizzate da alte percentuali di solventi chimici, metalli pesanti, oli e gomma di pneumatici.

Sono ormai diffuse nella comunità scientifica le ricerche finalizzate alla comprensione sia del contenuto delle acque di dilavamento di origine meteorica, sia del loro impatto sui corpi idrici, in quanto esse determinano una tipologia di inquinamento molto diffuso e difficilmente controllabile.

Particolarmente pericolosi sono i metalli pesanti in quanto formano un particolato che si lega ai micro-sedimenti presenti nelle strade e durante le piogge viene veicolato all'interno delle fognature bianche attraverso le caditoie. Fino a pochi anni fa questo problema era trascurato, cosicché ingenti quantità di questi materiali sono stati convogliati nei corsi d'acqua ricettori delle fognature bianche o dagli scaricatori di piena delle fognature miste. I metalli pesanti non sono biodegradabili per cui essi rimangono dispersi nell'ambiente naturale per un tempo teoricamente infinito. La loro azione è estremamente tossica per le specie viventi, in quanto tendono a propagarsi attraverso la catena alimentare e ad accumularsi nei consumatori finali.

1.2. LA MODELLAZIONE DEI BILANCI DI MASSA NEI CORPI IDRICI

Un corso d'acqua, soggetto a inquinamento, è sede di una serie di fenomeni chimici e biochimici complessi che vanno opportunamente studiati, schematizzati e modellati in modo da trovare relazioni analitiche utili a valutare, con la migliore approssimazione possibile, l'andamento nel tempo e nello spazio dei parametri di qualità.

Lo studio può essere affrontato considerando due diverse configurazioni, a seconda che la sostanza immessa si distribuisca uniformemente all'interno del volume o, viceversa, che la sua distribuzione non sia uniforme nello spazio e nel tempo. Nel primo caso si parla di sistema a miscelazione completa o completamente miscelato, nel secondo di sistema a miscelazione incompleta.

Nella letteratura tecnica questi sistemi vengono definiti "Reattori", proprio perché sede di reazioni chimiche.

1.2.1. Sistemi a miscelazione completa

Un sistema è definito completamente miscelato quando una sostanza immessa in esso risulta avere le stesse caratteristiche in tutti i punti. Con questa classificazione vengono annoverati numerosi schemi di funzionamento, semplificando notevolmente il reale comportamento dei corsi d'acqua e potendo così riferirsi a condizioni statiche o quasi-statiche.

Il più semplice sistema completamente miscelato utilizzato per modellare un corpo idrico recettore è lo schema cosiddetto Continuously Stirred Tank Reactor (CSTR). Uno schema CSTR è rappresentato in Figura 1 dove, a seguito di una generica immissione, si hanno tre risposte, rispettivamente di uscita (Outflow), di possibili reazioni nel mezzo (Reaction) e di sedimentazione di fondo (Settling).

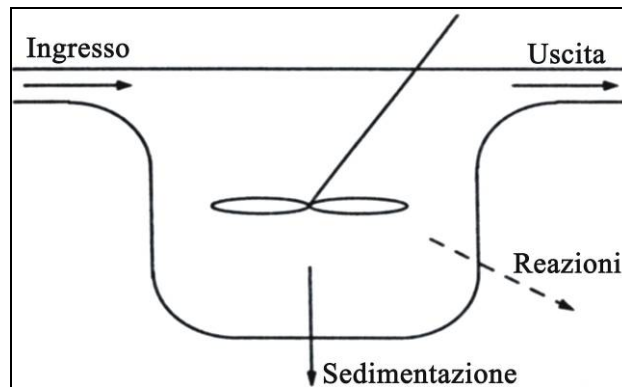


Figura 1: Sistema completamente miscelato, CSTR (Chapra 1997, modificato)

In un periodo di tempo definito, il bilancio di massa per tale sistema può essere così espresso:

$$\text{Accumulo} = \text{Immissione} - \text{Uscita} - \text{Reazioni} - \text{Sedimentazione}$$

Accumulo

Rappresenta l'accumulo di materia [MT^{-1}] ed è indicativo dello scambio di massa M nel sistema al tempo t :

$$\text{Accumulo} = \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (1)$$

In cui la massa è legata alla concentrazione c di un generico costituente (ossigeno disciolto, TSS, COD) dalla relazione:

$$c = \frac{M}{V} \quad (2)$$

in cui V rappresenta il volume [L^3] del sistema.

L'equazione dell'accumulo può essere espressa in termini di concentrazione, ovvero:

$$Accumulo = \frac{\Delta(V \cdot c)}{\Delta t} = V \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad (3)$$

e, in termini infinitesimali:

$$Accumulo = V \cdot \frac{dc}{dt} \quad (4)$$

Immissione

Questo termine indica l'input del sistema. Considerando un sistema completamente miscelato, la posizione di tale input è ininfluyente, in quanto lo stesso viene a essere completamente distribuito nel sistema. Qualora, invece, la schematizzazione fosse riferita a un fiume, oltre che il valore è necessario specificare il punto di immissione.

A ogni modo, per un reattore di tipo CSTR, tutte le immissioni si racchiudono nell'unico termine W [MT^{-1}]:

$$Immissione = W(t) = Q \cdot c_{in}(t)$$

dove Q [L^3T^{-1}] rappresenta la portata di tutte le immissioni che si hanno nel sistema e $c_{in}(t)$ [ML^{-3}] è la concentrazione del flusso in ingresso.

Uscita

Il termine indica la portata Q per la concentrazione in uscita, pari a quella del reattore stesso nell'ipotesi di reattore completamente miscelato:

$$Uscita = c \cdot Q$$

In questo termine vengono racchiusi i fenomeni di trasformazione che possono avvenire all'interno del reattore; in particolare, si assume spesso che siano del primo ordine, cioè esprimibili mediante una relazione in cui compare un coefficiente di reazione k [T^{-1}]:

$$Reazioni = k M$$

Sedimentazione

La sedimentazione della massa può essere formulata come un flusso di massa attraverso la superficie dei sedimenti presenti nel corpo idrico:

$$\text{Sedimentazione} = v_s \cdot A_s \cdot c$$

dove v_s rappresenta la velocità di sedimentazione e A_s l'area della superficie dei sedimenti. Poiché il volume risulta pari al prodotto tra la profondità h e l'area di superficie A_s , l'equazione precedente può essere formulata in modo formalmente simile a una reazione di primo ordine:

$$\text{Sedimentazione} = k_{SE} \cdot V \cdot c$$

dove $k_{SE} [T^{-1}]$ rappresenta la costante di decadimento del primo ordine, pari al rapporto tra la velocità di sedimentazione e la profondità.

In conclusione, il bilancio di massa può essere espresso analiticamente mediante la seguente relazione:

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = Q \cdot c_{in} - Q \cdot c - k_{SE} \cdot V \cdot c - v_s \cdot A_s \cdot c \quad (5)$$

Se il sistema è interessato dall'effetto di un carico costante in ingresso W per un periodo di tempo abbastanza lungo, si ottiene una condizione di equilibrio dinamico (*steady-state*), da cui poter trarre indicazioni medie sulla qualità del recettore. Questa situazione comporta che non c'è accumulo, quindi la soluzione della (5) conduce a:

$$c = \frac{W}{Q + kV + v_s A_s} \quad (6)$$

Quando la massa non è costante nel tempo, si ha una condizione non stazionaria, vale a dire $\frac{dc}{dt} \neq 0$. Riprendendo la (5), dividendo per il volume V e raggruppando i termini si ottiene:

$$\frac{dc}{dt} + \lambda \cdot c = \frac{W(t)}{V} \quad (7)$$

$$\text{con } \lambda = \frac{Q}{V} + k + \frac{v_s}{h}$$

in cui λ è definito autovalore, ovvero un valore caratteristico di riferimento.

L'equazione 7 è un'equazione differenziale non omogenea del primo ordine e, pertanto, dà luogo a una soluzione generale per $W(t) = 0$ e a una particolare, che dipende dalla forma specifica di $W(t)$, cioè dal tipo di scarico e dal suo andamento nel tempo.

Per $c=c_0$ al tempo $t=0$, l'equazione (6) può essere risolta integrando per variabili separabili, ottenendo la seguente soluzione generale $c = c_0 \cdot e^{-\lambda t}$ cioè:

$$c = c_0 \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{x}{u}} \quad (8)$$

con x ascissa media di percorrenza e u componente di velocità nella stessa direzione.

Tutti gli altri schemi possono essere considerati come elementi singoli con caratteristiche omogenee, oppure come una serie di reattori interagenti tra di loro.

Con la sigla CSTRs si indica una serie di reattori completamente miscelati. Questi possono avere un funzionamento di tipo *Feedforward*, quando cioè il loro legame è di soli reattori in serie non interagenti, viceversa si parla di funzionamento di tipo *Feedback*.

Per i reattori CSTRs *Feedforward* (Figura 2), si ha una notevole semplificazione dell'equazione risolutiva del bilancio di massa, non essendoci il ritorno di un'aliquota della portata dal reattore n al reattore $n-1$. Tale tipo di modellazione può essere applicata a una buona varietà di contesti; tra i più comuni vi sono la schematizzazione di laghi in serie connessi a fiumi e torrenti, oppure tratti di fiume omogenei confluenti l'uno nell'altro.

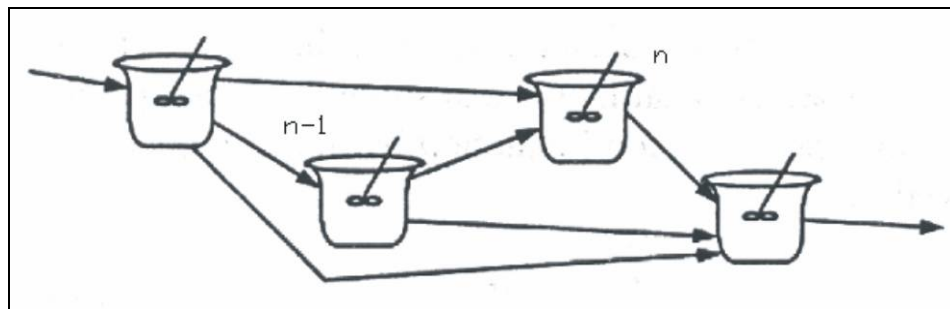


Figura 2: Sistema di reattori CSTRs di tipo Feedforward (Chapra, 1997)

L'equazione del bilancio di massa applicata a un sistema composto da due reattori (Figura 3) si esprime, quindi, con un sistema di due equazioni lineari del tipo:

$$\begin{cases} V_1 \cdot \frac{dc_1}{dt} = W_1 - Q_{12} \cdot c_1 - k_1 \cdot V_1 \cdot c_1 \\ V_2 \cdot \frac{dc_2}{dt} = W_2 + Q_{12} \cdot c_1 - Q_{23} \cdot c_2 - k_2 \cdot V_2 \cdot c_2 \end{cases} \quad (9)$$

Risolvendo il sistema in condizioni di *regime stazionario* si ottiene:

$$c_1 = \frac{1}{a_{11}} \cdot W_1 = \frac{1}{Q_{12} + k_1 \cdot V_1} \cdot W_1$$

$$c_2 = \frac{W_2 + a_{21} \cdot c_1}{a_{22}} = \frac{1}{Q_{23} + k_2 \cdot V_2} \cdot W_2 + \frac{Q_{12}}{Q_{23} + k_2 \cdot V_2} \cdot \frac{1}{Q_{12} + k_1 \cdot V_1} \cdot W_1$$

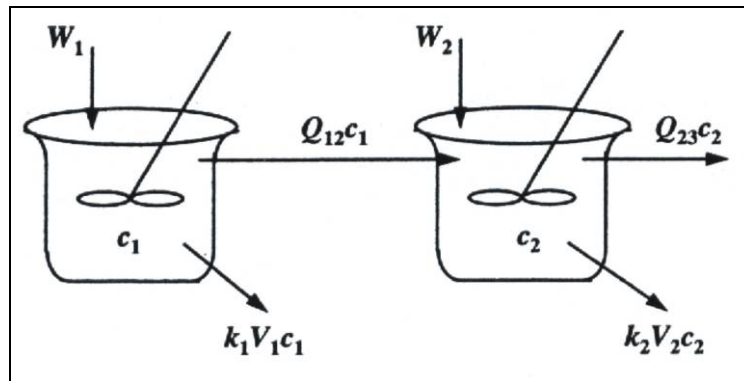


Figura 3: Sistema di due reattori in serie con funzionamento Feedforward (Chapra, 1997)

Naturalmente, la concentrazione del secondo reattore dipende sia dal carico inquinante dello stesso, sia da quello del primo reattore e, poiché il modello è lineare, gli effetti dei due carichi inquinanti sono indipendenti.

Considerando lo stesso caso, ma in condizioni di *regime transitorio*, il sistema (9), riscritto e integrato, posto $c_1 = c_{10}$, $c_2 = c_{20}$, per $t = 0$, porta alle seguenti soluzioni generali:

$$c_1 = c_{10} \cdot e^{-\lambda_{11} \frac{x}{u}} ; c_2 = c_{20} \cdot e^{-\lambda_{22} \frac{x}{u}} + \frac{\lambda_{21} \cdot c_{10}}{\lambda_{22} - \lambda_{11}} \cdot \left(e^{-\lambda_{11} \frac{x}{u}} - e^{-\lambda_{22} \frac{x}{u}} \right)$$

in cui: $\lambda_{11} = \frac{Q_{12}}{V_1} + k$, $\lambda_{21} = \frac{Q_{12}}{V_2}$, $\lambda_{22} = \frac{Q_{23}}{V_2} \cdot c_2 + k_2$

Considerando invece i reattori del tipo *CSTRs Feedback* (Figura 4), come si è già detto c'è un'aliquota di portata che ritorna dal reattore $n+1$ al reattore n .

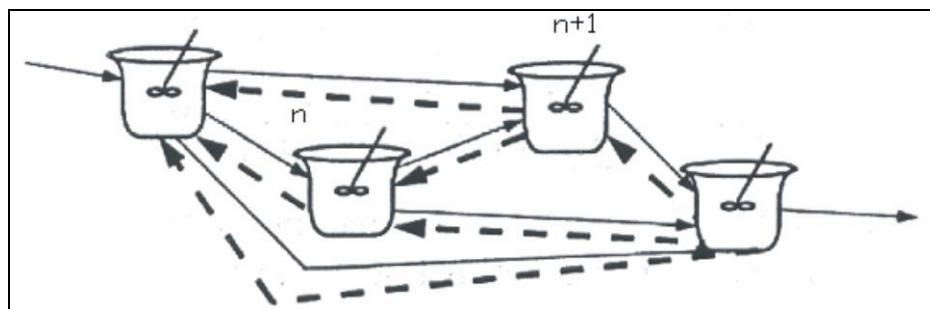


Figura 4: Sistema di reattori CSTRs di tipo Feedback (Chapra,1997)

Considerando ciò che accade in un sistema composto da due reattori (Figura 5), l'equazione del bilancio di massa diventa:

$$\begin{cases} V_1 \cdot \frac{dc_1}{dt} = W_1 + Q_{01} \cdot c_0 - Q_{12} \cdot c_1 - k_1 \cdot V_1 \cdot c_1 + Q_{21} \cdot c_2 \\ V_2 \cdot \frac{dc_2}{dt} = W_2 + Q_{12} \cdot c_1 - Q_{21} \cdot c_2 - k_2 \cdot V_2 \cdot c_2 - Q_{23} \cdot c_2 \end{cases} \quad (10)$$

Risolvendo il sistema nel caso di regime stazionario, si ottiene:

$$c_1 = \frac{1}{a_{11} - (a_{21}a_{12} / a_{22})} \cdot W_1 + \frac{1}{a_{21} - (a_{11}a_{22} / a_{12})} \cdot W_2$$

$$c_2 = \frac{1}{a_{12} - (a_{11}a_{22} / a_{21})} \cdot W_1 + \frac{1}{a_{22} - (a_{21}a_{12} / a_{11})} \cdot W_2$$

in cui $a_{11} = Q_{12} + k_1 \cdot V_1$, $a_{12} = -Q_{12}$, $a_{21} = -Q_{12}$, $a_{22} = Q_{21} + Q_{23} + k_2 \cdot V_2$.

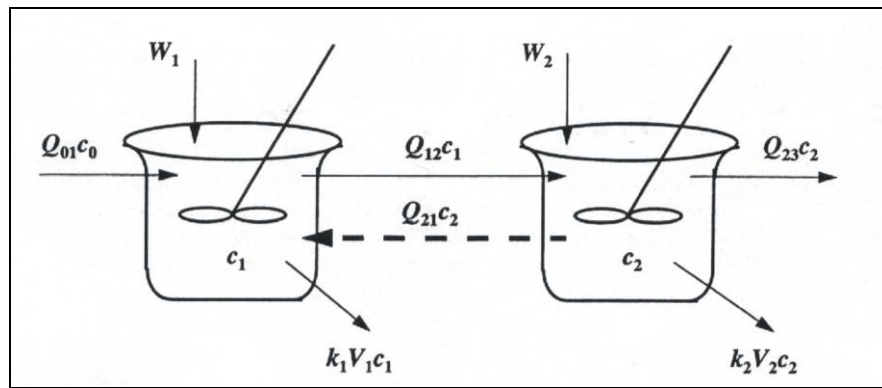


Figura 5: Sistema di due reattori feedback (Chapra,1997)

Considerando invece il caso del regime transitorio, e posto $c_1 = c_{10}$, $c_2 = c_{20}$ per $t = 0$, la soluzione generale fornisce:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{(\lambda_f - \alpha_{22}) \cdot c_{10} - \alpha_{12} \cdot c_{20}}{\lambda_f - \lambda_s} \cdot e^{-\lambda_f t} + \frac{\alpha_{12} \cdot c_{20} - (\lambda_s - \alpha_{22}) \cdot c_{10}}{\lambda_f - \lambda_s} \cdot e^{-\lambda_s t} \\ c_2 = \frac{-\alpha_{21} \cdot c_{10} + (\lambda_s - \alpha_{22}) \cdot c_{10}}{\lambda_f - \lambda_s} \cdot e^{-\lambda_f t} + \frac{-(\lambda_s - \alpha_{11}) \cdot c_{20} + \alpha_{21} \cdot c_{10}}{\lambda_f - \lambda_s} \cdot e^{-\lambda_s t} \end{cases} \quad (11)$$

in cui $\lambda_f, \lambda_s = \frac{(\alpha_{11} + \alpha_{22}) \pm \sqrt{(\alpha_{11} + \alpha_{22})^2 - 4(\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12} \cdot \alpha_{21})}}{2}$, $\alpha_{11} = \frac{Q_{12}}{V_1} + k_1$, $\alpha_{12} = \frac{Q_{21}}{V_1}$,

$$\alpha_{21} = \frac{Q_{12}}{V_2}, \alpha_{22} = \frac{Q_{23} + Q_{12}}{V_2} + k_2.$$

1.2.2. Sistemi a miscelazione incompleta

I sistemi a mescolamento o miscelazione incompleta sono quelli in cui l'immissione di un inquinante non provoca una situazione di uniformità e omogeneità nel reattore stesso. Essi valutano la dispersione dell'inquinante in funzione del gradiente di concentrazione dello stesso.

I meccanismi di trasporto possono essere di tipo advettivo, diffusivo, di assorbimento e volatilizzazione.

Advezione e Diffusione

La sostanziale differenza tra questi due tipi di trasporto è la modalità con cui avviene la propagazione dell'inquinante. Nel trasporto per advezione, la massa inquinante si muove seguendo le caratteristiche del moto del recettore e lasciando inalterata la concentrazione dell'inquinante stesso. Nel moto diffusivo, invece, la massa tende a espandersi e a muoversi verso le zone con minore concentrazione della sostanza (Figura 6).

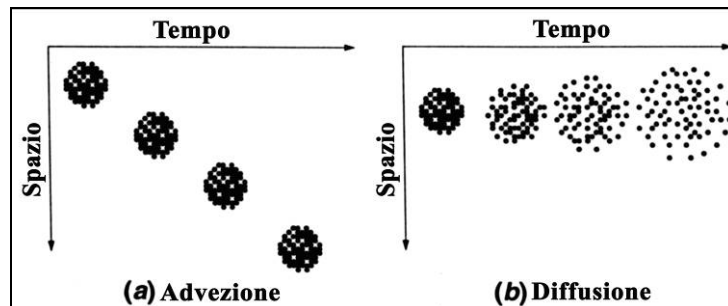


Figura 6: Trasporto advettivo (a) e diffusivo (b) di un inquinante (Chapra, 1997)

Il trasporto di tipo diffusivo è regolato dalla legge di Fick:

$$J_x = -k_f \frac{dc}{dx} \quad (12)$$

Dove:

- J_x [$ML^{-2}T^{-1}$]: flusso di massa nella direzione x ;
- k_f [L^2T^{-1}]:coefficiente di Fick;
- c [ML^{-3}]: concentrazione del generico inquinante;
- x [L]: verso della direzione considerata.

Adsorbimento

Il processo di adsorbimento dell'inquinante implica l'associazione dello stesso con la parte solida contenuta nel recettore. Si definisce adsorbimento l'accumulo dell'inquinante sulla superficie delle particelle solide. Per le sostanze organiche disciolte, tale meccanismo è ricondotto alla trattenuta con forze superficiali che legano l'inquinante alle particelle solide e a forze intermolecolari deboli del tipo Van der Waals.

In qualche caso l'adsorbimento delle sostanze inquinanti può essere determinato anche da scambi di tipo ionico.

Volatilizzazione

Questo tipo di trasporto è individuato dal passaggio di una sostanza gassosa all'interfaccia liquida. Il flusso netto nella direzione verticale z che si sviluppa all'interfaccia liquida è dato dalla seguente relazione:

$$J_z = -k_l(c_{sat} - c) \quad (13)$$

dove k_l [MT^{-1}] è la velocità di trasferimento in ambiente liquido e c_{sat} [ML^{-3}] la concentrazione a saturazione. Con riferimento a un flusso gassoso, J_z diventa:

$$J_g = \frac{k_g}{RT_a}(p_g - p_i) \quad (14)$$

dove k_g [MT^{-1}] è la velocità di trasferimento della massa nel flusso laminare, T_a è la temperatura assoluta, R è la costante assoluta dei gas, p_g e p_i rappresentano le pressioni rispettivamente della miscela e all'interfaccia liquida.

Un tipo di reattore che può essere utilizzato per modellare i sistemi a miscelazione incompleta è il Plug Flow Reactor (PFR). Esso viene genericamente schematizzato mediante un bacino rettangolare, come rappresentato in Figura 7.

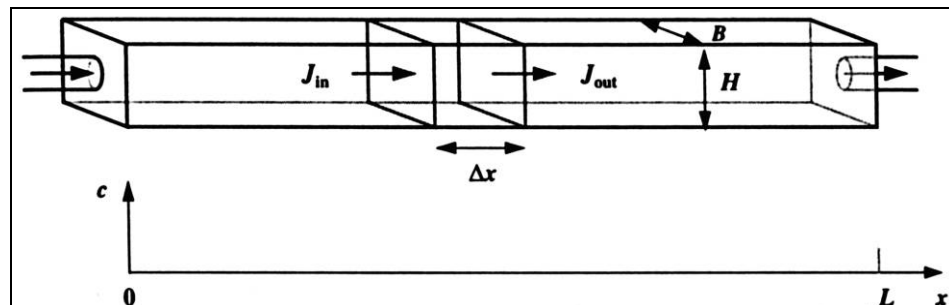


Figura 7: Reattore di tipo Plug Flow Reactor (PFR) (Chapra, 1997)

Il bilancio di massa è ottenuto per elementi infinitesimi di lunghezza Δx ed è espresso dalla seguente relazione:

$$\Delta V \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = J_{in} \cdot A - J_{out} \cdot A \pm \text{reazioni} \quad (15)$$

dove:

$\Delta V = A \cdot \Delta x$ [L³]: volume dell'elemento;

$A = B \cdot h$ [L²]: area della sezione del reattore;

B [L]: larghezza del canale;

h [L]: profondità del canale;

J_{in} e J_{out} [ML⁻²T⁻¹] flusso di massa in ingresso e in uscita dall'elemento Δx ;

reazioni [MT⁻¹]: aggiunta o perdita di massa dovuta a eventuali reazioni.

In un reattore del tipo Plug Flow, il fenomeno di trasporto dominante è quello di advezione, cioè di sola traslazione di massa in cui le sostanze immesse vengono trasportate nel reattore con la stessa sequenza di ingresso (Figura 8).

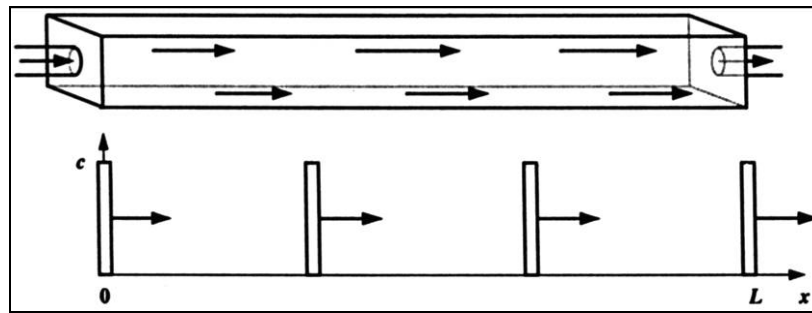


Figura 8: Fenomeni di trasporto in un PFR (Chapra, 1997)

I flussi in entrata e in uscita nel generico elemento di ampiezza Δx vengono definiti come:

$$J_{in} = U \cdot c \quad (16)$$

$$J_{out} = U \cdot \left(c + \frac{\partial c}{\partial x} \cdot \Delta x \right) \quad (17)$$

dove:

- U è la componente di velocità media in direzione x [LT⁻¹] = Q/A_c ;
- c è la concentrazione di un generico costituente [ML⁻³].

Infine, assumendo che le reazioni che avvengono entro il reattore siano del primo ordine, si può scrivere:

$$\text{Reazioni} = -k \cdot \Delta V \cdot \bar{c}$$

dove \bar{c} indica il valore medio della concentrazione e k è la velocità di reazione.

Sostituendo nella (15) si ottiene:

$$\Delta V \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = (U \cdot c) \cdot A - U \cdot \left(c + \frac{\partial c}{\partial x} \cdot \Delta x \right) \cdot A - k \cdot \Delta V \cdot \bar{c} \quad (18)$$

Combinando i termini e dividendo per $\Delta V = A \cdot \Delta x$, si ricava la nota equazione advettiva:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -U \cdot \frac{\partial c}{\partial x} - k \cdot c \quad (19)$$

In condizioni di moto permanente, ovvero imponendo che il termine di sinistra sia nullo, si ottiene un'equazione differenziale del primo ordine a variabili separabili in c e x , che, integrata rispettivamente tra c e c_0 e tra 0 e x , fornisce:

$$c = c_0 \cdot e^{-\frac{k}{U} \cdot x} \quad (20)$$

Il reattore di tipo PFR è quello maggiormente utilizzato per lo studio del trasporto degli inquinanti organici nei sistemi fluviali. Nella fattispecie, il valore della concentrazione iniziale, c_0 , può essere ricavato attraverso un bilancio di massa nel punto di immissione del contaminante. Assumendo perciò un flusso completamente miscelato nella dimensione laterale e verticale, il bilancio del flusso permette di scrivere $Q = Q_s + Q_r$, da cui si può esprimere un bilancio di massa, $Q_s \cdot c_s + Q_r \cdot c_r - (Q_s + Q_r) \cdot c_0 = 0$; essendo Q_s e Q_r rispettivamente la portata dello scarico e del recettore prima di ricevere l'inquinante e c_s e c_r le concentrazioni iniziali dello scarico e del recettore.

Diversamente dal reattore di tipo PRF, in cui il fenomeno dominante è quello dell'advezione, il reattore Mixed Flow (MFR) schematizza oltre al processo advettivo quello di diffusione-dispersione. La sostanza inquinante in ingresso nel reattore subisce un processo dispersivo e diffusivo in seguito al quale nella sezione di uscita fluirà in condizioni più "sparse".

Come mostrato in Figura 9, un qualsiasi inquinante immesso nel recettore si diffonde in entrambi i sensi e per tutto il percorso del reattore stesso.

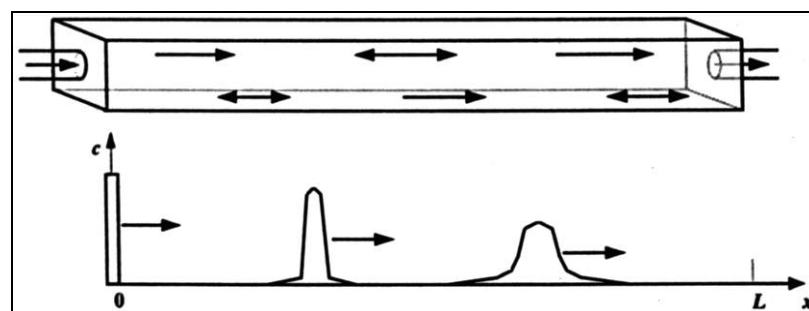


Figura 9: Fenomeni di trasporto in un MFR (Chapra, 1997)

In questo caso, il flusso in ingresso e in uscita nel generico elemento di ampiezza Δx è descritto dalle seguenti relazioni:

$$J_{in} = U \cdot c - E \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (21)$$

$$J_{out} = U \cdot \left(c + \frac{\partial c}{\partial x} \cdot \Delta x \right) - E \cdot \left[\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \cdot \Delta x \right] \quad (22)$$

dove E indica il coefficiente di diffusività turbolenta.

Diverse formule sono disponibili in letteratura per valutare tale coefficiente, tra cui la relazione di Fischer (1979):

$$E = 0,011 \cdot \frac{U^2 \cdot B^2}{h \cdot U_c} \quad (23)$$

con U_c è la velocità critica della corrente espressa in m/s e B è la larghezza del canale in m, e h è il tirante idrico, espresso in m.

Si può anche fare riferimento alla formula di McQuivey e Keefer (1974), la cui applicazione è limitata a sistemi caratterizzati da un numero di Froude minore di 0,5:

$$E = 0,05937 \cdot \frac{Q}{i \cdot B} \quad (24)$$

dove i è la pendenza del canale e Q la portata.

Infine, assumendo anche in questo caso che le reazioni eventualmente esistenti siano del primo ordine, l'equazione di bilancio può scriversi nella forma:

$$\Delta V \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = (U \cdot c) \cdot A + U \cdot A \cdot \left(c + \frac{\partial c}{\partial x} \Delta x \right) - E \cdot A \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + E \cdot A \cdot \left[\frac{\partial c}{\partial x} + \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \Delta x \right] - k \cdot \Delta V \cdot \bar{c} \quad (25)$$

Combinando i termini e dividendo per $\Delta V = A \cdot \Delta x$, si ricava la nota relazione ADE, ossia del trasporto advettivo-diffusivo:

$$\boxed{\frac{\partial c}{\partial t} = -U \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) + E \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - k \cdot c} \quad (26)$$

da cui si ottiene, in condizioni di moto permanente:

$$-U \cdot \left(\frac{dc}{dx} \right) + E \cdot \frac{d^2 c}{dx^2} - k \cdot c = 0 \quad (27)$$

A questo punto, la soluzione generale può essere ottenuta in diversi modi.

Quello certamente più semplice consiste nell'assumere che la soluzione si presenti nella seguente forma $c = e^{\lambda \cdot x}$

Questa soluzione può essere sostituita nell'equazione precedente per arrivare a ottenere la caratteristica equazione: $E \cdot \lambda - U \cdot \lambda - k = 0$

le cui soluzioni sono:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{U}{2E} \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{4kE}{u^2}} \right) \\ \lambda_2 & \end{aligned} \quad (28)$$

In conclusione, la soluzione generale risulta:

$$c = F \cdot e^{\lambda_1 \cdot x} + G \cdot e^{-\lambda_2 \cdot x} \quad (29)$$

dove F e G sono le costanti di integrazione che possono essere determinate una volta note le condizioni al contorno.

1.3. CENNI DI NORMATIVA EUROPEA, NAZIONALE E REGIONALE

In questo paragrafo vengono brevemente richiamate le principali norme emesse dai diversi enti territoriali e sopranazionali concernenti la qualità delle acque.

Un forte impulso alla tutela dei corpi idrici superficiali è stato dato dall'Unione Europea, che negli anni ha emanato una serie di direttive, sempre più stringenti, che hanno spinto il Legislatore italiano a emanare interventi normativi nazionali, conseguenti al recepimento delle stesse direttive, sempre più importanti.

1.3.1. Le recenti direttive europee

In Europa, la questione della tutela e gestione delle acque dall'inquinamento è stata affrontata mediante due direttive del 1991, la 271 e la 156 e più recentemente dalla Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE.

La 91/271/UE è stata pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale della Comunità Economica Europea del 21/5/1991 e riguarda il trattamento delle acque reflue urbane, dettando le linee programmatiche alle quali gli Stati Membri devono conformarsi nell'affrontare in materia unitaria le questioni riguardanti:

- l'inquinamento dei corpi idrici;
- la programmazione della costruzione di reti fognarie e di impianti di depurazione dei liquami urbani.

La direttiva dispone, inoltre, che gli Stati Membri adottino norme per le quali gli agglomerati urbani abbiano reti fognarie, secondo criteri precisati dalla stessa normativa, in funzione della popolazione e dell'appartenenza alla tipologia dell'area in esame.

Queste possono essere:

aree sensibili, cioè i laghi naturali, le acque dolci destinate all'uso potabile, le acque costiere e i mari già eutrofizzati in assenza di interventi protettivi specifici e tutte le aree dove è necessario un trattamento diverso in applicazione ad altre direttive;

aree meno sensibili, ovvero i sistemi e acque marine territoriali dove lo scarico delle acque reflue non produce effetti negativi sull'ambiente. All'interno delle aree sensibili, in particolare, gli scarichi urbani devono essere sottoposti a un trattamento più spinto rispetto a quello secondario della sola disinfezione. Infine, in presenza di fenomeni di eutrofizzazione, devono essere effettuati trattamenti di rimozione del fosforo e/o azoto tali da soddisfare i limiti imposti secondo le indicazioni proposte dalla direttiva stessa.

La direttiva 91/156/UE riguarda, invece, il regolamento per lo smaltimento e il recupero dei rifiuti ai fini della tutela dell'ambiente. Gli Stati membri devono adottare delle misure intese a limitare la produzione dei rifiuti proponendo delle tecnologie pulite nonché il riciclaggio dei prodotti, potendo soddisfare autonomamente e singolarmente lo smaltimento dei rifiuti. Il controllo deve consistere nel rilascio di autorizzazioni solo alle imprese che provvedono allo smaltimento dei rifiuti e al loro riciclaggio secondo le modalità prescritte.

Per assicurare il controllo continuo dei rifiuti, dalla produzione allo smaltimento definitivo, occorre anche sottoporre ad autorizzazione o iscrizione e a un adeguato controllo altre imprese che si occupano di rifiuti, come gli operatori intermedi addetti alla raccolta, al trasporto e alla mediazione. La stessa direttiva classifica in allegato le varie categorie di rifiuti previsti, le operazioni di smaltimento e quelle che comportano una possibilità di recupero.

Gli obiettivi principali della direttiva sulle acque 2000/60/CE si inseriscono in quelli più complessivi della politica ambientale della Comunità che deve contribuire a perseguire salvaguardia, tutela e miglioramento della qualità ambientale, nonché l'utilizzazione razionale delle risorse naturali e che deve essere fondata sui principi della precauzione e dell'azione preventiva, sul principio della riduzione, soprattutto alla fonte, dei danni causati all'ambiente e sul principio "chi inquina paga".

La direttiva acque mira ad ottenere la graduale riduzione delle emissioni di sostanze pericolose nelle acque per raggiungere l'obiettivo finale di eliminare le sostanze pericolose prioritarie e contribuire a raggiungere valori vicini a quelli del fondo naturale per le concentrazioni in ambiente marino di sostanze presenti in natura.

Sono sei i punti principali della direttiva:

Bacini e distretti idrografici

La direttiva 200/60/CE si propone di istituire un quadro per la protezione delle acque superficiali interne, delle acque di transizione, delle acque costiere e sotterranee che:

- impedisca un ulteriore deterioramento, protegga e migliori lo stato degli ecosistemi acquatici e degli ecosistemi terrestri e delle zone umide direttamente dipendenti dagli ecosistemi acquatici sotto il profilo del fabbisogno idrico;
- agevoli un utilizzo idrico sostenibile fondato sulla protezione a lungo termine delle risorse idriche disponibili;
- miri alla protezione rafforzata e al miglioramento dell'ambiente acquatico, anche attraverso misure; assicuri la graduale riduzione dell'inquinamento delle acque sotterranee e ne impedisca l'aumento;
- contribuisca a mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità.

La Direttiva CEE 2000/60 prevede, quindi, che gli Stati membri individuino i singoli bacini idrografici presenti nel loro territorio e li assegnino a singoli distretti idrografici, (definiti come la principale unità per la gestione dei bacini idrografici) accorpando eventualmente i piccoli bacini idrografici in un unico distretto, inoltre gli Stati membri devono adottare disposizioni amministrative adeguate, per l'applicazione delle norme previste. Per ciascun distretto idrografico interamente compreso nel suo territorio, ogni Stato membro provvede a predisporre un Piano di gestione del bacino idrografico, con descrizione generale delle caratteristiche del distretto idrografico, sintesi delle pressioni e degli impatti significativi esercitati dalle attività umane, rappresentazione cartografica delle aree protette, mappa delle reti di monitoraggio con la rappresentazione dei risultati. Tutti i piani di gestione dovranno essere pubblicati entro 9 anni dall'entrata in vigore della nuova direttiva.

Obiettivi ambientali

Per attuare i programmi di misure specificate nei Piani di gestione in relazione alle acque superficiali, alle acque sotterranee e alle aree protette, gli Stati membri devono adottare tutte le misure necessarie ad impedire il deterioramento dello stato di tutti i corpi idrici, superficiali e sotterranei, e devono altresì proteggere, migliorare e ripristinare tutti i corpi idrici, al fine di conseguire un buono stato delle acque superficiali e sotterranee entro 15 anni dall'entrata in vigore della direttiva.

Relativamente alle aree protette, gli Stati membri si devono allineare a tutti gli standard e agli obiettivi entro 15 anni dall'entrata in vigore della direttiva. Entro 4 anni dall'entrata in vigore della direttiva gli Stati membri devono predisporre, per ogni distretto idrografico, un'analisi delle caratteristiche del distretto, un'analisi dell'impatto delle attività umane sullo stato delle acque superficiali e delle acque sotterranee nonché un'analisi economica dell'utilizzo idrico. Gli Stati membri dovranno provvedere, entro lo stesso termine, all'istituzione di uno o più Registri delle aree protette di ciascun distretto idrografico per proteggere più efficacemente le acque superficiali e sotterranee o meglio salvaguardare gli habitat e le specie presenti che dipendono direttamente dall'ambiente acquatico. La direttiva prevede inoltre, entro 6 anni dalla sua entrata in vigore, la definizione di programmi di monitoraggio dello stato delle acque nell'ambito di ciascun distretto idrografico al fine di valutare lo stato chimico, ecologico e quantitativo delle acque superficiali e sotterranee. Una temporanea deteriorazione delle masse idriche non costituisce infrazione alla direttiva se è dovuta a circostanze eccezionali e non prevedibili, provocate da un incidente, una causa naturale o un caso di forza maggiore.

Politica dei costi per i servizi idrici

La direttiva impone agli Stati membri l'obbligo di adottare misure adeguate a fare in modo che i prezzi dell'acqua riflettano il costo complessivo di tutti i servizi connessi con l'uso dell'acqua stessa (gestione, manutenzione delle attrezzature, investimenti, sviluppi futuri), nonché i costi connessi con l'ambiente e l'impoverimento delle risorse. A tal fine gli Stati membri dovranno contribuire entro il 2020 a porre a carico dei vari settori di impiego dell'acqua (industria, famiglie e agricoltura) i costi dei servizi idrici, anche sulla base del principio "chi inquina paga".

Provvedimenti di base e provvedimenti supplementari per la riduzione dell'inquinamento.

La direttiva inoltre impone agli Stati membri di redigere, un programma di misure che tenga conto delle caratteristiche del distretto idrografico, dell'impatto delle attività umane sullo stato delle acque superficiali e sotterranee e dell'analisi economica dell'utilizzo idrico. Le misure sono articolate in "misure di base" (attuative della normativa comunitaria e finalizzate anche al recupero dei costi del servizio idrico e a garantire un impiego efficiente e sostenibile dell'acqua) e "misure supplementari", ossia provvedimenti studiati e messi in atto a complemento delle misure di base al fine di perseguire gli obiettivi di qualità ambientale. La direttiva attribuisce inoltre grande rilievo all'informazione e alla consultazione pubblica, imponendo agli Stati membri la pubblicazione e la messa a disposizione del pubblico:

- del calendario e del programma di lavoro per la presentazione del Piano di gestione dei bacini idrografici;
- di una valutazione globale provvisoria dei problemi di gestione della acque importanti;
- del progetto del Piano di gestione del bacino idrografico, almeno un anno prima dell'inizio del periodo cui il Piano si riferisce.

Controllo di sostanze particolarmente inquinanti e pericolose

La direttiva prevede che il Parlamento europeo e il Consiglio adottino misure specifiche per combattere l'inquinamento idrico prodotto da singoli inquinanti o gruppi di inquinanti che presentino un rischio significativo per l'ambiente acquatico o proveniente dall'ambiente acquatico, inclusi i rischi per le acque destinate alla produzione di acqua potabile. Nell'ambito di tali misure la Commissione ha già presentato una proposta contenente un primo elenco di sostanze pericolose prioritarie, tenendo conto della selezione di sostanze potenzialmente pericolose effettuata nella pertinente normativa comunitaria o nei pertinenti accordi internazionali. La direttiva quadro introduce a carico della Commissione l'obbligo di individuare le "sostanze pericolose prioritarie" per le quali si preveda di arrestare o eliminare gradualmente gli scarichi, le emissioni e le perdite entro 20 anni. Successivamente all'approvazione dell'elenco da parte del Parlamento europeo e del Consiglio, la Commissione deve ora elaborare dei criteri comunitari per la rilevazione della qualità dell'acqua e per il controllo delle emissioni delle sostanze interessate.

L'elenco di sostanze pericolose adottato dalla Commissione deve essere riesaminato entro 4 anni dalla data di entrata in vigore della nuova direttiva e successivamente almeno ogni 4 anni. Per le sostanze incluse nell'elenco di priorità, la Commissione dovrà presentare, entro 2 anni dall'inclusione, proposte in materia di controlli per la riduzione progressiva di scarichi, emissioni e perdite delle sostanze interessate e proposte riguardanti gli standard di qualità relativi alla concentrazione delle sostanze prioritarie nelle acque superficiali, nei sedimenti e nel biota. La nuova direttiva prevede inoltre che il Parlamento europeo ed il Consiglio adottino misure specifiche per prevenire e controllare l'inquinamento delle acque sotterranee e finalizzate al perseguimento di un buono stato chimico delle stesse.

Monitoraggio sull'attuazione della direttiva e correlate abrogazioni

La Commissione UE dovrà monitorare lo stato di applicazione della nuova direttiva, pubblicando una prima relazione entro 12 anni dalla sua entrata in vigore, e successivamente ogni 6 anni. La nuova direttiva, che dovrà essere recepita dagli Stati membri entro il 22 dicembre 2003, abroga, a partire dal 22 dicembre 2007, le seguenti direttive:

- direttiva 75/440/CEE, concernente la qualità delle acque superficiali destinate alla produzione di acqua potabile negli Stati membri;
- direttiva 77/795/CEE, che instaura una procedura comune di scambio di informazioni sulla qualità delle acque dolci superficiali nella Comunità;
- direttiva 79/869/CEE, relativa ai metodi di misura alla frequenza dei campionamenti e delle analisi delle acque superficiali destinate alla produzione di acqua potabile negli Stati membri.

Le seguenti direttive sono invece abrogate a partire dal 22, dicembre 2013:

- direttiva 78/65 9/CEE, sulla qualità delle acque dolci che richiedono protezione o miglioramento per essere idonee alla vita dei pesci;
- direttiva 79/923/CEE, relativa ai requisiti di qualità delle, acque destinate alla molluschicoltura;
- direttiva 89/68/CEE, concernente la protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento provocato da certe sostanze pericolose.

1.3.2. Il contesto normativo in Italia

Il quadro normativo sulle acque nel nostro territorio ha subito una costante evoluzione, a partire dalla legge 319/76, alla quale si deve il merito di aver posto un freno all'inquinamento senza controllo delle acque.

Hanno fatto seguito poi la legge 183/89, che ha affrontato il tema della difesa del suolo e dei bacini idrografici e quindi la legge 36/94, che si è occupata della gestione integrata delle risorse idriche. Fino poi ad arrivare al D.L.vo 152 del 11.5.1999 e s.m.i., il cui scopo è stato innanzitutto di rispondere all'urgenza di recepire le direttive comunitarie quali la 91/271/UE e la 91/676/UE, ma soprattutto di costituire una sorta di testo unico in materia ambientale e di tutela delle acque dall'inquinamento.

Infine è stato approvato il D.L.vo n 152/2006 di recepimento della Direttiva Quadro Europea (2000/60/CE).

La legge “Merli”

La legge 319/76, nota come “Merli” dal nome del primo firmatario, ha disciplinato per oltre un ventennio gli scarichi industriali, demandando alle Regioni la regolamentazione degli scarichi civili e delle fognature. Gli scopi di tale legge erano davvero esemplari: formulazione dei criteri generali per l'utilizzazione e lo scarico delle acque in materia di insediamenti; organizzazione dei pubblici servizi di acquedotto, fognatura e depurazione; redazione di un piano generale di risanamento delle acque; rilevamento delle caratteristiche qualitative e quantitative dei corpi idrici.

La legge assegnava allo Stato i compiti generali di indirizzo e coordinamento, in particolare l'emanazione di norme tecniche generali per la regolamentazione dell'installazione ed esercizio degli impianti di acquedotto, fognatura e depurazione e del metodo di smaltimento dei liquami e dei fanghi residui.

Alle Regioni erano attribuiti i compiti di redigere i piani regionali di risanamento delle acque, dirigere il sistema di controllo degli scarichi, eseguire il rilevamento delle caratteristiche dei corpi idrici, delimitare le zone per lo smaltimento dei liquami nel suolo e nel sottosuolo.

Le Province dovevano provvedere a effettuare il catasto di tutti gli scarichi, pubblici e privati, nei corsi d'acqua superficiali e controllare che fossero applicati i criteri per un

corretto e razionale uso della risorsa idrica.

I Comuni, infine, dovevano controllare gli scarichi circa il rispetto dei limiti di accettabilità e provvedere all'installazione e alla manutenzione dei dispositivi di controllo qualitativi dei corpi idrici.

La disciplina degli scarichi era basata, per tutto il territorio nazionale, su un'unica prescrizione per gli stessi, riferita a dei limiti di accettabilità previsti nelle tabelle A e C allegata alla legge. La misurazione degli scarichi doveva intendersi effettuata subito a valle del punto di immissione nei corpi idrici recettori. Questo metodo ha costituito fino al 1999 l'unico controllo da parte delle Autorità.

La legge 183/89

La legge n.183 del 1989 ha introdotto in Italia un concetto fondamentale: la pianificazione e la gestione integrata delle risorse idriche e del suolo alla scala del bacino idrografico. La legge è il risultato del disegno di legge attuato dalla Commissione De Marchi, nominata dal Parlamento italiano dopo le grandi alluvioni del 1966. Ciascun bacino idrografico è considerato come un ecosistema unitario e classificato in base al rispettivo rilievo: nazionale, interregionale e regionale.

Per i bacini di rilievo nazionale è prevista l'istituzione di un'Autorità di bacino, con funzioni di studio e progettazione e di tipo tecnico-amministrativo. La sua istituzione è prevista anche per i bacini minori, non classificati tra quelli di rilievo nazionale o interregionale, solo che in questo caso può essere costituita con riferimento all'intero territorio della Regione, mettendo assieme quindi più bacini imbriferi facenti parte dello stesso territorio. Le Autorità di bacino operano in maniera tale che i singoli piani di bacino siano coordinati con i programmi nazionali, regionali e sub-regionali di sviluppo economico e di uso del suolo.

I piani di bacino si pongono come strumenti flessibili della pianificazione globale, tali da garantire un uso e una gestione razionale delle risorse e una ben definita azione di tutela dell'ambiente, al cui interno tutte le componenti ecologiche, idrogeologiche, paesistiche e territoriali siano affrontate attraverso una logica unitaria di intervento.

Esso ha valore di piano territoriale di settore e rappresenta lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico mediante il quale sono pianificate e programmate sia le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, difesa e valorizzazione del suolo, sia la corretta

utilizzo delle acque sulla base delle caratteristiche fisiche e ambientali del territorio.

Le finalità che i Piani di bacino intendono perseguire sono:

- la sistemazione, la conservazione e il recupero del suolo con interventi idrogeologici, idraulici, idraulico-forestali, idraulico-agrari, silvo-pastorali, di forestazione, di bonifica, anche attraverso processi di recupero naturalistico, botanico e faunistico;
- la difesa, la sistemazione e la regolazione dei corsi d'acqua e delle zone umide;
- la moderazione delle piene, anche mediante l'impiego di serbatoi di invaso, vasche di laminazione, casse di espansione, scolmatori o altro, per la difesa dalle inondazioni e dagli allagamenti;
- la difesa e il consolidamento dei versanti e delle aree instabili;
- il contenimento dei fenomeni di subsidenza e di salinizzazione delle falde;
- il risanamento delle acque superficiali e sotterranee allo scopo di fermarne il degrado e la razionale utilizzazione delle risorse idriche, con un'efficiente rete idraulica, irrigua e idropotabile, garantendo che le derivazioni non siano pregiudicanti per il minimo deflusso vitale negli alvei;
- il riordino del vincolo idrogeologico e l'attività di prevenzione e di allerta.

Obiettivi e finalità della legge erano davvero esemplari e innovativi, la realtà è che solo nell'ultimo decennio si sta cercando di attuare tali propositi e iniziative con non poche difficoltà mediante i Piani stralcio di cui alla legge 189/98, nota come legge Sarno.

La legge "Galli"

La legge 36 del 1994, nota come legge Galli, ha introdotto importanti innovazioni nel quadro normativo nazionale in materia di risorse idriche. E' ribadito innanzitutto il concetto di pubblicità di tutte le acque superficiali e sotterranee, che costituiscono una risorsa da salvaguardare e utilizzare secondo criteri di solidarietà. L'uso delle risorse idriche è, quindi, vincolato al rispetto del diritto delle generazioni future a fruire di un integro patrimonio ambientale, al risparmio e al rinnovo. Un accento particolare viene posto sui concetti di:

- equilibrio del bilancio idrico, definito e aggiornato periodicamente dalle Autorità di bacino, tale che sia diretto ad assicurare un equilibrio tra le risorse e i fabbisogni;

- risparmio idrico, attraverso l'adozione di varie misure, quali il risanamento delle reti esistenti e l'installazione di contatori in ciascuna unità abitativa;
- riutilizzo delle acque reflue, da attuare mediante programmi per incentivare e agevolare le imprese che si dotino di impianti di riuso e di riciclo.

La stessa legge, oltre a stabilire i criteri generali di gestione, definisce anche i criteri di organizzazione delle strutture per la gestione delle acque, considerando in modo integrato l'intero ciclo dall'approvvigionamento alla depurazione.

Tale servizio idrico integrato è organizzato sulla base di Ambiti Territoriali Ottimali (ATO), delimitati nel rispetto dell'unità del bacino idrografico o del sub-bacino o dei bacini contigui, superando la frammentazione delle gestioni e consentendo adeguate dimensioni in termini di popolazione servita e di volumi distribuiti.

I Comuni e le Province devono provvedere alla scelta di una gestione del servizio che risponda a criteri di:

- efficienza, intesa come capacità a garantire la razionale utilizzazione delle risorse idriche e dei corpi ricettori, nonché di ottimizzare l'impiego delle risorse unitarie;
- efficacia, nel senso di capacità a garantire la qualità del servizio in accordo con la domanda della popolazione servita e le esigenze di tutela ambientale;
- economicità, ovvero la gestione deve essere finalizzata ad assicurare il massimo contenimento dei costi in relazione agli obiettivi prefissati.

Altro elemento innovativo della legge 36/94 è il metodo di determinazione della tariffa che costituisce il corrispettivo del servizio idrico.

Quest'ultima è determinata in funzione della qualità della risorsa idrica e del servizio fornito, delle opere e degli adeguamenti necessari, dell'entità dei costi di gestione delle opere, dell'adeguatezza della remunerazione del capitale investito e dei costi di gestione delle aree di salvaguardia.

Anche in questo caso, è solo da qualche anno che in Italia si sta cercando di organizzare il servizio idrico integrato, in modo tale che possa essere autonomo e funzionale per ciascun ambito territoriale.

Il Decreto Legislativo 152/99 e successive modifiche e integrazioni

Il decreto legislativo 152/99, recante le disposizioni per la tutela delle acque dall'inquinamento, sorge in un contesto legislativo alquanto intricato, il cui riordino in materia ambientale è legato principalmente a due questioni:

1. l'urgenza di recepire compiutamente le direttive comunitarie, in particolare la 91/271 relativa alle acque reflue urbane e la 91/676 relativa alla protezione dai nitrati provenienti dall'attività agricola;
2. la necessità di apportare elementi innovativi relativi alla protezione, al risanamento e all'uso corretto e razionale delle acque.

Attraverso il recepimento della direttiva 91/271 si definisce il sistema di regole e i tempi di adeguamento cui deve attenersi il sistema pubblico di depurazione. Le acque reflue, infatti, prima di essere scaricate, devono essere sottoposte a un trattamento depurativo che ne garantisca il mantenimento nei limiti stabiliti a livello europeo.

Il decreto legislativo n.152/99, in accordo con gli orientamenti comunitari, predispone una profonda revisione della politica di prevenzione, tutela e risanamento delle risorse idriche. L'attenzione dal singolo scarico è spostata all'insieme degli eventi che determinano l'inquinamento dell'intero corpo idrico recettore. Non è infatti sufficiente controllare che lo scarico rispetti i limiti stabiliti per l'emissione, ma bisogna garantire che l'insieme degli scarichi e delle altre attività non sia tale da pregiudicare la qualità del corpo idrico.

Sulla base delle attività conoscitive e degli standard di qualità ambientale stabiliti dallo Stato, le Regioni e le Province autonome devono classificare i corpi idrici e conseguentemente predisporre i Piani di Tutela attraverso:

- la definizione di nuovi limiti allo scarico, in termini sia di concentrazione sia di carico, necessari a perseguire gli obiettivi di qualità;
- la definizione di opere e interventi;
- la revisione delle autorizzazioni allo scarico e delle concessioni di derivazione.

L'obiettivo di *qualità ambientale* esprime un concetto più ampio rispetto a quello finora interpretato dalla legislazione esistente in materia ambientale e di tutela delle acque dall'inquinamento. Esso è riferito all'intero ecosistema acquatico; esprime cioè lo stato del corpo idrico in funzione della capacità di mantenere e di supportare comunità animali e vegetali il più possibile vicino alla condizione naturale.

Quest'ultima è definita come quella condizione in cui non appaiono significative modificazioni dell'ecosistema prodotte dall'attività umana e in cui il sistema mantiene intatte le sue capacità di risposta e autodifesa dalle perturbazioni prodotte da tale attività, grazie ai processi naturali di autodepurazione.

Lo stato di qualità ambientale dei corpi idrici superficiali è definito in funzione di uno *stato ecologico*, che ne rappresenta l'espressione del funzionamento degli ecosistemi acquatici, e di uno *stato chimico*, stabilito in base alla presenza dei principali inquinanti pericolosi, inorganici e di sintesi.

Il Piano di Tutela è lo strumento programmatico dell'Ente di salvaguardia, ovvero la Regione, per il raggiungimento e il mantenimento degli obiettivi di qualità. In particolare con i Piani di Tutela devono essere adottate le misure per raggiungere lo stato ambientale "buono" entro il 31 dicembre 2016 in ogni corpo idrico significativo.

Si definisce corpo idrico significativo ogni corso d'acqua che recapiti direttamente in mare e che abbia un bacino di 200 km², o anche che sfoci in un altro emissario, ma che abbia un bacino imbrifero di almeno 400 km². In entrambi i casi la portata di deflusso non deve essere nulla per più di 120 giorni in un anno solare medio.

Per stato ambientale "buono", invece, si intende quello stato in cui i valori degli elementi della qualità biologica mostrano bassi livelli di alterazione derivanti dall'attività umana e si discostano leggermente da quelli normalmente associati allo stesso ecotipo in condizioni non disturbate. Inoltre, la presenza di microinquinanti è in concentrazioni tali da non comportare effetti a breve e lungo termine sulle comunità biologiche associate al corpo idrico di riferimento.

Fra i diversi allegati che accompagnano il decreto, l'Allegato 1 ha un significato predominante in quanto introduce importanti novità.

In primo luogo gli standard qualitativi per tutti i corpi idrici, che saranno di riferimento per la definizione dei nuovi limiti di scarico. In secondo luogo perché la definizione degli obiettivi di qualità avrà ricadute positive in quanto sarà necessario ridefinire gli interventi e la destinazione delle risorse finanziarie seguendo una logica per obiettivi proposti.

Riferendoci in particolare ai *corpi idrici superficiali*, lo stato ambientale è definito in base al suo stato chimico ed ecologico. La valutazione dello stato chimico è effettuata sulla base della presenza, oltre un determinato valore soglia, di sostanze pericolose. Un primo elenco di queste sostanze è fatto in base a quanto indicato nelle vigenti direttive comunitarie

relative alle acque destinate alla vita dei pesci e alle sostanze pericolose (78/659/CEE e 76/464/CEE).

Lo stato ecologico, invece, rappresenta l'espressione della complessità degli ecosistemi acquatici e della natura chimica e fisica delle acque e dei sedimenti.

Gli indicatori biologici rappresentano un metodo per definire lo stato di conservazione di un ambiente e per valutare in maniera sintetica l'impatto antropico caratteristico del medesimo. Questo perché le comunità animali e vegetali modificano la loro struttura in funzione degli stress ambientali cui sono sottoposte. Nel caso delle acque correnti gli organismi più utili per il rilevamento delle condizioni di salute del corso d'acqua sono gli invertebrati bentonici, in quanto rispondono a modificazioni ambientali secondo precisi schemi. Seguendo questi schemi è possibile definire la qualità biologica di un corso d'acqua mediante valori numerici convenzionali rappresentati dagli indici biotici.

Il D.L.vo 152/06 - "Codice dell'ambiente"

L'ultimo intervento normativo del Legislatore Italiano sul tema della qualità delle acque superficiali è rappresentato dal D.L.vo 152/06, altrimenti detto "Codice dell'Ambiente", nella parte terza (art. 53-176).

Il testo normativo ricalca gran parte del precedente D.L.vo 152/99, soprattutto nelle sezioni riguardanti le definizioni e le metodologie di classificazione delle acque, contenute negli allegati alla parte III del Codice.

Nell'allegato 1 "Monitoraggio e classificazione delle acque in funzione degli obiettivi di qualità ambientale", vengono definiti i criteri per individuare i corpi idrici significativi e per stabilire lo stato di qualità ambientale di ciascuno di essi.

In particolare nel Paragrafo 2 "Modalità per la classificazione dello stato di qualità dei corpi idrici" vengono definiti gli elementi qualitativi e le definizioni normative per la definizione dello stato ecologico.

Per quanto riguarda la definizione degli elementi qualitativi, nei fiumi sono individuati:

- Elementi biologici;
- Elementi idromorfologici a sostegno degli elementi biologici;
- Elementi chimici e fisico-chimici a sostegno degli elementi biologici.

Per quanto riguarda la classificazione normativa dello stato ecologico viene riportata una prima tabella generale per tutte le tipologie di acque, nella quale vengono definiti quattro stati ecologici: elevato, buono, sufficiente, scarso o cattivo.

In seguito vengono riportate altre tabelle in cui sono definiti lo stato ecologico elevato, buono e sufficiente nei fiumi, in riferimento agli elementi di qualità biologica, idromorfologica e fisico-chimica.

Per quanto riguarda gli elementi di qualità biologica sono presi in considerazione:

1. Fitoplancton;
2. Macrofite e fintobentos;
3. Maroinvertebrati bentonici;
4. Fauna ittica;

Per quanto riguarda gli elementi di qualità idromorfologica sono presi in considerazione:

1. Regime idrologico;
2. Continuità del fiume;
3. Condizioni morfologiche.

Per quanto riguarda gli elementi di qualità fisico-chimica, sono presi in considerazione:

1. Condizioni generali;
2. Inquinanti sintetici specifici;
3. Inquinanti non sintetici specifici;

Proseguendo nell'Allegato viene definito lo Stato Chimico (A.2.6), definito come la media aritmetica annuale delle concentrazioni di sostanze pericolose nelle acque superficiali.

Nelle tabelle 1/A e 1/B sono riportati i valori soglia, sulla base della decisione 2455/2001 CE, per i parametri di base e gli inquinanti specifici aggiuntivi.

Nella tabella 1/A si riporta il Numero CAS, l'identificativo dell'elemento, la concentrazione soglia e il metodo per la determinazione degli analiti per:

1. Gli inquinanti inorganici;
2. Idrocarburi policiclici Aromatici;
3. Idrocarburi Aromatici;
4. Idrocarburi Aromatici alogenati;
5. Idrocarburi alifatici clorurati;
6. Prodotti fitosanitari e biocidi;
7. Composti organici semivolatili.

1.3.3. Recepimento della normativa nazionale dalla Regione Calabria: la legge regionale 10/97

La Regione Calabria ha recepito le norme dettate dalla L. 36/94 con la Legge regionale 3 ottobre 1997 n.10 “Norme in materia di valorizzazione e razionale utilizzazione delle risorse idriche e di tutela delle acque dall’inquinamento. Delimitazione degli ambiti territoriali ottimali per la gestione del servizio idrico integrato”.

Questa legge disciplina le funzioni amministrative in materia di tutela delle acque dall’inquinamento e di valorizzazione delle risorse idriche, regola le modalità per lo scarico nei corpi idrici ricettori, sul suolo e negli strati superficiali del suolo. Inoltre, delimita gli A.T.O. e organizza il servizio idrico integrato affidandone ciascuno a un unico gestore adottando la convenzione tipo e il relativo disciplinare come previsto nella L.36/94. La legge regionale prevede l’aggiornamento del Piano regionale di risanamento delle acque, risalente al 1982, e del Piano Regolatore Generale degli Acquedotti, concernente le risorse idriche fino a soddisfare esigenze e bisogni del territorio regionale.

Si prevede, inoltre, l’istituzione dell’*Osservatorio permanente dei corpi idrici regionali*, costituito da un centro regionale di raccolta ed elaborazione dati collegato ai vari ambiti territoriali, avente lo scopo di monitorare la qualità delle acque superficiali e sotterranee, le portate dei corpi idrici e i parametri che agiscono sul regime di deflusso degli stessi.

Per la Calabria, la Regione ha delimitato cinque A.T.O., coincidenti con le cinque province: allo stato attuale in nessuno di essi è ancora stata avviata la gestione del servizio idrico integrato da parte del gestore unico. Molto è avvenuto in questi ultimi anni, in cui sono state funzionalmente allestite le segreterie tecniche dei singoli ambiti territoriali.

2. IL PROCESSO DI RIOSSIGENAZIONE NELLE CORRENTI LIQUIDE: STATO DELL'ARTE DEGLI STUDI

INTRODUZIONE

Un lavoro di ricerca che possa apportare un contributo significativo alla conoscenza non può prescindere dallo studio attento e quanto più possibile esaustivo dello stato dell'arte, degli strumenti teorici e interpretativi utilizzati.

In questo capitolo ci si propone di descrivere lo stato dell'arte e gli strumenti teorici utilizzati per la ricerca inerente il fenomeno in questione, lasciando al successivo capitolo 4 la descrizione approfondita degli strumenti interpretativi.

Gli studi sistematici sull'impatto dell'inquinamento organico sui corpi idrici hanno avuto inizio nel 1925, allorquando Streeter & Phelps pubblicarono il celebre articolo "*A study for the pollution and natural purification of the Ohio River, III. Factor concerning the phenomena of oxidation and reaeration*".

Da allora, l'interesse dei ricercatori si è differenziato in due filoni distinti: da un lato un filone più prettamente "sanitario", legato al processo deossigenativo e dipendente fortemente dalla tipologia di inquinante immesso, dall'altro un filone più propriamente "idraulico", legato alla dipendenza del coefficiente di riossigenazione dalle caratteristiche idrodinamiche del corpo idrico ricettore.

Lo studio dei problemi ambientali, comunque, non può prescindere da un approccio multidisciplinare, non essendo sufficiente, per una completa comprensione del fenomeno, la conoscenza approfondita di una sola disciplina, in questo caso l'idraulica, ma sono necessarie anche conoscenze di base di chimica, fisica e biologia, tipiche dei processi ambientali.

Concentrando l'attenzione, però, sull'argomento trattato in questo lavoro di ricerca, riguardante i processi riossigenativi nelle corrente liquide, lo studio dei contributi all'argomento ha permesso di evidenziare l'esistenza di circa 130 - numero approssimato per difetto - formule di predizione del coefficiente di riossigenazione, definito in seguito in modo esaustivo, in funzione delle caratteristiche idrauliche della corrente.

Le varie formulazioni del problema hanno seguito approcci diversi, dipendenti dalle scelte di indirizzo di studio dei vari autori.

Dal punto di vista prettamente teorico, i metodi concettuali, basati sulla descrizione dei fenomeni che regolano il processo di aerazione dell'acqua, riescono a interpretare in modo corretto il trasferimento di ossigeno nell'acqua, ma hanno il forte limite di introdurre grandezze fisiche di difficile quantificazione.

D'altro canto, l'approccio basato sui risultati sperimentali in campo o in laboratorio può soffrire della ridotta possibilità di generalizzare i risultati al di fuori del contesto di studio.

L'evolversi della tecnologia, in particolare informatica, ha permesso negli ultimi anni di approfondire gli studi sulla turbolenza, fenomeno che sta alla base dei processi di mescolamento nei corsi d'acqua, permettendo di rendere l'approccio concettuale sempre più abordabile.

Allo stato attuale, però, si è ancora lontani dalla possibilità di interpretare correttamente il fenomeno oggetto di studio con modelli concettuali, motivo per il quale si sta diffondendo all'interno della comunità scientifica la consapevolezza che gli studi a sfondo sperimentale possano restituire risultati più soddisfacenti per le applicazioni e permettere di avere una larga base di dati da mettere a disposizione degli studi teorici per verificare la correttezza delle teorie.

Nel prosieguo del presente capitolo, dopo un breve cenno sulla teoria della turbolenza, saranno trattati in modo adeguato sia le basi teoriche del processo di trasferimento di ossigeno dall'aria all'acqua, sia le indagini sperimentali meglio documentate in letteratura, sia le formulazioni predittive più conosciute del coefficiente di riossigenazione.

2.1. TEORIA DELLA TURBOLENZA: CENNI

Il moto dell'acqua nei corsi d'acqua naturali è fortemente influenzato dalla geometria dell'alveo e dalla scabrezza di parete. Nella quasi totalità dei casi si presenta sotto forma di moto turbolento, in cui masse fluide si mescolano in senso longitudinale e trasversale, determinando importanti trasferimenti di massa ed energia.

I primi studi scientificamente basati sui moti turbolenti furono condotti alla fine del 1800 da O. Reynolds, con i celebri esperimenti condotti su tubazioni trasparenti.

Il regime di moto turbolento per sua natura è caratterizzato dalla preponderanza delle forze gravitazionali sulle forze viscosi e diventa stabile quando si oltrepassa un valore critico del numero di Reynolds; in questo caso, ogni perturbazione che agisce sul sistema ne provoca un'instabilità che viene esaltata dalle forze gravitazionali e non sufficientemente frenata da quelle viscosi.

Una prima spiegazione intuitiva (Ghetti, 1980) di ciò che avviene può essere data considerando un fluido perfetto in moto, con due correnti che viaggiano in senso opposto (Figura 10).

In condizioni di assoluta assenza di perturbazioni, le due correnti viaggeranno come nel caso *a*.

Nel momento in cui una perturbazione turba l'equilibrio, le linee di corrente subiscono deformazioni che comportano variazioni locali di velocità e quindi, per il teorema di Bernoulli, di pressione che tendono a instabilizzare il moto. In questa situazione le forze gravitazionali tendono a esaltare le perturbazioni, mentre le forze viscosi a frenarle, quindi in base alla preponderanza delle une o delle altre si determinerà esaltazione o riduzione del fenomeno ondoso.

Si supponga di trovarsi in condizioni di alti numeri di Reynolds, ovvero di preponderanza delle forze gravitazionali su quelle viscosi: l'ondulazione iniziale (caso b) verrà esaltata e col procedere del tempo ci si troverà nelle condizioni del caso c, fin quando le velocità locali delle creste supereranno la velocità propria di avanzamento del moto ondoso, determinando la rottura della forma dell'onda e quindi il frangimento, generando una zona di discontinuità dalla quale si svilupperanno una serie di vortici (caso d).

Per fluidi reali questa brusca discontinuità in una corrente fluida non è ammissibile, in quanto localmente si genererebbero valori infiniti di sforzo tangenziale. E' vero, però, che quanto più aumentano i gradienti di velocità in senso verticale, tanto più la condizione reale si avvicinerà a quella ideale. La tendenza all'instabilità aumenta, quindi, con l'aumentare del gradiente di velocità; a favore dell'instabilità, inoltre, giocherà la densità del fluido mentre si opporrà a questa la viscosità.

Questo approccio è stato proposto da Rouse nel 1945 (Ghetti, 1980), il quale ha raggruppato i termini di densità ρ , gradiente di velocità $\frac{dv}{dy}$ e viscosità μ in un numero

adimensionale $\chi = \frac{\rho \cdot \frac{dv}{dy} \cdot y^2}{\mu}$, noto come coefficiente di instabilità.

La presenza della turbolenza, quindi, determina condizioni di moto che continuamente variano in modo casuale nello spazio e nel tempo, per cui a rigore il moto è sempre vario.

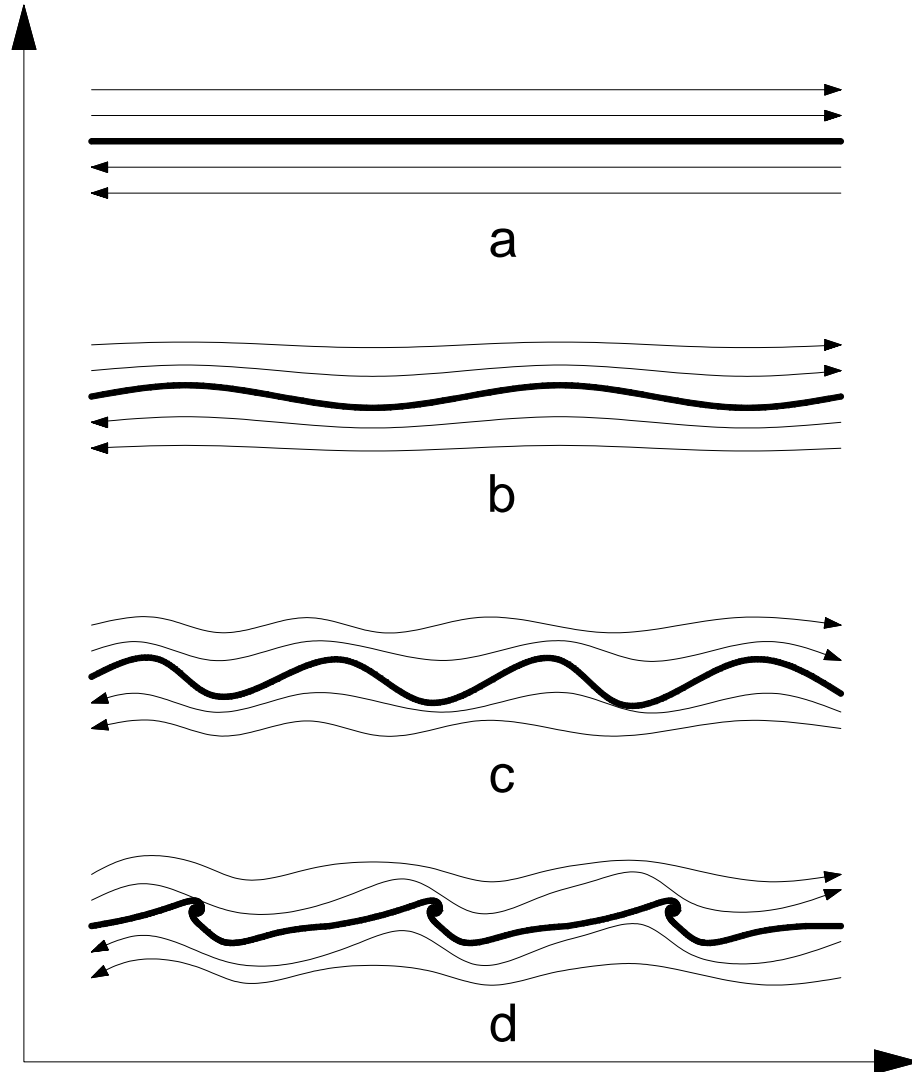


Figura 10: Evoluzione della turbolenza per fluido perfetto (Ghetti, 1980)

Se si seguisse la traiettoria di una particella si noterebbero spostamenti in tutte e tre le direzioni fondamentali della terna cartesiana, senza una logica apparente. Scomponendo, però, il moto nelle tre direzioni, facendo riferimento alla velocità istantanea di una particella, è possibile riconoscere le tre componenti fondamentali (Figura 11):

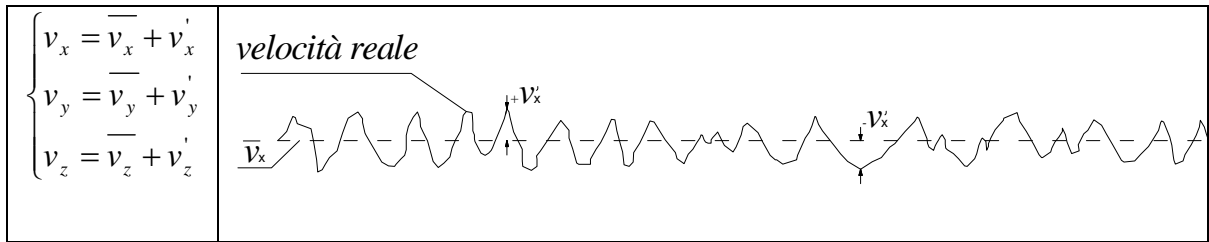


Figura 11: Andamento reale della velocità delle particelle lungo una direzione

Le componenti di velocità saranno somma di una componente media ($\overline{v_x}$) e di una componente pulsante o fluttuante (v'_x); la componente media è definita come

$$\overline{v_x} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^T v_x dt, \text{ dove } \Delta t \text{ è un intervallo di tempo sufficientemente lungo; allo stesso modo}$$

deve valere che nel medesimo intervallo di tempo sia: $v'_x = \frac{1}{\Delta t} \int_0^T v'_x dt = 0$.

La presenza di queste pulsazioni di velocità, per effetto degli urti fra le particelle liquide, determinerà delle dissipazioni di energia, note come sforzi addizionali (o di Reynolds); l'aggettivo addizionali si riferisce al fatto che gli sforzi normali sono quelli dovuti alla viscosità.

Si consideri, ora, il moto di una particella su un piano, intendendosi uguale trattazione nel caso del piano perpendicolare (Figura 12).

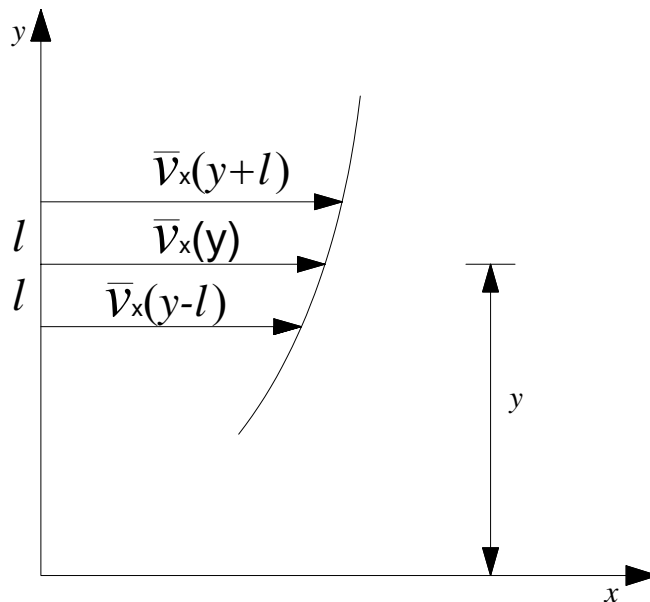


Figura 12: Fluttuazioni di velocità sulla verticale

Per effetto dei moti turbolenti lungo la direzione y , ogni particella tenderà a fluttuare attorno alla direzione di equilibrio (rappresentata in figura dal vettore $\overline{v_x}(y)$) spostandosi fra la posizione $(y+l) - (y-l)$, in cui l è definita lunghezza di mescolamento (*Prandtl*).

La lunghezza di mescolamento dipenderà dall'entità delle pulsazioni e dalla distanza dalle pareti in cui è confinato il fluido. Gli esperimenti condotti da Nikuradse, nel 1932, hanno dimostrato che quando la turbolenza è pienamente sviluppata, fino a una certa distanza dalla parete, l'andamento lungo l è rettilineo e proporzionale a y secondo la relazione $l=ky$; oltre, assume un andamento logaritmico.

La zona in cui la lunghezza l ha andamento lineare è definita sottostrato limite viscoso e il

suo spessore vale $\delta = 11.5 \frac{U}{u^*}$ dove si è indicato con $U [LT^{-1}]$ la velocità media della corrente e con $u^*[LT^{-1}]$ la velocità d'attrito definita come

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R_H \cdot j_E}{\rho}} = \sqrt{g \cdot R_H \cdot j_E} \text{ dove } R_H [L] \text{ è il raggio idraulico della corrente e } j_E$$

[-] la pendenza della linea dell'energia.

Questo approccio permette di definire meglio il significato della scabrezza di parete: quando, infatti, la velocità d'attrito cresce, il valore di $\delta [L]$ decresce, ovvero il sottostrato limite laminare tende a assottigliarsi. Quando la scabrezza di parete supera il sottostrato limite viscoso si determina la rottura dello stesso e la scabrezza stessa inizia ad essere preponderante nell'influenzare il moto.

La quantificazione di quanto detto è stata definita da Nikuradse, il quale ha condotto esperimenti su tubi rendendo la parete artificialmente scabra con sabbia a granulometria

costante, di spessore e_s via via variabile. Egli ha dimostrato che quando $\frac{e_s}{\delta} > (15 \div 25)$ gli

effetti sul moto dipendono unicamente dalla scabrezza e non più anche dalla viscosità.

Lo spessore uniforme dei granelli di sabbia è chiaramente un caso limite non applicabile ai casi reali, nel senso che non è possibile definire, per le scabrezze naturali, lo spessore delle asperità come se fossero omogenee; si è, così, convenuto che ogni scabrezza naturale si può ricondurre a un'equivalente scabrezza in sabbia che comporti le medesime condizioni di moto lungo la parete. Pertanto, a ogni natura di parete può convenzionalmente applicarsi una corrispondente misura ε , detta "scabrezza equivalente in sabbia" che non riflette una particolare proprietà geometrica ma solo un comportamento statistico della scabrezza

naturale, ovvero determina sul moto gli stessi effetti che avrebbe una equivalente scabrezza in sabbia omogenea.

2.1.1. Le scale del moto turbolento e i trasferimenti di energia

Come prima si accennava, una delle principali caratteristiche dei moti turbolenti è rappresentato dalla capacità di trasportare e diffondere quantità di moto, energia e quant altro, compreso calore e sostanze disciolte (anche inquinanti). Questo aspetto è particolarmente importante nel campo dell'idraulica ambientale e nei fenomeni che si è inteso studiare in questo lavoro di ricerca. Gli ordini di grandezza dei trasferimenti per opera della turbolenza sono notevolmente superiori a quelli che avvengono per opera della semplice diffusione molecolare.

Considerando uno spazio finito dalla dimensione caratteristica L [L] e un fluido caratterizzato da un valore di diffusività molecolare D_m [L^2T^{-1}], il tempo caratteristico T_m [T] affinché si completi il processo di diffusione molecolare (per esempio del calore in una stanza o di un inquinante in un corso d'acqua) sarà $T_m = \frac{L^2}{D_m}$. Per qualunque processo in

cui è presente la turbolenza, però, il tempo caratteristico di trasferimento T_t sarà dato dal rapporto fra la dimensione caratteristica dello spazio e la velocità del fluido, ovvero

$$T_t = \frac{L}{U}.$$

Il rapporto fra i tempi $\frac{T_m}{T_t} = \frac{U \cdot L}{D_m}$ è chiamato Numero di Peclet (Pe) e rappresenta il grado

di turbolenza di un fluido che si muove all'interno di uno spazio.

I moti turbolenti presentano una caratteristica fondamentale: la coesistenza di due diverse scale spaziali statisticamente indipendenti ma energeticamente correlate. Si possono, infatti, individuare moti a piccola scala, in cui domina la viscosità e moti a grande scala dove, per turbolenza pienamente sviluppata, dominano le forze gravitazionali.

I moti fluttuanti a piccola scala sono rappresentati nelle equazioni del moto dai termini non lineari (convettivi) che interagiscono proprio con i termini viscosi dominati dal numero di Reynolds, Re .

Quando cresce Re inizia ad essere trascurabile il contributo dei termini viscosi, ovvero le dissipazioni di energia ad opera della viscosità sono trascurabili e la dimensione caratteristica del moto è grande (si è in presenza di moti a grande scala). Il flusso di moto, d'altra parte, genera, a sua volta, moti a scala sempre più ridotta, i quali risentono degli effetti dissipativi dovuti alla viscosità che, in questo modo, non può essere più trascurata. Quest'analisi, comunque, è significativa nei fenomeni di trasporto e non già nella definizione del moto di un fluido, per quanto dimostrato dalle esperienze di Nikuradse. Il tempo caratteristico con il quale i moti a grande scala trasferiscono energia ai moti a piccola scala è dato dal rapporto fra la dimensione spaziale caratteristica L e la velocità caratteristica U . L'energia cinetica dei moti a grande scala vale $E_C = \frac{U^2}{2}$ e, quindi, la

potenza fornita ai moti a piccola scala vale $\frac{E_C}{T_t} = \frac{U^3}{2L}$. Questa potenza dovrà eguagliare

l'energia dissipata per effetto della viscosità per unità di volume e tempo e_{ps} . Vale, allora,

la relazione di proporzionalità $e_{ps} \approx \frac{U^3}{2L}$.

Questa relazione esprime il fatto che la dissipazione viscosa può essere stimata dalla dinamica a grande scala e la perdita di energia all'interno del tempo caratteristico $T_t = \frac{L}{U}$ non è dovuta direttamente dalla viscosità, bensì è una frazione significativa di energia trasferita ai moti a piccola scala che a loro volta la perdono per viscosità.

Il tempo affinché il moto a grande scala dissipi energia direttamente per effetto della viscosità è molto grande e si può ricavare dal rapporto fra il quadrato della lunghezza

caratteristica e la diffusività molecolare: $T_m = \frac{L^2}{D_m}$.

La quantità di energia dissipata vale $\frac{\nu U^2}{L^2} \frac{1}{2} = \frac{\nu U^3}{UL} \frac{1}{2L} = \frac{e_{ps}}{Re}$ e questo indica che per $Re \gg 1$

la quantità di energia dissipata nei moti a grande scala per unità di tempo e di massa è molto minore di quella dissipata nei moti a piccola scala.

Una stima dell'ordine di grandezza delle scale spaziali e temporali dei moti a piccola scala, responsabili principali delle perdite di energia per viscosità, è dato dalle microscale di Kolmogorov:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \left(\frac{v}{e_{ps}} \right)^{1/4} \\ \tau = \left(\frac{v}{e_{ps}} \right)^{1/2} \end{array} \right. \quad (30)$$

Facendo il rapporto fra η e τ , è possibile avere una stima delle velocità dei moti a piccola scala $u = (ve_{ps})^{1/4}$

Mettendo in relazione le quantità caratteristiche dei moti a piccola e grande scala, si rileva come il numero di Reynolds sia il parametro fondamentale di riferimento e che, all'aumentare dello stesso, aumenta l'indipendenza statistica fra le due scale del moto:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\eta}{L} = \left(\frac{v}{UL} \right)^{3/4} = Re^{-3/4} \\ \frac{\tau}{T_m} = \left(\frac{v}{UL} \right)^{1/2} = Re^{-1/2} \\ \frac{u}{U} = \left(\frac{v}{UL} \right)^{1/4} = Re^{-1/4} \end{array} \right. \quad (31)$$

La differenza fra due moti turbolenti, caratterizzati dalla medesima scala spaziale L ma da differenti numeri di Reynolds, consiste nel fatto che a Re più basso corrisponde un moto a piccola scala con scala spaziale maggiore di quella relativa al moto caratterizzato da un più elevato numero di Reynolds. Infine, poiché la vorticità ha le dimensioni dell'inverso di un tempo, è possibile caratterizzare l'intensità di un vortice con una ben specifica frequenza caratteristica: i vortici associati alle piccole scale spaziali e temporali sono caratterizzati da elevate frequenze caratteristiche, viceversa i vortici associati alle grandi scale spazio-temporali sono caratterizzati da basse frequenze caratteristiche.

L'energia cinetica del moto a grande scala è molto maggiore di quella del moto a piccola scala: elevando, infatti, al quadrato la terza delle precedenti relazioni si ottiene:

$$\frac{u^2}{U^2} = \left(\frac{v}{UL} \right)^{1/2} = Re^{-1/2}. \quad (32)$$

Ciò equivale a dire che nei moti turbolenti la maggior parte dell'energia cinetica è associata ai moti a grande scala, mentre la maggior parte della vorticità ai moti a piccola scala.

Le brevi note qui richiamate non hanno la pretesa di essere esaustive della complessità del fenomeno della turbolenza, peraltro ancora lontano da una completa comprensione, per difficoltà di ordine sia numerico sia sperimentale. Si è cercato di esprimere in modo semplice le più significative definizioni e specifici concetti che risulteranno importanti nel prosieguo del presente lavoro.

2.2. IL TRASFERIMENTO DI OSSIGENO DALL'ARIA ALL'ACQUA

La vita delle specie animali all'interno dei corsi d'acqua dipende, in maniera determinante, dal contenuto di ossigeno disciolto contenuta al suo interno.

L'ossigeno è scarsamente solubile in acqua ed esiste una concentrazione tipica, nota come concentrazione a saturazione, che dipende principalmente da tre parametri: temperatura, pressione atmosferica e concentrazione di solidi sospesi. Per definizione la concentrazione di ossigeno si definisce di saturazione quando il flusso entrante è in equilibrio con il flusso uscente dal volume liquido. A 1 atm di pressione, la solubilità dell'ossigeno in acqua assume dei valori contenuti in un range che va da 14,6 mg/l a 0°C fino a 6,4 mg/l a 40°C. Una concentrazione dei solidi disciolti con una salinità del 36% riduce la concentrazione a saturazione a 11,4 mg/l a 0°C e 5,3 mg/l a 40°C.

La bassa solubilità dell'ossigeno in acqua è un fattore primario che rende necessario il trattamento delle acque di scarico prima che esse siano recapitate nel fiume.

La relazione che permette di determinare la condizione di equilibrio all'interfaccia liquida tra le molecole di ossigeno che entrano in soluzione e quelle disciolte che, invece, tendono a passare allo stato gassoso è nota come legge di Henry, che si esprime come segue:

$$H_e = \frac{p_g}{c_l} \quad (33)$$

con c_l concentrazione del gas nel mezzo liquido [mole/L³], p_g pressione parziale dei gas [ML⁻¹T⁻²] e H_e costante di Henry [MT⁻²L²/mole].

La legge di Henry stabilisce che, all'equilibrio, la concentrazione del gas nel liquido assume un valore costante, noto come concentrazione a saturazione, che dipende dalla temperatura del mezzo, dalla temperatura esterna e dalla salinità.

La concentrazione a saturazione C_{sat} in acqua dolce o salata può essere approssimata attraverso la seguente relazione (APHA, 1992 in Chapra, 1997):

$$\ln C_{sat} = -139.34411 + \frac{1.575701 \cdot 10^5}{T_a} - \frac{6.642308 \cdot 10^7}{T_a^2} + \frac{1.243800 \cdot 10^{10}}{T_a^3} - \frac{8.621949 \cdot 10^{11}}{T_a^4} + Sal \left(-0.017674 + \frac{10.754}{T_a} + \frac{2140.7}{T_a^2} \right) \quad (34)$$

in cui C_{sat} è espresso in mg/l, T_a è la temperatura assoluta espressa in gradi kelvin (K) e Sal è la salinità, direttamente proporzionale ai cloruri o alla concentrazione di cloro, espressa in parti per mille.

Questa legge è di validità generale per tutti i mezzi e, in particolare, vale quando ci si trova in condizioni di acqua ferma. Nel caso di acqua in movimento le condizioni di saturazione cambiano, a causa, in particolare, delle fluttuazioni turbolente delle particelle d'acqua che variano le condizioni al contorno del fenomeno.

La presenza dell'ossigeno disciolto determina le condizioni per cui i processi di degradazione si sviluppano in condizioni aerobiche (con ossigeno) o anaerobiche (senza ossigeno). Nei processi aerobici l'ossigeno viene usato per ossidare la sostanza organica e produrre altri composti relativamente innocui ai fini ambientali. Nei processi anaerobici la sostanza viene degradata senza ossigeno attraverso processi più lenti, sviluppando prodotti a volte sgradevoli come solfuro di idrogeno e metano.

Le condizioni critiche per il deficit d'ossigeno disciolto hanno luogo tipicamente negli ultimi mesi estivi, quando la temperatura è molto alta, la concentrazione a saturazione è bassa, i processi biologici si intensificano e il moto del fiume può avvenire in corrente lenta.

I processi che influenzano la quantità di ossigeno, sia in termini di produzione sia in termini di rimozione dello stesso dall'acqua, sono riportati nella seguente Tabella 1.

<i>Produzione di ossigeno</i>
<i>Riossigenazione attraverso la superficie di interscambio area-acqua</i>
<i>Fotosintesi operata dalle piante</i>
<i>Rimozione di ossigeno</i>
<i>BOD (O₂ necessario ai batteri per ossidare biologicamente la sostanza organica)</i>
<i>NOD (O₂ necessario ai batteri per ossidare la sostanza azotata in nitriti e nitrati)</i>
<i>Respirazione delle piante e degli animali</i>
<i>Consumo di O₂ nei sedimenti</i>

Tabella 1: Produzione e rimozione di ossigeno

Se la domanda di ossigeno eccede rispetto alla quantità prodotta, si instaurano all'interno del corso d'acqua condizioni anaerobiche che possono causare la moria dei pesci e sviluppare la produzione di metano e altri gas nocivi. Se la domanda di ossigeno è nulla, l'acqua tende naturalmente alla condizione di saturazione attraverso gli scambi con l'atmosfera. Quando i contributi di produzione e rimozione dell'ossigeno si equivalgono, si raggiungono condizioni di equilibrio con valori più bassi di quelli di saturazione.

Il meccanismo fisico di ingresso di ossigeno nell'acqua può essere schematizzato come segue.

Si consideri una molecola d'ossigeno al di sopra dell'interfaccia aria-acqua; nel momento in cui essa entra in contatto con la superficie libera dovrà vincere una resistenza dovuta alla presenza dei legami molecolari che determinano uno stato di tensione sulla superficie medesima (tensione superficiale); una volta vinta questa resistenza le molecole di gas dovranno vincere i legami intermolecolari che si manifestano fra le molecole del fluido e ne limitano la deformazione (viscosità), le forze di attrazione deboli fra le molecole di gas e di acqua che ne limitano la diffusione e, infine, la densità stessa del fluido.

Entrando nel dettaglio della descrizione, un approccio semplice è dovuto a Lewis e Whitman (Chapra, 1997) che nel 1924 elaborarono la teoria del doppio film, valida a rigore per acque ferme. Facendo riferimento alla Figura 13 il trasferimento di ossigeno all'acqua avviene in una ristretta zona nell'intorno della superficie di contatto o di interfaccia.

La zona d'interfaccia è caratterizzata dalla presenza di quattro regioni, due per l'ossigeno e due per l'acqua.

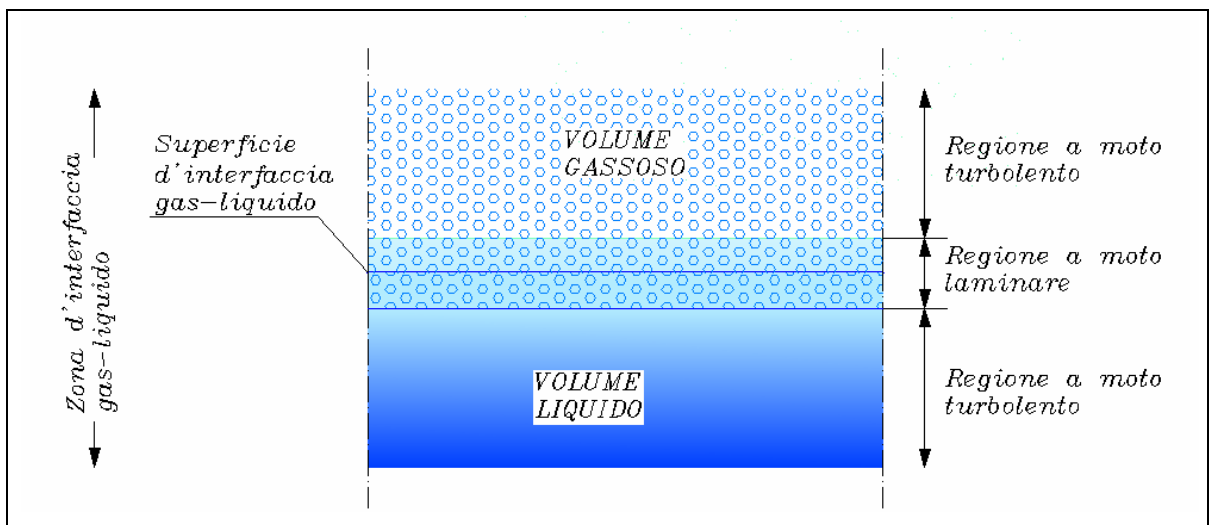


Figura 13: Schematizzazione del doppio film

- Regione a moto turbolento, all'interno del volume gassoso.
- Regione a moto laminare, all'interno del volume gassoso di spessore δ_g .
- Regione a moto laminare, all'interno del volume liquido di spessore δ_l .
- Regione a moto turbolento, all'interno del volume liquido.

Le regioni caratterizzate dal moto laminare, in realtà, sono caratterizzate anche dalla coesistenza delle due fasi, in percentuali diverse, per cui la superficie di interfaccia, in realtà, è un'ulteriore schematizzazione utile per una migliore comprensione del fenomeno. Le concentrazioni di ossigeno nelle due fasi sono correlate a mezzo delle leggi di equilibrio termodinamico e la resistenza al trasferimento concentrata all'interno delle regioni a moto laminare.

Nel caso di gas, come l'ossigeno, poco solubili in acqua, la resistenza alla diffusione è concentrata, in modo particolare, all'interno del film liquido.

In generale, con riferimento alla Figura 14, si può ritenere che i flussi di materia che attraversano la zona di interfaccia siano funzione di:

- k_g [MT^{-1}]: coefficiente di trasferimento di materia relativo alla fase gassosa;
- P_O [$ML^{-1}T^{-2}$]: pressione parziale dell'ossigeno all'interno del volume gassoso;
- P_{O_i} [$ML^{-1}T^{-2}$]: pressione parziale dell'ossigeno nella regione a moto laminare all'interno del volume gassoso;
- k_l [MT^{-1}]: coefficiente di trasferimento di materia relativo alla fase liquida;
- C_O [ML^{-3}]: concentrazione di ossigeno all'interno del volume liquido;
- C_{O_i} [ML^{-3}]: concentrazione di ossigeno nella regione a moto laminare all'interno del volume liquido.

Le equazioni che esprimono il flusso di materia nelle due zone sono scritte come segue:

$$J_{O,g} = k_g \cdot (P_O - P_{O_i}) \quad (35)$$

per la fase gassosa;

$$J_{O,l} = k_l \cdot (C_{O_i} - C_O) \quad (36)$$

per la fase liquida.

In condizioni stazionarie i due flussi si equivalgono, per cui $J_{O,g}=J_{O,l}$, ovvero:

$$k_g \cdot (P_O - P_{O_i}) = k_l \cdot (C_{O_i} - C_O) \quad (37)$$

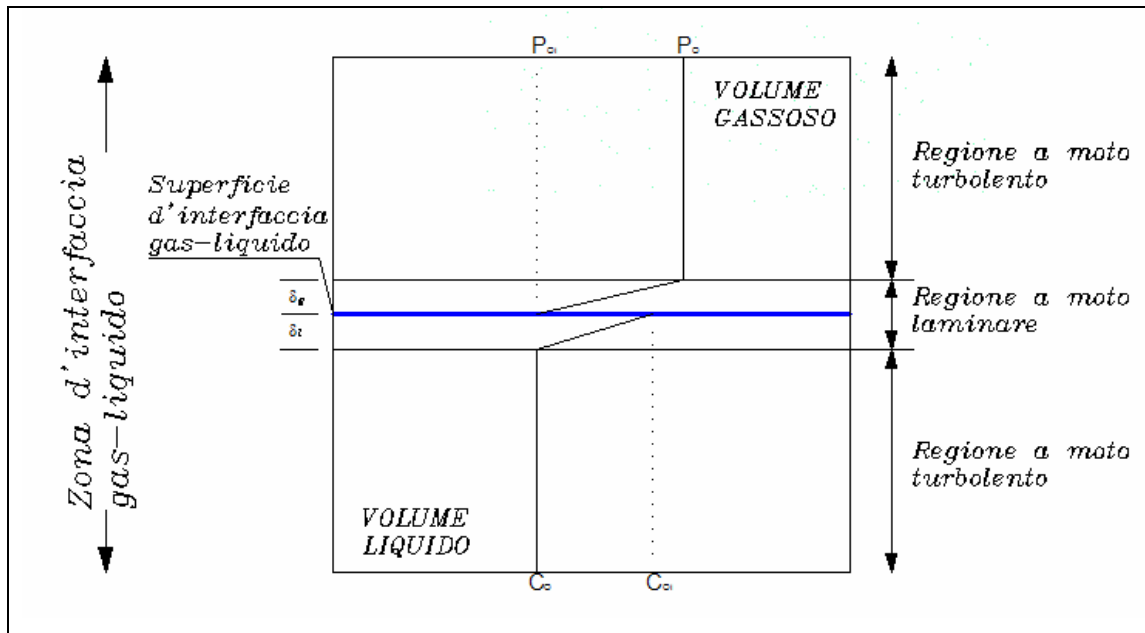


Figura 14: Andamento delle concentrazioni di ossigeno nella zona d'interfaccia

Tenendo conto, in questa fase, della grande differenza di resistenza che l'atmosfera e l'acqua offrono al flusso di ossigeno, si può assumere che esso dipenda unicamente dalla fase liquida, ovvero:

$$J_{O_2} = k_l \cdot (C_{oi} - C_o) \quad (38)$$

Se, inoltre, si considera l'intero flusso di massa che avviene in un corpo idrico di lunghezza L [L], larghezza della superficie libera B [L] e tirante h [L] (Figura 15), tenendo presente, inoltre, che C_{oi} corrisponde alla concentrazione di ossigeno a saturazione, C_{SAT} , e C_o alla concentrazione di ossigeno attuale, C , nel corpo idrico, il flusso netto totale si può scrivere:

$$J_{O_2} = A \cdot K_L (C_{SAT} - C)$$

dove $A=B \cdot L$ [L²] è l'area dell'interfaccia aria-acqua e K_L [LT⁻¹] è il coefficiente di trasferimento di ossigeno dall'aria all'acqua.

Applicando la Legge di Henry al caso della diluizione dell'ossigeno atmosferico in acqua, il flusso di ossigeno J_{O_2} nel volume V di liquido interessato alla riossigenazione è pari alla variazione nel tempo delle concentrazioni dello stesso ossigeno in acqua, $\frac{dC}{dt}$. Si può

pertanto, scrivere:

$$\frac{J_{O_2}}{V} = \frac{dC}{dt}$$

e quindi:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{A}{V} \cdot K_L (C_{SAT} - C)$$

Il raggruppamento $K_L \cdot \frac{A}{V}$ è comunemente denominato coefficiente di riossigenazione K_r [T^{-1}] che indica l'attitudine del volume liquido a recuperare il suo contenuto di ossigeno.

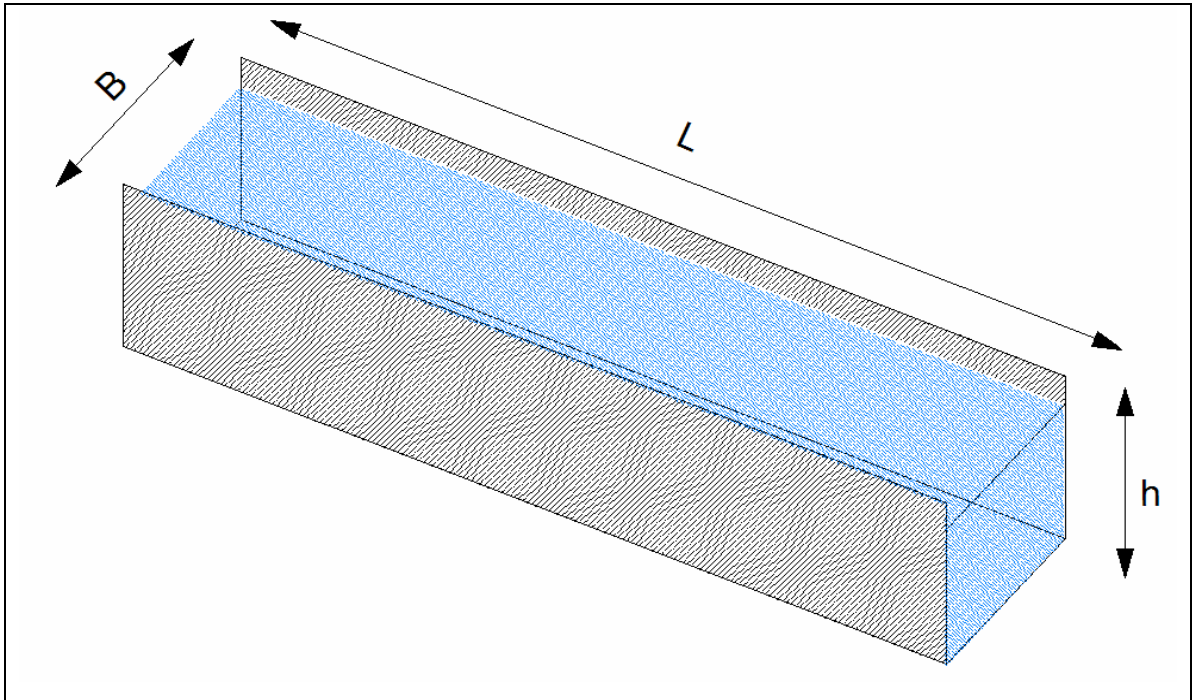


Figura 15: Schema del corpo idrico

Il fenomeno, all'interfaccia, quando si consideri acqua in movimento con la turbolenza all'interno del corpo idrico pienamente sviluppata, cambia; non si possono più considerare costanti gli spessori delle varie sottozone. In particolare, l'esistenza della turbolenza comporta una sorta di erosione dello strato a regime laminare (altrimenti detto boundary layer), riducendo di fatto lo spessore δ_l e, siccome le concentrazioni di ossigeno, C , nel volume liquido e all'interfaccia, C_{SAT} , sono indipendenti da δ_l , si otterrà l'effetto di aumentare il gradiente di concentrazione, incrementando, quindi, il flusso rispetto al caso di acqua stagnante. Il secondo effetto è che la turbolenza nel volume liquido causa movimento all'interno del boundary layer producendo, come risultato, un incremento della diffusività effettiva. La turbolenza, quindi, fa sì che lo spessore dello strato δ_l non possa essere considerato costante e che il tasso di trasferimento risulti limitato sia da condizioni chimiche sia da condizioni idrodinamiche (Socolofsky&Jirka, 2005). Tuttavia, la diffusività molecolare non può essere trascurata, visto che la turbolenza non può agire direttamente in superficie e, dunque, la diffusività molecolare rimane il primo agente del

processo di “cattura” dell’ossigeno.

Lo schema del doppio strato, comunque, non riesce a interpretare bene i fenomeni dovuti al movimento delle particelle liquide; è necessario, a tal fine, considerare un secondo approccio che tenga conto anche dei fenomeni turbolenti.

Il secondo approccio, detto modello di penetrazione, fu proposto da Higbie nel 1935 (Chapra, 1997). Esso fa riferimento a condizioni dinamiche dell’interfaccia aria-acqua in cui la turbolenza, attraverso i meccanismi di scambio descritti nel precedente paragrafo 2.1, tende a spostare particelle di liquido verso la superficie per un limitato periodo di tempo per poi farle ritornare nella massa fluida. In queste condizioni, la superficie dell’interfaccia è continuamente rigenerata. Nel modello di penetrazione l’intervallo di tempo t_c , detto tempo di contatto, durante il quale una qualsiasi particella d’acqua rimane a contatto con l’atmosfera, è lo stesso per tutte le particelle.

Lo schema di Higbie, però, prevede che il tempo di contatto sia costante per tutte le particelle e questo rappresenta un’ipotesi di lavoro molto limitativa nella descrizione della fenomenologia. L’ipotesi di costanza del tempo di contatto è superata dal modello della superficie rinnovata, proposto da Danckwerts nel 1951 (Chapra, 1997), che introduce l’ipotesi che il tempo di contatto t_c non sia eguale per tutte le particelle, ma vari con una certa frequenza, detta di rinnovo, che rappresenta la frequenza con cui le particelle a contatto con l’atmosfera vengono rigenerate attraverso un ricircolo che le sostituisce con nuovi elementi di volumi fluidi (Thibodeaux, 1996, in Gualtieri et al., 2004). Il ritmo con il quale si alternano le particelle in superficie è caratterizzato da una funzione di distribuzione della frequenza di rinnovo, r [T^{-1}], chiamata funzione di distribuzione surface-age, che rappresenta la probabilità che una particella rimanga in contatto con l’atmosfera per un tempo t .

2.2.1. Le grandezze fisiche del fenomeno

Da quanto in precedenza descritto risulta possibile introdurre sin da adesso le principali grandezze che caratterizzano il fenomeno di riaerazione della massa liquida.

L’analisi del meccanismo di trasferimento, infatti, permette di considerare due diverse famiglie di grandezze:

- proprietà fisiche dei fluidi;
- grandezze idrauliche.

Alle prime appartengono la temperatura dell'acqua e le proprietà da essa direttamente dipendenti quali la viscosità, la densità dell'acqua, la diffusione molecolare dell'ossigeno in acqua, la tensione superficiale.

Alla seconda categoria appartengono la velocità e il volume specifico di acqua coinvolto nel processo, la larghezza della superficie d'interfaccia, gli effetti della turbolenza.

Le proprietà fisiche principali si possono esprimere tramite i corrispondenti parametri caratteristici:

1. Viscosità cinematica ν [L^2T^{-1}];
2. Densità ρ [ML^{-3}];
3. Diffusione molecolare D_m [L^2T^{-1}];
4. Tensione superficiale σ [MT^{-2}]

Allo stesso modo è possibile esprimere le principali grandezze idrauliche:

1. Velocità media U [LT^{-1}];
2. Portata Q [L^3T^{-1}];
3. Tirante idrico h [L];
4. Scabrezza del contorno bagnato equivalente in sabbia ε [L];
5. Pendenza della linea dell'energia j_E [-];
6. Pendenza del fondo i [-];
7. Larghezza dell'interfaccia aria-acqua B [L];

2.3. L'EQUAZIONE DI STREETER&PHELPS

Si consideri un tratto di un corso d'acqua, il cui comportamento idraulico è assimilato a quello di un reattore ideale con flusso a pistone (Figura 16). Il bilancio di materia per l'ossigeno disciolto attorno all'elemento infinitesimo generico si scrive come:

$$dV \frac{\partial C}{\partial t} = Q \cdot C - Q \left(C + \frac{\partial C}{\partial x} \right) + r_d dV + r_r dV \quad (39)$$

con r_d e r_r che indicano rispettivamente l'espressione analitica da attribuire alla deossigenazione e alla riossigenazione.

La velocità di deossigenazione può essere ottenuta caratterizzando le reazioni di degradazione della sostanza organica con una cinetica del primo ordine. La velocità di riossigenazione, invece, può essere invece ricavata facendo riferimento alla legge di Fick. Le relazioni sono espresse dalle seguenti equazioni (40) e (41):

$$r_d = \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_d = \frac{\partial L_C}{\partial t} = -K_d L_C \quad (40)$$

$$r_r = \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_r = K_r (C_{sat} - C) \quad (41)$$

dove K_d [T^{-1}] è definito coefficiente di deossigenazione, che descrive la capacità, funzione della temperatura, che hanno i batteri aerobi di consumare l'ossigeno disciolto per degradare la sostanza organica, K_r è il già citato (paragrafo 2.2) coefficiente di riossigenazione e L_C [ML^{-3}] è il carico di sostanza organica biodegradabile.

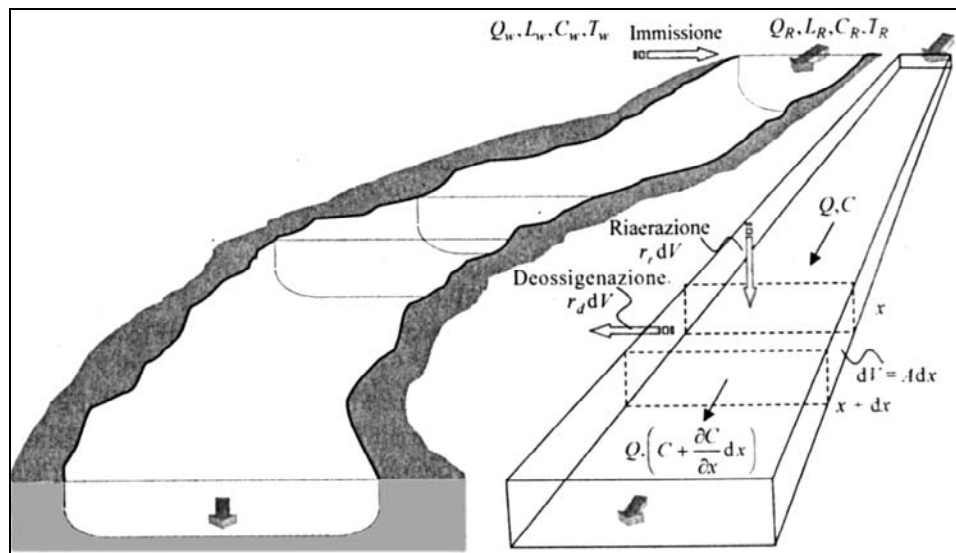


Figura 16: Schematizzazione di un corso d'acqua

Riscrivendo la (39) e sostituendovi le espressioni della (40) e (41) si ottiene, in condizioni stazionarie:

$$\frac{dC}{dt} = -K_d L_C + K_r (C_{sat} - C) \quad (42)$$

Introducendo il termine del *deficit di ossigeno disciolto*, che rappresenta lo scostamento rispetto al valore di saturazione, $DO = C_{sat} - C$, si ottiene la seguente equazione differenziale del primo ordine lineare non omogenea:

$$\frac{dDO}{dt} = K_d L_C - K_r DO \quad (43)$$

Effettuando, inoltre, un bilancio di massa per la sostanza organica attorno allo stesso sistema e integrando tra la sezione corrispondente al punto di immissione e una generica sezione nel tratto considerato, si ha:

$$L_C = L_0 e^{-K_d t} \quad (44)$$

dove L_0 [ML^{-3}] è la concentrazione di sostanza organica nella sezione di sversamento dovuta a una miscelazione trasversale istantanea.

Il valore L_0 si ricava come media pesata sulla portata della concentrazione dello scarico L_s e del fiume L_r immediatamente a monte dello sversamento del refluo:

$$L_0 = \frac{Q_r L_r + Q_s L_s}{Q_r + Q_s} \quad (45)$$

Sostituendo la (45) nella (44) e integrando la (43) per $L_C = L_0$ e $DO = DO_0$ per $t = 0$, si ottiene:

$$\boxed{DO(t) = \frac{K_d L_0}{K_r - K_d} (e^{-K_d t} - e^{-K_r t}) + DO_0 e^{-K_r t}} \quad (46)$$

che è la classica espressione di Streeter&Phelps. In essa DO_0 è il deficit iniziale di ossigeno [ML^{-3}], al momento cioè dell'immissione dello scarico.

2.4. LE INDAGINI SPERIMENTALI

L'analisi concettuale del processo riossigenativo permette di capire i meccanismi con i quali avviene il trasferimento di ossigeno dall'aria all'acqua e i parametri da tenere presente allorché si studia il fenomeno.

Questo approccio, però, soffre ai fini applicativi di un limite che, allo stato attuale delle conoscenze, lo rende impossibile da applicare: la difficoltà di definire, in modo preciso, i valori del tempo di contatto e, quindi, di assegnare un valore credibile dello spessore del sottostrato limite laminare. Queste difficoltà sono connesse all'impossibilità, allo stato attuale delle conoscenze, di modellare adeguatamente i fenomeni turbolenti e, quindi, di riuscire a dare una rappresentazione statistica efficace del moto pulsante delle particelle d'acqua.

Per superare questi problemi è necessaria la misura diretta di alcune grandezze caratteristiche del fenomeno o in modelli fisici di laboratorio oppure direttamente in situ.

La raccolta di dati può avere una duplice finalità:

- la taratura dei modelli concettuali;
- la definizione di formule empiriche o semi-empiriche.

Nel primo caso le misure si utilizzano per la taratura di coefficienti numerici che inglobano al loro interno tutte le quantità non determinabili attraverso gli approcci teorici; nel secondo caso, invece, si cerca di ottenere una correlazione, anche basata sull'analisi dimensionale, fra le grandezze caratteristiche.

Le indagini di laboratorio vengono condotte in canalette a prefissata sezione con la possibilità di variare pendenza, portata e scabrezza, in modo da studiare il fenomeno in diverse condizioni al contorno.

Le indagini in campo prevedono la misura delle caratteristiche idrauliche e di qualità durante le campagne di studio e, in base a quelle condizioni, viene studiato il fenomeno riossigenativo. La misura dei parametri idraulici avviene secondo le usuali tecniche di idraulica; per quanto riguarda le misure della riossigenazione, essa avviene, essenzialmente, seguendo tre approcci (Rathbun, 1977):

- la tecnica del bilancio dell'ossigeno disciolto;
- la tecnica dei traccianti;
- la tecnica dell'equilibrio disturbato.

La tecnica del bilancio dell'ossigeno disciolto è stata usata da Streeter e Phelps nei loro studi sul fiume Ohio. La tecnica consiste nel selezionare un tratto di fiume, misurare tutti i processi che provocano una produzione o una rimozione dell'ossigeno disciolto e determinare per differenza la riossigenazione necessaria affinché si raggiunga la concentrazione di ossigeno disciolto misurata nella sezione di valle del tratto. Per usare la tecnica è necessario che si verifichino particolari condizioni per cui i processi di consumo o produzione di ossigeno siano limitati e facilmente misurabili. Trascurando l' O_2 necessario per ossidare la sostanza azotata, *NOD*, quello per i processi di fotosintesi, di respirazione delle piante e la domanda di ossigeno dei sedimenti, *SOD*, si perviene alla classica modellazione di Streeter & Phelps. Quando gli altri termini non possono essere trascurati, se ne dovrà tenere conto nella modellazione.

La tecnica dei traccianti è stata sviluppata da Tsvoglou et al. (in Rathbun, 1977) ed è l'unico metodo di misura diretta del coefficiente di riossigenazione: avviene attraverso

l'utilizzo di un gas tracciante radioattivo e la successiva misura del relativo de-assorbimento.

La tecnica si basa sul fatto che il gas tracciante insufflato nella corrente è de-assorbito dalla corrente stessa in modo inversamente proporzionale all'assorbimento dell'ossigeno e, quindi, il rapporto tra il coefficiente di de-assorbimento di un gas tracciante e il coefficiente di riossigenazione dell'ossigeno è indipendente dalla temperatura e dalle condizioni della corrente. Come gas tracciante radioattivo è stato usato il krypton 85. Negli anni '70 la tecnica dei traccianti venne modificata da Rathbun (1977), che, mantenendo lo stesso approccio teorico, sostituì al krypton radioattivo gas idrocarburi quali l'etilene o il propano.

La tecnica dell'equilibrio disturbato è stata sviluppata in Inghilterra presso il Water Pollution Research Laboratory e usata ampiamente in numerosi piccoli fiumi inglesi. La tecnica consiste nel misurare la concentrazione di OD nella sezione di monte e in quella di valle del tratto di fiume considerato, a due diversi livelli di concentrazione. Questi due livelli sono ottenuti tramite iniezioni di solfito di sodio e un catalizzatore di cobalto, che producono una rapida deossigenazione. Se la fotosintesi, la respirazione, il coefficiente di riossigenazione, la velocità media e la concentrazione di saturazione possono ritenersi costanti durante le misurazioni, si può calcolare il coefficiente di riossigenazione. L'uso di questa tecnica, però, è generalmente limitato a piccoli fiumi, essendo necessario procedere alla deossigenazione del tratto studiato. Essa è, invece, la più utilizzata nelle applicazioni di laboratorio.

Nel corso degli ultimi anni diverse sono state le campagne condotte in laboratorio e in situ: per quanto riguarda il laboratorio si ricordano Balmè&Tagizadeh Nasser (1995), Moog&Jirka(1999), per quanto, invece, riguarda le campagne in situ attualmente, le fonti più attendibili di dati misurati sono quelle che si rifanno all'U.S.G.S. (Melching&Flores 1999).

2.4.1. Le applicazioni in laboratorio della tecnica dell'equilibrio disturbato

La tecnica dell'equilibrio disturbato trova la sua migliore applicazione nello studio dei

processi riossigenativi in laboratorio.

Come meglio si vedrà in seguito nel capitolo 3 riferito alle indagini di laboratorio, la stima del coefficiente di riossigenazione avviene con un procedimento di ricircolo forzato di un dato volume d'acqua che viene deossigenato versando in esso una quantità di reagenti, solfito di sodio e cloruro di cobalto, proporzionale al volume stesso e misurando in un punto significativo dell'apparato sperimentale il valore nel tempo dell'ossigeno disciolto (OD).

Nelle applicazioni di laboratorio, quindi, si otterrà una curva "a sacco" (Figura 17), in cui la prima parte rappresenta la deossigenazione molto veloce del volume liquido, la seconda, invece, più lenta e variabile in funzione della prova in atto, rappresenta il ramo riossigenativo.

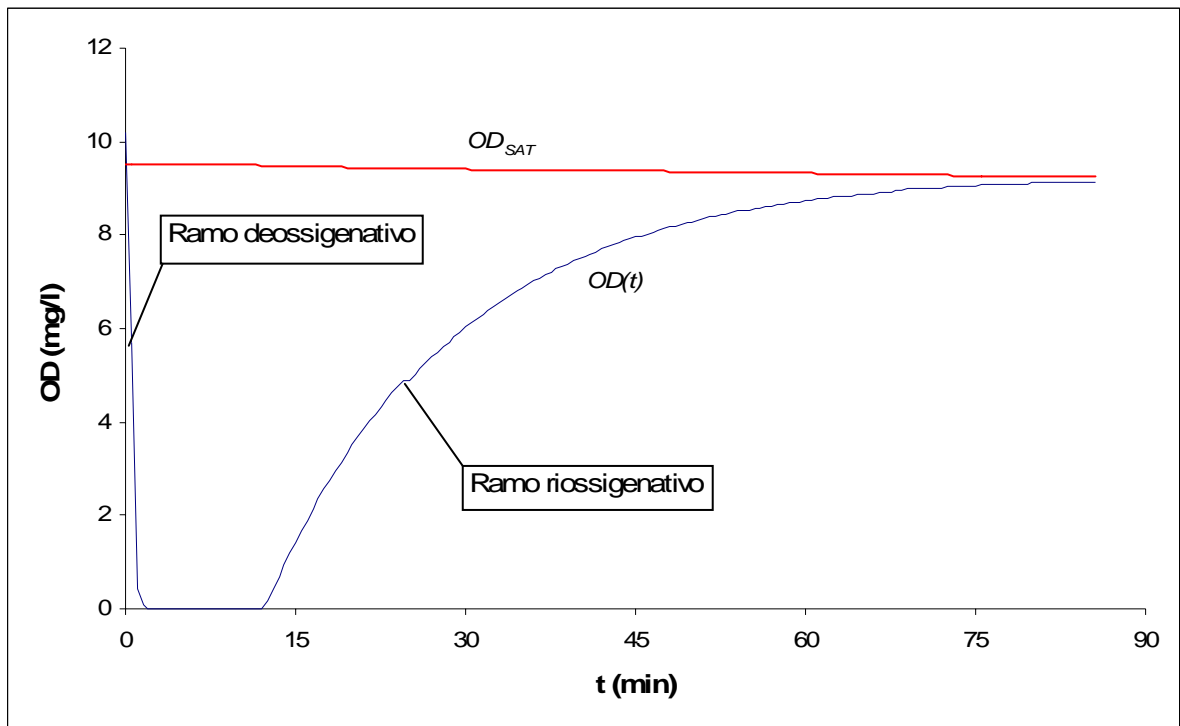


Figura 17: Andamento "a sacco" di una prova di riossigenazione in laboratorio

Il calcolo del coefficiente di riossigenazione avviene dopo aver isolato i valori di ossigeno disciolto che si riferiscono al solo tratto riossigenativo della prova, partendo dal valore minimo di ossigeno disciolto misurato (che deve essere necessariamente prossimo allo 0, altrimenti la prova è scartata e quindi si deve procedere alla sua ripetizione), fino al valore di saturazione prossimo al 100 %.

Noto il valore di OD , si calcola il valore del deficit di ossigeno D , complemento di OD rispetto al valore di saturazione.

Il coefficiente di riossigenazione si può determinare a partire dalla relazione di Streeter&Phelps limitata alla fase riossigenativa (Churchill et al, 1962):

$$DO(t) = DO_0 \cdot e^{-K_r \cdot t} \quad (47)$$

dove si è indicato con:

- DO_0 [ML⁻³]: deficit di ossigeno iniziale;
- K_r [T⁻¹]: coefficiente di riossigenazione;
- T [T]: tempo.

Applicando i logaritmi alla relazione si ricava l'espressione di una retta, di cui K_r è la pendenza:

$$\ln(DO(t)) = \ln(DO_0) - K_r \cdot t \quad (48)$$

L'equazione della retta viene calcolata a partire dai dati di $\ln(DO(t))$ e t , operando una regressione lineare sugli stessi.

Come prima si accennava, il valore del deficit di ossigeno viene calcolato tenendo conto della temperatura attuale della prova: nota la T (°C), infatti, viene calcolato il valore dell' OD_{SAT} e, da questo, $DO(t) = OD_{SAT} - OD(t)$, mentre la percentuale di saturazione è il rapporto fra $OD(t)$ e OD_{SAT} .

La regressione viene effettuata direttamente su un grafico (Figura 18), in cui si riporta sull'asse delle ascisse il valore del tempo in minuti (t) e sull'asse delle ordinate il valore di $\ln(DO(t))$.

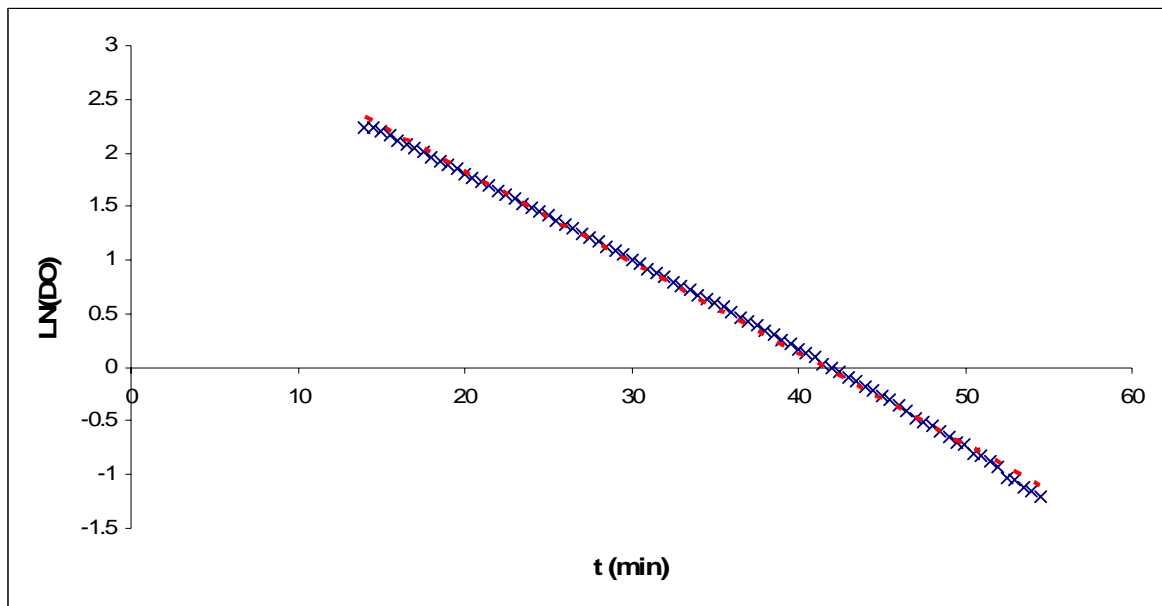


Figura 18: Regressione lineare dei dati di riossigenazione

Una volta ricavati i valori di K_r , si procede alla loro omogeneizzazione rispetto alla temperatura, in modo da poterli confrontare e ulteriormente elaborare.

In particolare, essendo in generale, le temperature medie di prova diverse, in funzione principalmente delle condizioni atmosferiche e della durata della prova medesima, si procede a riportare il valore calcolato alla temperatura standard di 20 °C attraverso la nota relazione di Van't Hoff – Arrhenius (Sirini, 2002):

$$K_r(T) = K_r(20) * 1.024^{(T-20)} \quad (49)$$

2.4.2. I dati dell'U.S.G.S.

L'U.S.G.S. (acronimo di United States Geological Survey) è l'ente statale degli Stati Uniti d'America nato per vari e differenti scopi scientifici. L'U.S.G.S. ha nelle sue prerogative la raccolta, l'analisi e l'elaborazione dei dati scientifici dal punto di vista multidisciplinare, in modo da poter fornire informazioni scientificamente significative ai responsabili delle risorse e ai pianificatori, anche a livello politico.

I dati dell'U.S.G.S. utilizzati in questo studio sono ricavati a partire da campagne di misura durate circa 20 anni. Le misure furono effettuate utilizzando la tecnica dei traccianti in numerosi fiumi degli Stati Uniti, in collaborazione con gli Stati, le Contee, le Città e le Agenzie locali e statali. Lo scopo era quello di sviluppare un metodo di misura della riossigenazione, di individuare un'appropriata allocazione degli scarichi e di caratterizzare in generale lo stato di qualità dei corsi d'acqua indagati.

Fra il 1976 e il 1996 furono condotte una serie di misure su 493 tratti indipendenti di 166 fiumi in 23 Stati diversi. Per molti tratti furono effettuate più misure con metodi diversi: per esempio, furono utilizzati come gas traccianti sia l'etilene sia il propano.

I valori di K_r utilizzati in questo lavoro sono stati gentilmente forniti direttamente da uno degli autori, il prof. Melching, e sono i valori mediati dei vari metodi di misura utilizzati. Nel data base, le misure di K_r , il cui valore è stato omogeneizzato alla temperatura standard di 20 °C, sono accompagnate da misure delle caratteristiche idrauliche della corrente, ossia misure della pendenza della superficie libera, della portata, della velocità media della corrente, della larghezza della sezione sulla superficie libera e della profondità.

La misura della pendenza, J_E , della superficie libera fu ottenuta per alcuni tratti direttamente come pendenza del pelo libero, in altri fu assimilata alla pendenza del fondo.

I valori di J_E nel data base sono compresi in un range che va da 0,00001 a 0,06 m/m.

Il valore della portata, Q , del tratto fu ricavato come valore medio delle misure correntometriche effettuate nelle sezioni terminali del tratto, a monte e a valle. Nei casi in cui fu possibile considerare il moto uniforme, le misure correntometriche furono effettuate in due sezioni trasversali vicine. I valori di portata nel data base sono compresi in un range che va da 0,0028 a 210 m³/s.

Il valore di velocità, U , per ogni singolo tratto fu valutato a partire dalle misure del “*traveltime*”, effettuate insieme alle misure di K_r e della lunghezza del tratto. Nella maggior parte dei casi fu utilizzato il *traveltime* relativo al baricentro della curva concentrazione-tempo del tracciante colorato, in altri fu considerato il tempo relativo al picco di concentrazione. I valori di velocità media presenti nel data base sono compresi in un range che va da 0,003 a 1,83 m/s.

Il valore della larghezza della sezione in sommità, B , fu misurato a partire da valori noti di portata se disponibili o da misure della geometria del fiume. I valori presenti nel data base sono compresi in un range che va da 0,78 a 162 m.

Il valore di profondità h fu ricavato attraverso la relazione di continuità $h = Q/(U \cdot B)$ e i valori riportati nel data base sono compresi in un range che va da 0,0457 a 3,05 m.

Nelle campagne di misura furono ricercate, inoltre, informazioni sul materiale di fondo e sul regime della corrente, suddividendo i corsi d'acqua in “channel control” e in “pool and riffle”. Il channel control si riferisce a un fiume prismatico la cui corrente può essere assimilata a uniforme. Ancora, dove possibile, furono effettuate analisi chimico-fisiche delle acque inclusa la conduttanza specifica, la concentrazione dei solidi totali e la misura del blu di metilene, indicatore della presenza di agenti tensioattivi.

2.4.3. Le esperienze di di Moog&Jirka

Gli esperimenti di Moog e Jirka, furono eseguiti in laboratorio su un canale rettangolare lungo 20,0 m e largo 1,0 m con la possibilità di variare portata e pendenza in un range di valori rispettivamente compresi fra 7,18 e 103,8 l/s e 0,1 e 0,5 %. Fu utilizzato un impianto a ricircolo forzato attraverso una pompa sommersa (Figura 19), installato presso il DeFrees Hydraulics Laboratory in Germania.

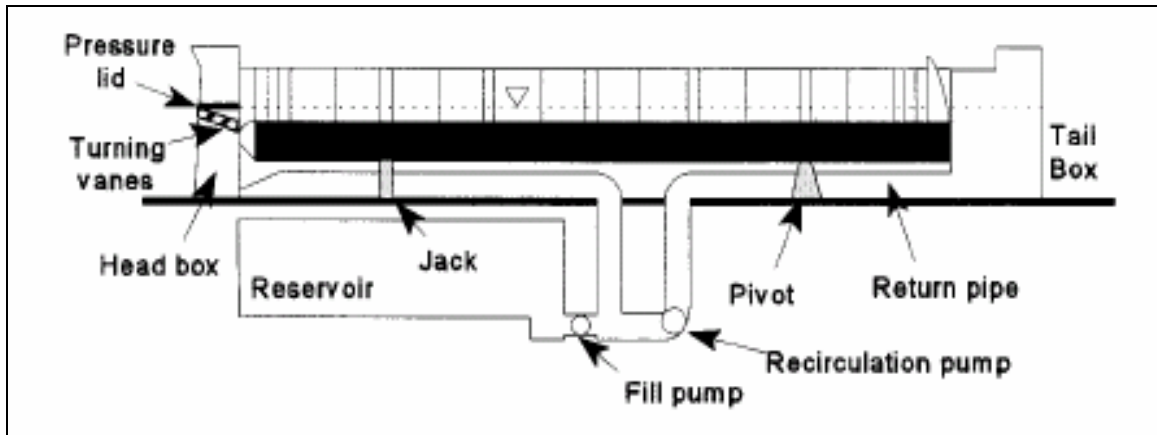


Figura 19: Apparato sperimentale di Moog&Jirka

L'acqua impiegata per la prova veniva deossigenata a mezzo di bolle di azoto che si formano all'interno del serbatoio di riserva e vengono poi pompate nel canale. Una volta fissata la pendenza di prova, la condizione di moto stazionario si stabilisce quasi immediatamente, ma nonostante ciò, l'avviamento della prova veniva ritardato al fine di garantire che si instaurasse un gradiente di deficit di ossigeno pari a $C_{sat}-C$, con C_{sat} concentrazione dell'ossigeno a saturazione e C concentrazione iniziale di ossigeno. I risultati di questa campagna sperimentale sono raccolti nella seguente Tabella 2.

h	i	U	T	K_L
<i>cm</i>		<i>m/s</i>	$^{\circ}C$	<i>m/giorni</i>
2,5	0,001	0,287	17,8	1,88
2,5	0,0025	0,453	12,3	2,66
2,45	0,005	0,622	13,6	4,35
2,4	0,01	0,926	21,8	7,05
4,95	0,00025	0,248	14,95	1,19
4,8	0,001	0,468	16,6	2,23
5	0,0025	0,717	17	3,19
4,95	0,005	0,992	17,4	4,4
9,88	0,00025	0,35	11,85	0,95
10,1	0,001	0,664	11,3	1,66
10	0,0025	1,038	17,85	3,07

Tabella 2: Dati sperimentali di Moog e Jirka

In essa:

- h [L]: tirante idrico misurato nel canale;
- i [-]: pendenza di prova del canale;
- U [LT^{-1}]: velocità nel canale;
- T [T]: la temperatura di prova;
- K_L [LT^{-1}]: il coefficiente di trasferimento di ossigeno.

2.4.4. Le esperienze di Balmè & Tagizadeh Nassèr

Gli esperimenti di Balmè e Tagizadeh Nassèr (1995) furono condotti su una canaletta circolare in calcestruzzo, lunga 24,0 m, del diametro interno di 22,5 cm, con la possibilità di modificare la pendenza del fondo e ricircolare il flusso attraverso una pompa sommersa (Figura 20).

In testa e a valle della struttura erano presenti due serbatoi di carico e scarico idraulicamente connessi alla condotta di ricircolo lungo la quale avveniva la riossigenazione.

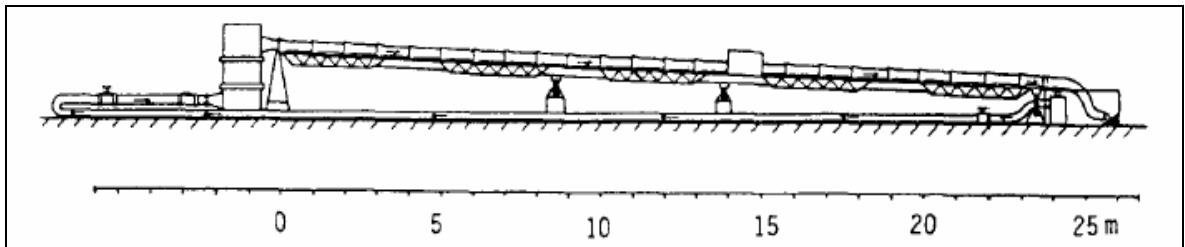


Figura 20: Apparato sperimentale di Balmè & Tagizadeh Nassèr

In tutto furono eseguite 50 prove, variando portata e pendenza, rispettivamente, da 1,3 a 23,6 l/s e da 0,5% a 3,0% (Tabella 3).

Il processo riossigenativo fu studiato misurando nel tempo l'incremento di ossigeno disciolto seguente a una deossigenazione forzata del volume d'acqua interessato, attraverso una miscela solida di solfito di sodio e cloruro di cobalto. Le temperature medie di prova variavano fra 14 e 22 °C e durante le prove la temperatura si incrementava di un valore variabile fra 1 e 3 °C per cui, ai fini del calcolo della temperatura di prova, si considerò un valore medio di quelli misurati. Le prove venivano interrotte quando si raggiungeva un valore del 60-70% di saturazione rispetto alla temperatura media di prova.

Il calcolo di K_r (che gli Autori chiamano K_{La} , intendendo per a il tirante idrico h) è stato effettuato plottando i valori del deficit di ossigeno rispetto al tempo, correggendolo, in una seconda fase, con un coefficiente riduttivo pari a 0.98-0.99, per tener conto della presenza dei serbatoi di accumulo e rilascio e successivamente riportati alla temperatura standard di 20°C attraverso la nota relazione (49): $K_r(T) = K_r(20) * 1.024^{(T-20)}$.

Nella Tabella 3 è stata utilizzata la seguenti simbologia:

- NP: progressiva di prova;
- i [-]: pendenza del canale;

- h/D [-]: grado di riempimento
- h [L]: tirante di prova;
- D [L]: diametro della condotta;
- Q [L^3T^{-1}]: portata fluente;
- A [L^2]: area liquida;
- B [L]: larghezza della superficie;
- U [LT^{-1}]: velocità dell'acqua;
- h_s [L]: altezza media significativa della corrente, rapporto fra area liquida e larghezza della superficie;
- R_H [L]: raggio idraulico.

<i>NP</i>	<i>i</i>	<i>h/D</i>	<i>Q</i>	K_r	K_r	K_L	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>U</i>	h_s	R_H
			l/s	ora ⁻¹	d ⁻¹	m/ora	m ²	m	m/s	m	m
1	0.50%	0.2	2.8	8.18	196.32	0.273	0.006	0.18	0.467	0.033	0.029
2	0.50%	0.3	5.5	6.45	154.8	0.313	0.01	0.206	0.550	0.049	0.038
3	0.50%	0.35	8	6.03	144.72	0.353	0.0124	0.212	0.645	0.058	0.044
4	0.50%	0.35	8.5	6.13	147.12	0.358	0.0124	0.212	0.685	0.058	0.044
5	0.50%	0.38	10	6.3	151.2	0.399	0.0145	0.218	0.690	0.063	0.046
6	0.50%	0.4	11.2	5.1	122.4	0.336	0.016	0.22	0.700	0.066	0.047
7	0.50%	0.43	12.8	5.01	120.24	0.36	0.017	0.223	0.753	0.072	0.05
8	0.50%	0.44	13.6	5.16	123.84	0.392	0.019	0.224	0.716	0.076	0.052
9	0.50%	0.49	16.1	4.76	114.24	0.402	0.0227	0.225	0.709	0.084	0.054
10	0.50%	0.55	20	4.28	102.72	0.434	0.0236	0.224	0.847	0.101	0.06
11	0.50%	0.57	22.5	4.94	118.56	0.523	0.025	0.223	0.900	0.106	0.061
12	0.50%	0.6	25	4.65	111.6	0.529	0.025	0.22	1.000	0.114	0.063
13	1.00%	0.1	1.3	16.8	403.2	0.249	0.002	0.135	0.665	0.015	0.014
14	1.00%	0.2	4.2	9.95	238.8	0.332	0.006	0.18	0.695	0.033	0.029
15	1.00%	0.2	4.2	9.32	223.68	0.311	0.006	0.18	0.692	0.033	0.029
16	1.00%	0.24	5.6	9.01	216.24	0.342	0.0073	0.192	0.767	0.038	0.032
17	1.00%	0.27	7	8.94	214.56	0.385	0.0086	0.2	0.814	0.043	0.035
18	1.00%	0.3	8.3	8.31	199.44	0.403	0.01	0.206	0.830	0.049	0.038
19	1.00%	0.33	10.6	8.58	205.92	0.466	0.0115	0.212	0.925	0.054	0.042
20	1.00%	0.35	13.2	8.56	205.44	0.494	0.0124	0.215	1.061	0.058	0.044
21	1.00%	0.37	14.3	8.78	210.72	0.542	0.0134	0.217	1.067	0.062	0.046
22	1.00%	0.4	16.7	8.22	197.28	0.551	0.0148	0.221	1.128	0.067	0.048
23	1.00%	0.43	19	8.43	202.32	0.612	0.0162	0.223	1.173	0.073	0.05
24	1.00%	0.47	22	8.49	203.76	0.694	0.0183	0.224	1.202	0.082	0.054
25	1.00%	0.5	25	8.29	198.96	0.694	0.02	0.225	1.250	0.089	0.057
26	1.00%	0.1	1.8	20.82	499.68	0.308	0.02	0.135	0.875	0.015	0.014
27	2.00%	0.15	3.6	19.46	467.04	0.49	0.0037	0.16	0.973	0.023	0.021
28	2.00%	0.17	5	18.97	455.28	0.502	0.0045	0.17	1.111	0.026	0.024
29	2.00%	0.2	8	17	408	0.548	0.006	0.186	1.325	0.032	0.029
30	2.00%	0.23	10	15.8	379.2	0.582	0.007	0.19	1.429	0.037	0.031
31	2.00%	0.25	12.5	17.08	409.92	0.683	0.0078	0.195	1.603	0.04	0.033
32	2.00%	0.27	14	18	432	0.773	0.0086	0.2	1.628	0.043	0.035

33	2.00%	0.27	13.6	17.25	414	0.741	0.0086	0.2	1.581	0.043	0.035
34	2.00%	0.29	15.6	17.07	409.68	0.741	0.0096	0.204	1.625	0.047	0.038
35	2.00%	0.32	18.5	15.54	372.96	0.803	0.011	0.21	1.682	0.052	0.041
36	2.00%	0.35	20	13.93	334.32	0.807	0.0124	0.214	1.613	0.058	0.044
37	2.00%	0.35	22.5	13.96	335.04	0.834	0.0129	0.216	1.744	0.06	0.045
38	2.00%	0.38	25	13.26	318.24	0.852	0.014	0.218	1.786	0.064	0.047
39	3.00%	0.1	2.5	29.71	713.04	0.44	0.002	0.135	1.250	0.015	0.014
40	3.00%	0.13	4	22.26	534.24	0.439	0.003	0.152	1.333	0.02	0.018
41	3.00%	0.15	5	22.24	533.76	0.514	0.0037	0.16	1.351	0.023	0.021
42	3.00%	0.2	8.8	18.26	438.24	0.608	0.006	0.18	1.467	0.033	0.029
43	3.00%	0.22	10.2	18.48	443.52	0.675	0.0068	0.186	1.500	0.037	0.031
44	3.00%	0.24	13.2	20.02	480.48	0.771	0.0074	0.192	1.778	0.039	0.032
45	3.00%	0.25	14.6	20.21	485.04	0.809	0.0078	0.195	1.872	0.04	0.033
46	3.00%	0.27	17.2	19.05	457.2	0.819	0.0086	0.2	2.000	0.043	0.035
47	3.00%	0.3	20	16.96	407.04	0.823	0.01	0.206	2.000	0.049	0.038
48	3.00%	0.32	22.5	16.14	387.36	0.845	0.011	0.21	2.045	0.052	0.041
49	3.00%	0.35	26.3	15.55	373.2	0.897	0.0124	0.215	2.121	0.058	0.044
50	3.00%	0.35	26	15.01	360.24	0.866	0.0124	0.215	2.097	0.058	0.044

Tabella 3: Dati di Balmè&Tagizadeh Nassèr (1995)

2.5. IL COEFFICIENTE DI RIOSSIGENAZIONE: METODI DI STIMA

Il processo di riossigenazione è stato studiato in modo sistematico e con regole scientifiche sin dal 1925, da quando Streeter & Phelps pubblicarono il celebre articolo “*A study for the pollution and natural purification of the Ohio River, III. Factor concerning the phenomena of oxidation and reaeration*”.

Uno dei problemi più importanti e stimolanti era ed è dato dalla ricerca di relazioni predettive del coefficiente di riossigenazione.

Diversi, infatti, sono stati gli Autori che si sono cimentati nell’individuare le grandezze idrauliche dalle quali dipende il valore del coefficiente di riossigenazione.

Diversi sono stati gli approcci e i gradi di approfondimento degli studi: si va dall’indagine teorica approfondita per sviluppare modelli concettuali basati sulla turbolenza a modelli semiempirici che utilizzano i risultati sperimentali per tarare alcuni coefficienti, fino ai modelli completamente sperimentali, i cui dati possono essere ricavati da indagini su campo e/o in laboratorio, in vario modo interpretati. Le espressioni che si rifanno a modelli puramente empirici, infatti, possono essere ricavate dalla semplice correlazione delle grandezze idrauliche con il coefficiente di riossigenazione, individuando quella che garantisce il massimo valore del coefficiente di correlazione, o dall’applicazione dell’analisi dimensionale a partire da grandezze fra loro indipendenti.

L'introduzione della teoria della turbolenza, come precedentemente esposto, ha permesso di costruire schemi di calcolo capaci di interpretare il fenomeno riossigenativo e ricondurlo a metodologie tipiche dell'idraulica dei moti turbolenti. Si è già ricordato che il limite di questi schemi è rappresentato dal fatto che, a oggi, non si è riusciti a costruire un modello completo capace di descrivere la complessità dei fenomeni connessi con la turbolenza; l'approssimazione degli schemi ricavati, quindi, si riverbera anche sulla definizione di schemi per lo studio della riossigenazione. La distinzione fra modelli teorici e semi-empirici, allo stato attuale delle conoscenze, si può, pertanto, trascurare.

Le prime stime del valore di K_r possono esser fatte applicando direttamente i risultati delle teorie del doppio strato, di penetrazione e della superficie rinnovata.

Per quanto riguarda la teoria del doppio strato, come precedentemente si è descritto, il processo è limitato dalla fase liquida ed è quindi possibile fare riferimento esclusivamente a ciò che accade nella strato liquido laminare, *boundary layer*, il cui spessore costante viene indicato con δ_l . La condizione iniziale del modello è un corpo idrico semi-infinito avente una concentrazione iniziale uniforme di ossigeno pari a C_0 minore della concentrazione a saturazione C_{sat} . La superficie all'interfaccia viene istantaneamente esposta a una fonte infinita di ossigeno che si dissolverà all'interno dell'acqua fino a quando la concentrazione non sarà quella a saturazione. La reazione di dissoluzione è molto veloce; pertanto, la concentrazione sulla superficie rimane C_{sat} per tutto il tempo in cui è esposta alla fonte.

D'altra parte, l'ossigeno una volta dissolto nel corpo idrico tenderà a distribuirsi uniformemente lungo tutta la profondità. Si creerà quindi un gradiente di concentrazione all'interno del *boundary layer* pari a $(C_{sat}-C)/\delta_l$.

Nota la diffusività molecolare dell'ossigeno in acqua, D_m , è possibile esprimere il flusso di ossigeno attraverso la legge di Fick come:

$$J_{o_2} = \frac{C_{sat} - C}{\delta_l} \cdot D_m \cdot A \quad (50)$$

Confrontando la (38) e la (50) si ha:

$$\frac{C_{sat} - C}{\delta_l} \cdot D_m \cdot A = K_L \cdot A \cdot (C_{sat} - C) \quad (51)$$

da cui si ottiene:

$$K_L = \frac{D_m}{\delta_l} \quad (52)$$

Questo approccio si adatta bene al caso di acque stagnanti in cui si può ipotizzare che lo spessore dello strato laminare possa considerarsi costante.

Dall'applicazione di questa teoria, O'Connor & Dobbins nel 1958 (in Chapra, 1997) hanno ricavato la seguente espressione per K_r :

$$K_r = \sqrt{D_m} \frac{U^{1/2}}{h^{1.5}} \quad (53)$$

Considerando che la diffusività molecolare, D_m , dell'ossigeno in acqua naturale è circa pari a $2.09 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, la (53) diventa:

$$K_r = 3,93 \frac{U^{0,5}}{h^{1,5}} \quad (54)$$

in cui U è espressa in m/s, h in m, K_r in d^{-1} (giorni⁻¹)

Un'altra relazione è stata ricavata da Atkinson (1995). Nei canali a pelo libero lo sforzo d'attrito τ è una funzione lineare della profondità $\tau = \tau_b(y/h)$ e la stima del gradiente di velocità si può fare attraverso il profilo di velocità. Usando un profilo logaritmico e assumendo che la viscosità molecolare ν [L^2T^{-1}] sia comparabile con la viscosità turbolenta ν_t , dopo alcune semplificazioni, si ottiene:

$$\delta_l \approx c_1 \cdot \frac{\nu}{u^*} \cdot Sc^{-0.33} \quad (55)$$

in cui c_1 è una costante che può essere posta $c_1=10$, Sc è il numero di Schimidt, pari al rapporto fra viscosità cinematica ν e diffusività molecolare D_m , u^* è la velocità d'attrito definita segue:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R_H J_E}{\rho}}$$

dove:

τ [$ML^{-1}T^{-2}$]: tensione tangenziale al fondo;

R_H [L]: raggio idraulico;

J_E [-]: pendenza della linea dell'energia;

ρ [ML^{-3}]: densità dell'acqua.

Dalle equazioni (52) e (55) si ricava:

$$K_L = \frac{D_m}{10 \cdot \nu} \cdot u^* \cdot Sc^{0.33} \quad (56)$$

Nel modello di penetrazione proposto da Higbie, l'intervallo di tempo durante il quale una particella rimane a contatto con l'atmosfera è uguale per tutti i volumi di liquido e il coefficiente di trasferimento di ossigeno risulta pari a:

$$K_L = 2\sqrt{\frac{D_m}{\pi \cdot t_c}} \quad (57)$$

dove t_c è il tempo di contatto espresso in secondi.

Con il modello della superficie rinnovata, Danckwerts modifica il modello di penetrazione proposto da Higbie e introduce l'ipotesi che il tempo di contatto t_c non sia eguale per tutti gli volumi di liquido, ma vari secondo una certa legge di distribuzione di probabilità, caratterizzata da un valore medio t_{c-mean} (Thibodeaux, 1996 in Gualtieri et al., 2004).

La funzione di distribuzione proposta, ϕ , chiamata funzione di distribuzione *surface-age*, che rappresenta la probabilità che una particella rimanga in superficie in contatto con l'atmosfera per un tempo t prima che inizi il nuovo ricircolo a opera di nuovi elementi di volume fluido, è la seguente (Gualtieri and Gualtieri, 2003):

$$\phi = r \cdot \exp(-r \cdot t) \quad (58)$$

in cui $r = 1/t_{c-mean} [T^{-1}]$ è la frequenza di rinnovo. Sotto questa ipotesi, l'espressione di K_L è la seguente:

$$K_L = \sqrt{r \cdot D_m} \quad (59)$$

La frequenza di rinnovo r risulta essere una funzione della turbolenza (Weber and DiGiano, in Gualtieri et al. 2006) e, ricordando che la turbolenza è caratterizzata da fluttuazioni di scala diverse, si possono avere due approcci limite per la stima di r : uno nel caso in cui la concentrazione del *boundary layer* sia rinnovata dalle fluttuazioni di piccola scala o fluttuazioni della scala di Kolmogorov, e un altro nel caso in cui la concentrazione del *boundary layer* sia rinnovata dalle fluttuazioni di grande scala o fluttuazioni della scala integrale (Moog and Jirka, 1999). In entrambi i casi, si perviene alla conclusione che il coefficiente di trasferimento di ossigeno K_L risulta proporzionale a una potenza della velocità media della corrente. Più precisamente, questa potenza risulta essere $3/4$ partendo dai modelli di fluttuazione a piccola scala, $1/2$ se si considerano i modelli a grande scala. I dati sperimentali sono piuttosto sparsi, ma tendono ad aggregarsi meglio considerando la relazione $k_L \propto u^{3/4}$. Ciò porta alla conclusione che siano le fluttuazioni di piccola scala a influenzare maggiormente il fenomeno (Socolofsky and Jirka, 2005).

Un'altra importante relazione derivata dall'applicazione della teoria della superficie rinnovata è quella di Gulliver&Stefan (1984, in Atkinson et. al 1995):

$$K_L = \left[\frac{\delta_l}{D_m} + \frac{1}{ku^*} \ln(kPe) \right]^{-1} \quad (60)$$

in cui $k=0.4$ è la costante universale di von Kàrmàn e, $Pe = \frac{u^* \cdot h}{D_m}$ il numero di Peclét,

essendo u^* la già definita velocità d'attrito

Un secondo approccio proposto da Atkinson (1995) relaziona δ_l alle fluttuazioni più piccole della corrente. Partendo dalla microscala di Kolmogorov, η , δ_l può essere stimato come:

$$\delta_l \cong A_1 \cdot \left(\frac{v^3 \cdot h}{U^3} \right)^{1/4} \quad (61)$$

dove U è la velocità media della corrente e $A_1=2$ è una costante numerica.

Dall'equazione (52) e dalla (61), K_L può essere ottenuto come:

$$K_L = \frac{D_m}{2} \cdot \left(\frac{U^3}{v^3 \cdot h} \right)^{1/4} \quad (62)$$

Fortescue e Pearson (1967, in Gualtieri et al., 2004) hanno assunto che il layer superficiale può essere diviso in una serie di celle rotazionali aventi diametro e velocità proporzionali a h e u' , essendo quest'ultimo lo scarto quadratico medio delle velocità di fluttuazione turbolente. Inoltre, la velocità delle celle può essere scalata attraverso u^* ; Il parametro r può, così, essere considerato proporzionale a u^*/h . inserendo questa espressione nella (59), il modello delle fluttuazioni di larga scala è (Moog&Jirka, 1999):

$$K^+_L = \frac{K_L}{u'} \approx \frac{K_L}{u^*} \propto Sc^{-0.5} R^{*-0.5} \quad (63)$$

dove K^+_L è il coefficiente di riossigenazione adimensionale e $R^*=u^*h/\nu$.

Peraltro, considerando le attenuazioni delle fluttuazioni verticali dovute alla superficie libera, Lamont e Scott nel 1970 (in Gualtieri, 2004) hanno ipotizzato che le più piccole fluttuazioni contribuiscono al rinnovo della superficie.

Integrando il modello delle celle rispetto a un numero spettrale d'onda contenente un subrange inerziale, hanno ottenuto:

$$K_L \propto Sc^{-0.5} (\epsilon_K \cdot \nu)^{0.25} \quad (64)$$

che esprime il modello delle fluttuazioni di piccola scala e dove $\varepsilon_K [L^2/T^3]$ rappresenta il tasso di dissipazione di energia cinetica turbolenta. Allo stesso modo si ricava un'espressione analoga a quella dominata dalle perturbazioni di grande scala:

$$K^+_L \approx \frac{K_L}{u^*} \propto Sc^{-0.5} R^{*-0.25} \quad (65)$$

Comparando la (64) e la (65) si vede che i modelli di fluttuazioni di larga e piccola scala differiscono per l'esponente del numero di Reynolds, cosicché si può usare l'espressione generalizzata:

$$K^+_L \approx \frac{K_L}{u^*} \propto Sc^{-0.5} R^{*n} \quad (66)$$

I risultati sperimentali raccolti da Moog e Jirka hanno prodotto un modello di regressione lineare dove $n = -0.29$. Così, questi risultati di laboratorio hanno data conferma sperimentale al modello delle fluttuazioni di piccola scala. In particolare, considerando per l'esponente del modello un valore di $n = -0.25$, una regressione non lineare dei dati è (Moog&Jirka, 1999) $K^+_L \cdot Sc^{0.5} = 0.161 \cdot R^{*-0.5}$

ovvero:

$$K^+_L \cdot Sc^{0.5} = 0.161 \cdot Sc^{-0.5} \cdot (\varepsilon_K \cdot \nu)^{0.25} \quad (67)$$

2.5.1. *Lo schema di Horng-Guang Leu.*

Un ulteriore importante approccio è stato proposto da Horng-Guang Leu et al. (1997), basato sullo schema riportato in Figura 21.

Indicando con x l'ascissa orizzontale, y la profondità, $U_{PL} [LT^{-1}]$ la velocità del pelo libero della corrente, $h [L]$ il tirante, $C_{SAT} [ML^{-3}]$ la concentrazione di ossigeno disciolto a saturazione, $C [ML^{-3}]$ la concentrazione attuale nella zona di riaerazione di spessore di equilibrio $y_m [L]$ e lunghezza orizzontale $\Delta L [L]$, $D_m [L^2T^{-1}]$ la diffusività molecolare dell'ossigeno in acqua, per una sezione trasversale di area $A [L^2]$ è possibile scrivere il seguente bilancio di massa:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{y_m} (C_{SAT} - C) * U_{PL} * dy = D_m * \frac{dC}{dy} \Big|_{y=0} \quad (68)$$

Omettendo i passaggi, l'integrazione della (68) conduce (Horng-Guang Leu et al., 1997) con l'ausilio della (38) a:

$$K_L = \frac{4}{\sqrt{3}} * \sqrt{\frac{U_{PL} * D_m}{\Delta L}} \quad (69)$$

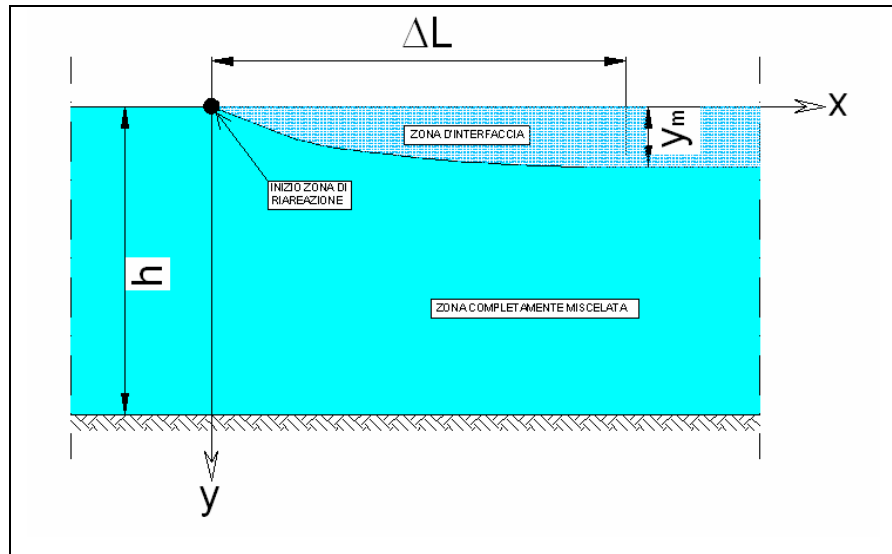


Figura 21: Schema concettuale della riossigenazione (Hornng-Guang Leu et al.,1997)

La lunghezza ΔL rappresenta la lunghezza del tratto orizzontale che occorre affinché sia raggiunta la condizione di equilibrio nello spessore y_m della zona di riareazione.

Introducendo il coefficiente di riossigenazione $K_r = \frac{K_L}{h}$ e tenendo presente che in un canale a superficie libera la velocità può essere rappresentata attraverso un profilo parabolico a partire dal valore della velocità media della corrente U , l'espressione di K_r diventa:

$$K_r = 2 * \sqrt{2} * \sqrt{\frac{U * D_m}{\Delta L * h^2}} \quad (70)$$

2.5.2. Lo schema di Gualtieri&Gualtieri

Un esempio più recente di approccio teorico basato sulla turbolenza è rappresentato dal modello di Gualtieri and Gualtieri (2004). I due ricercatori italiani hanno ipotizzato una analogia di comportamento fra il substrato laminare sul contorno bagnato e il boundary layer all'interfaccia aria-acqua.

Per ricavare questa analogia, prima di tutto, si è fatta l'ipotesi che la distribuzione della velocità nello strato laminare vicino alla superficie libera dell'acqua possa essere definita partendo dalla distribuzione di velocità nello strato laminare al fondo, che è nota.

Se l'espressione di Newton per lo sforzo di attrito $\tau = -\mu(dU/dy)$, dove μ [ML⁻¹T⁻¹] rappresenta la viscosità dinamica, è ottenuta a partire da una legge lineare $\tau = -\tau_b(y/h)$, dove y è la distanza verticale dall'interfaccia aria-acqua, introducendo la velocità d'attrito

$u^* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$, è possibile mostrare che:

$$\frac{dU}{dy} = -\frac{u^{*2}}{\nu} \frac{y}{h} \tag{71}$$

Integrando la (71) vicino alla superficie libera, una distribuzione non dimensionale della velocità è definita come:

$$\frac{u_0 - u}{u_0} = \frac{h \cdot u^*}{2 \cdot \nu} \left(\frac{y}{h}\right)^2 \tag{72}$$

dove u_0 [LT⁻¹] è la velocità all'interfaccia aria-acqua e y , come già specificato, è la distanza dall'interfaccia (Figura 22).

Lo schema propone la presenza di uno strato di interfaccia a regime laminare di spessore δ_v , all'interno del quale è presente uno spessore $\delta_c = \delta_l$, della zona di confine aria-acqua, entrambi confinati al di sotto della superficie libera.

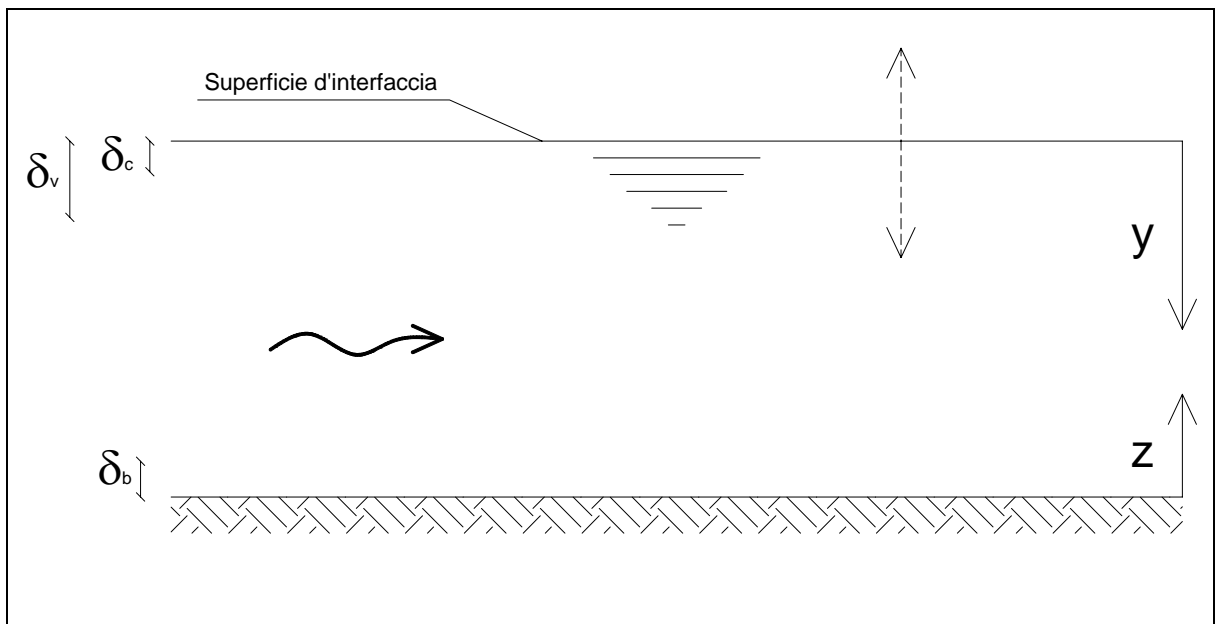


Figura 22: Schema di Gualtieri&Gualtieri (2004)

Siccome in un canale rettangolare largo, lo sforzo d'attrito è $\tau = \gamma h J_E$, dove J_E è la pendenza della linea dell'energia, la velocità d'attrito è $u^{*2} = \tau_b / \rho = gh J_E$. Così, sostituendo nella (72) si ottiene:

$$u_0 - u = \frac{gJ_E}{2\nu} y^2 \quad (73)$$

Considerando il sottostrato laminare all'interfaccia aria-acqua, $y = \delta_v$, la (73) diventa:

$$u_0 - u_{\delta_v} = \frac{gJ_E}{2\nu} \delta_v^2 \quad (74)$$

Il valore di δ_v può essere ricavato dalla conoscenza del numero di Reynolds per il trasferimento del gas, indicato con R_{g-t} , definito come:

$$R_{g-t} = \frac{\delta_v \cdot (u_0 - u_{\delta_v})}{\nu} \quad (75)$$

Applicando la teoria della turbolenza e considerando che la tensione tangenziale all'interfaccia aria-acqua ha un valore finito, si può dimostrare (Gualtieri&Gualtieri, 2004) che $R_{g-t} < 25$.

Mettendo in relazione ($u_0 - u_{\delta_v}$) nell'equazione (74) e nella (75) si ha:

$$\frac{gJ_E}{2\nu} \delta_v^2 = R_{g-t} \frac{\nu}{\delta_v} \quad (76)$$

Così, lo spessore dello strato laminare che controlla il trasferimento del gas è:

$$\delta_v = (\nu)^{2/3} \cdot \left(\frac{2 \cdot R_{g-t}}{g \cdot J_E} \right)^{1/3} \quad (77)$$

dove δ_v dipende dalla pendenza J_E , da R_{g-t} , che potrebbe essere calibrato utilizzando dati sperimentali (Gualtieri&Gualtieri, 2002) e da ν , che dipende dalla temperatura. Lo spessore dello strato laminare è legato allo spessore del boundary layer δ_c tramite la seguente espressione:

$$\delta_c = \frac{\delta_v}{Sc^{1/3}} \quad (78)$$

Per cui, considerando la 78, l'espressione di δ_v dalla (77) può essere trasformata, per derivare attraverso la (58) il coefficiente K_L come:

$$K_L = D_m^{2/3} \cdot \left(\frac{g \cdot J_E}{2 \cdot \nu \cdot R_{g-t}} \right)^{1/4} \quad (79)$$

Nell'equazione (79) il processo di trasferimento del gas cresce con la diffusione molecolare D_m e con la pendenza del canale. Inoltre, la principale influenza della tensione superficiale è che R_{g-t} è molto più piccolo di 25. R_{g-t} dipende dallo spessore del sottostrato laminare all'interfaccia δ_v , e, attraverso la viscosità ν , dalle proprietà del fluido

e dalla temperatura. Ad esempio, se lo spessore δ_v è grande, il trasferimento del gas è più grande in accordo con la (79). A conferma dell'ipotesi che il numero di $Rg-t$ è più piccolo di 25, questo parametro è stato calibrato attraverso un vasto campione di dati di dati di riossigenazione misurati dallo United States Geological Survey (U.S.G.S.), restituendo un valore pari a 0.75.

2.5.3. *L'analisi di Melching&Flores*

Fra i metodi empirici derivanti dall'elaborazione di dati sperimentali, è significativo il contributo dato da Melching&Flores (1999), che hanno analizzato, interpretato ed elaborato i dati provenienti dalle campagne dell'U.S.G.S precedentemente citate.

I due ricercatori hanno inteso suddividere i dati in 4 categorie, in funzione delle caratteristiche idrauliche e geometriche del corso d'acqua. In particolare, si sono considerati due regimi di moto, rispettivamente "channel control" e "pool and riffle" e una portata soglia pari a $0.556 \text{ m}^3/\text{s}$, applicando una regressione lineare multipla logaritmica per legare i valori di K_r (d^{-1}) alle proprietà della corrente idraulica.

Le equazioni empiriche ricavate hanno come variabili la perdita di energia e la portata o la profondità della corrente h (m) e la larghezza B (m). Le formule proposte sono le seguenti:

$$- K_r = 517 \cdot (U \cdot J_E)^{0,524} \cdot Q^{-0,242} \quad (80)$$

$$- K_r = 596 \cdot (U \cdot J_E)^{0,528} \cdot Q^{-0,136} \quad (81)$$

$$- K_r = 88 \cdot (U \cdot J_E)^{0,313} \cdot h^{-0,353} \quad (82)$$

$$- K_r = 142 \cdot (U \cdot J_E)^{0,333} \cdot h^{-0,66} \cdot B^{-0,243} \quad (83)$$

Le prime due si riferiscono a regime di moto "pool and riffle" con portate rispettivamente inferiori e superiori alla portata soglia di $0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 23); le ultime due, invece, al regime di moto "channel control" con portate rispettivamente inferiori e superiori alla portata soglia di $0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 24).

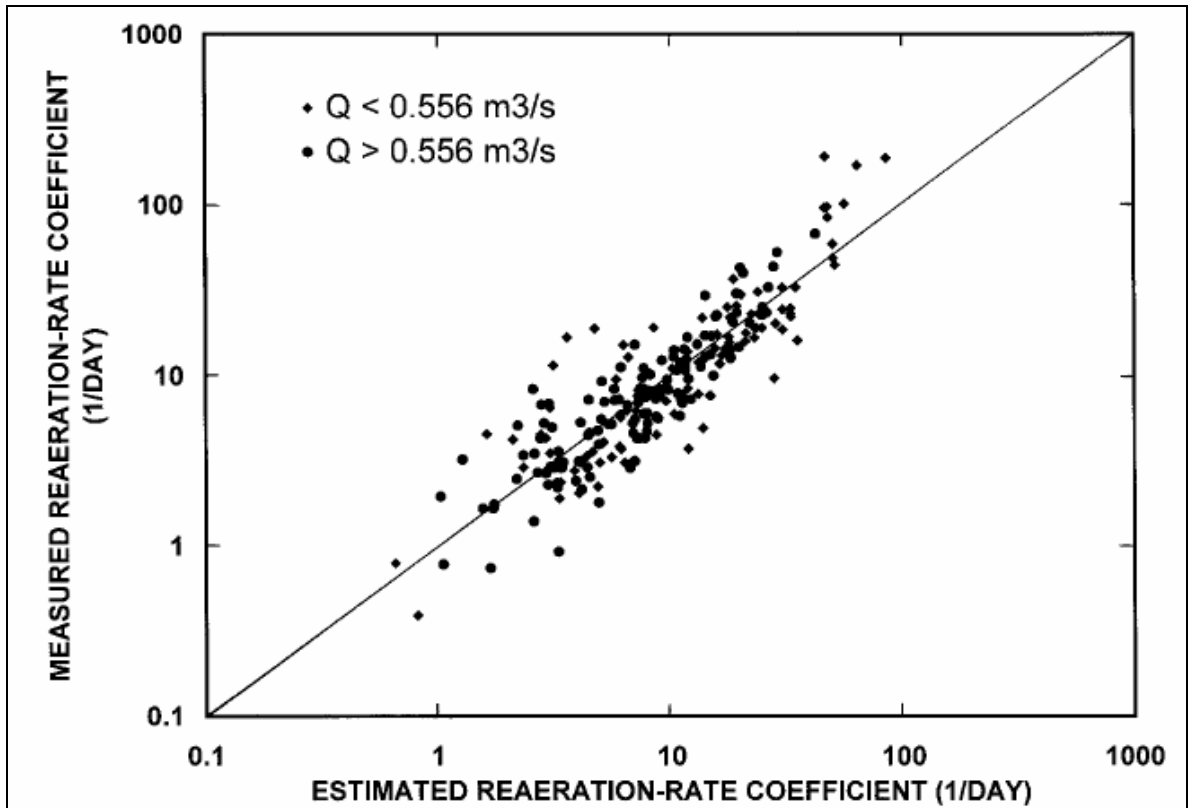


Figura 23: Regressioni per condizione "pool and riffle" (Melching&Flores, 1999)

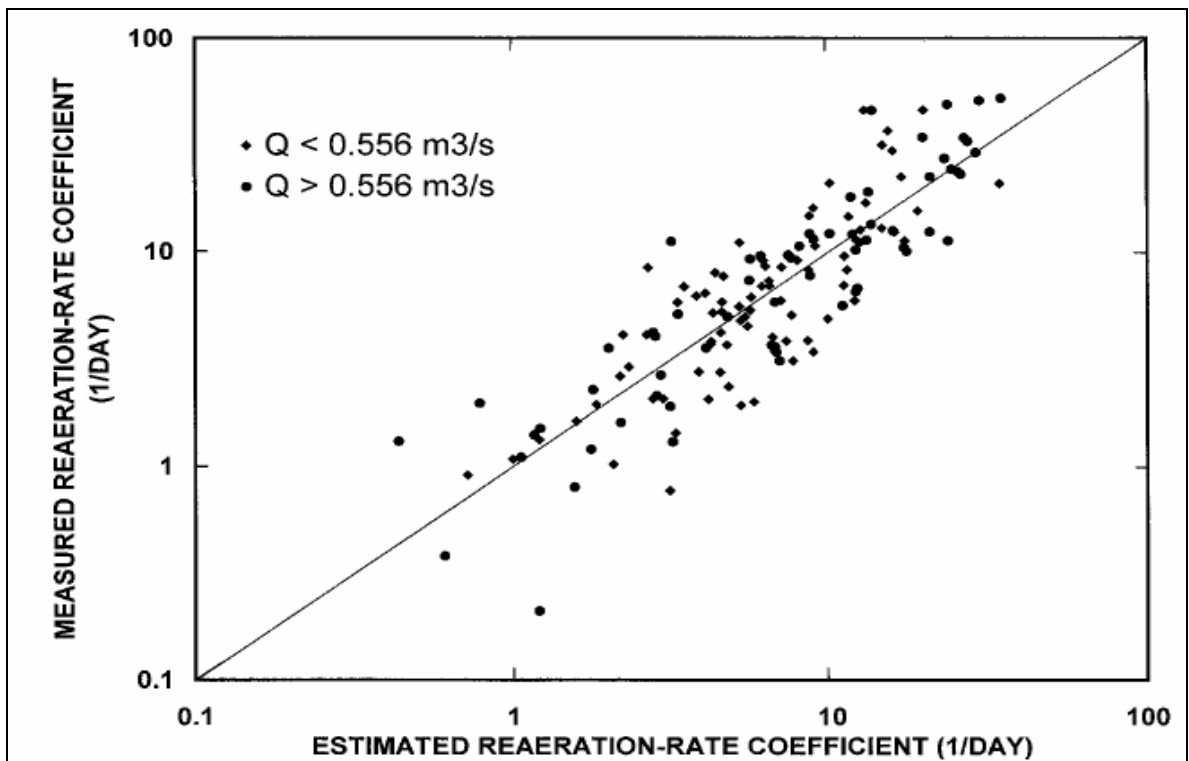


Figura 24: Regressione per "channel control" (Melching&Flores, 1999)

2.5.4. Lo schema di Balmè & Tagizadeh Nassèr

Un importante contributo allo sviluppo dei metodi basati su dati sperimentali di laboratorio è stato dato da Balmè e Tagizadeh Nassèr (1995).

I ricercatori hanno elaborato i dati delle 50 prove sperimentali, attraverso uno schema secondo cui K_L dipende dall'energia dissipata $E = gUi$, con g [LT^{-2}] accelerazione di gravità, U [LT^{-1}] velocità media della corrente, i [-] pendenza del fondo canale, e dall'altezza media significativa h_s [L], rapporto fra area della sezione liquida e larghezza della superficie d'interfaccia aria-acqua.

Eseguendo una regressione lineare dei dati, (Figura 25) si ricava:

$$K_L = 3.82E^{0.375}h_s^{0.4} \quad (84)$$

con coefficiente di correlazione $R^2=0.94$. Al fine di rendere l'espressione indipendente dal diametro della condotta, si è adimensionalizzata l'altezza media tramite il diametro stesso, ricavando la regressione dei dati di cui in Figura 26, la cui espressione è:

$$K_L = 2.10E^{0.375}\left(\frac{h_s}{D}\right)^{0.4} \quad (85)$$

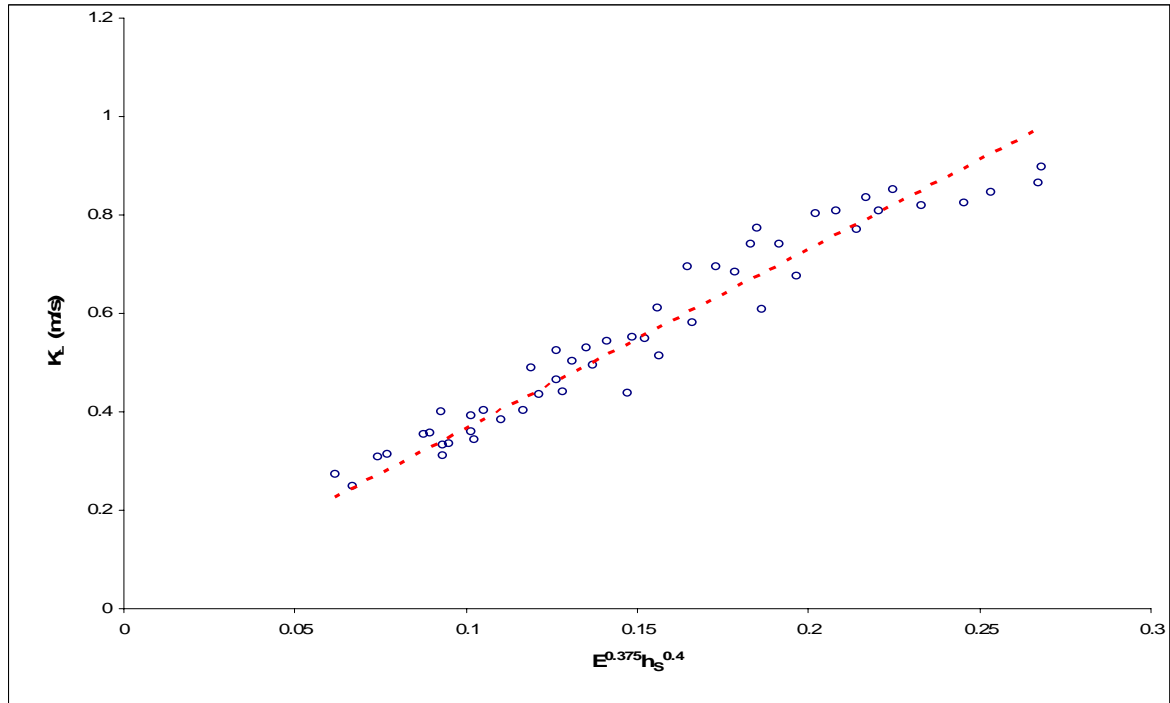


Figura 25: Regressione dati fra K_L e il prodotto $E^{0.375} h_s^{0.4}$

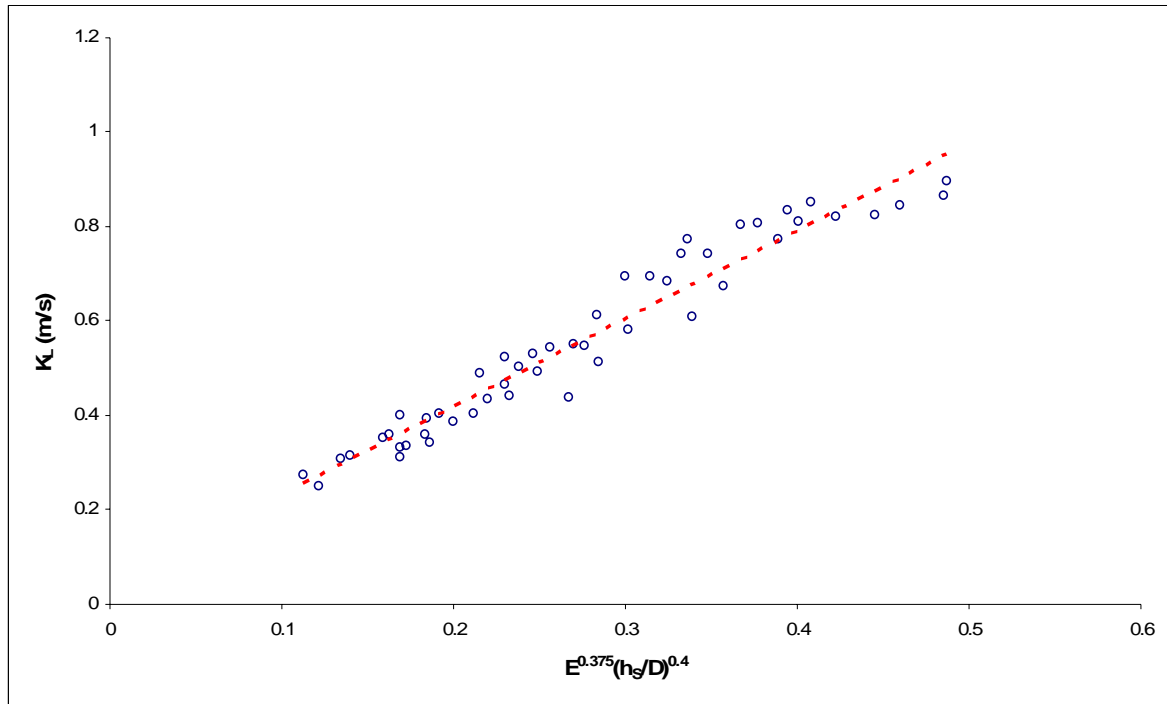


Figura 26: Regressione dati fra K_L e il prodotto $E^{0.375} (h_s/D)^{0.4}$

2.5.5. *Re-interpretazione dei dati di letteratura tramite l'analisi dimensionale*

Negli ultimi anni, la ricerca ha mostrato la possibilità di interpretare il processo riossigenativo tramite l'analisi dimensionale, sulla base di dati provenienti da sperimentazioni di campo e laboratorio (Gualtieri et al., 2002, 2004, 2006 e Veltri et al., 2004, 2005, 2006, 2007a, 2007b).

Un primo modello interpretativo del gruppo di ricerca del Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria si basava su grandezze adimensionali dipendenti dai seguenti parametri:

- $K_r [T^{-1}]$: coefficiente di riossigenazione;
- $Q [L^3 T^{-1}]$: portata liquida;
- $h [L]$; tirante della corrente;
- $B [L]$; larghezza dell'interfaccia aria-acqua;
- $\varepsilon [L]$: scabrezza assoluta equivalente in sabbia;
- $i [-]$: pendenza del fondo.

Se queste grandezze sono fra loro correlate esiste una funzione f_1 tale che $f_1(K_r, Q, h, B, \varepsilon, i) = 0$.

Considerando due variabili indipendenti, Q e h , è possibile definire quattro raggruppamenti adimensionali che possono descrivere il fenomeno:

$$KR^* = \frac{K_r \cdot h^3}{Q}, BR = \frac{B}{h}, SC = \frac{\varepsilon}{h}, i.$$

Esisterà, dunque, una relazione fra grandezze adimensionali f_2 tale che: $f_2(KR, BR, SC, i) = 0$. Allo stesso modo esisterà una funzione f_3 tale che: $KR^* = f_3(BR, SC, i)$.

Ipotizzando il moto uniforme, uno dei raggruppamenti risulta essere sovrabbondante; tenendo presente che la larghezza della superficie è un parametro significativo del processo, uno fra i e SC si può eliminare; eliminando la pendenza del fondo, dovrà esistere una funzione f_4 tale che: $KR^* = f_4(BR, SC)$.

Considerando, ora, scabrezza uniforme nelle analisi considerate, il raggruppamento SC si può eliminare dal legame funzionale e dovrà, quindi, esistere una funzione f_5 tale che:

$$KR^* = f_5(BR)$$

Attraverso i dati provenienti dalle prove sperimentali si può individuare la struttura del legame funzionale che, in questo caso ha la forma di potenza del tipo:

$$KR^* = \alpha BR^\beta \tag{86}$$

Una volta determinata la relazione adimensionale, al fine di ricavare una diretta espressione fra le variabili dimensionali, sono state esplicitate quest'ultime a partire dalla relazione riportata nella 86, ottenendo:

$$\frac{K_r \cdot h^3}{Q} = \alpha \cdot \left(\frac{B}{h}\right)^\beta \tag{87}$$

da cui è possibile ricavare, esplicitando il parametro K_r : $K_r = \alpha \cdot \frac{Q}{h^3} \cdot \frac{B^\beta}{h^\beta}$, ovvero:

$$K_r = \alpha \cdot \frac{Q \cdot B^\beta}{h^{(3+\beta)}} \tag{88}$$

La verifica della bontà dell'elaborazione è affidata al confronto fra i valori di K_r misurati in laboratorio e quelli calcolati con la relazione (88).

La determinazione dei coefficienti di correlazione è stata affidata all'applicazione della relazione trovata a dati di letteratura, prima a quelli provenienti dalle sperimentazioni condotte in laboratorio poi a dati su campo ricavati dal database dell'U.S.G.S. (in Melching&Flores, 1999).

2.5.6. Rielaborazione dei dati di laboratorio di letteratura

L'applicazione dei dati di Balmèr e Tagizadeh Nassèr, ovvero per il canale a sezione circolare, è risultato $\alpha = 0.00023$ e $\beta \cong -1.0$, con coefficiente di correlazione $R^2=0.92$. In Figura 27 sono riportati la curva interpolante e i punti campionari.

Per i dati di Moog e Jirka, ovvero per il canale a sezione rettangolare, è risultato $\alpha = 9 \cdot 10^{-6}$ e $\beta \cong -0.4$, con coefficiente di correlazione $R^2=0.95$. In Figura 28 sono riportati la curva interpolante e i punti campionari.

E' evidente che, nonostante il buon adattamento dei dati sperimentali alla struttura descrittiva del fenomeno di cui alla relazione 88, quest'ultima non è ancora una relazione di carattere generale, in quanto i valori di α e β sono diversi nelle differenti situazioni sperimentali.

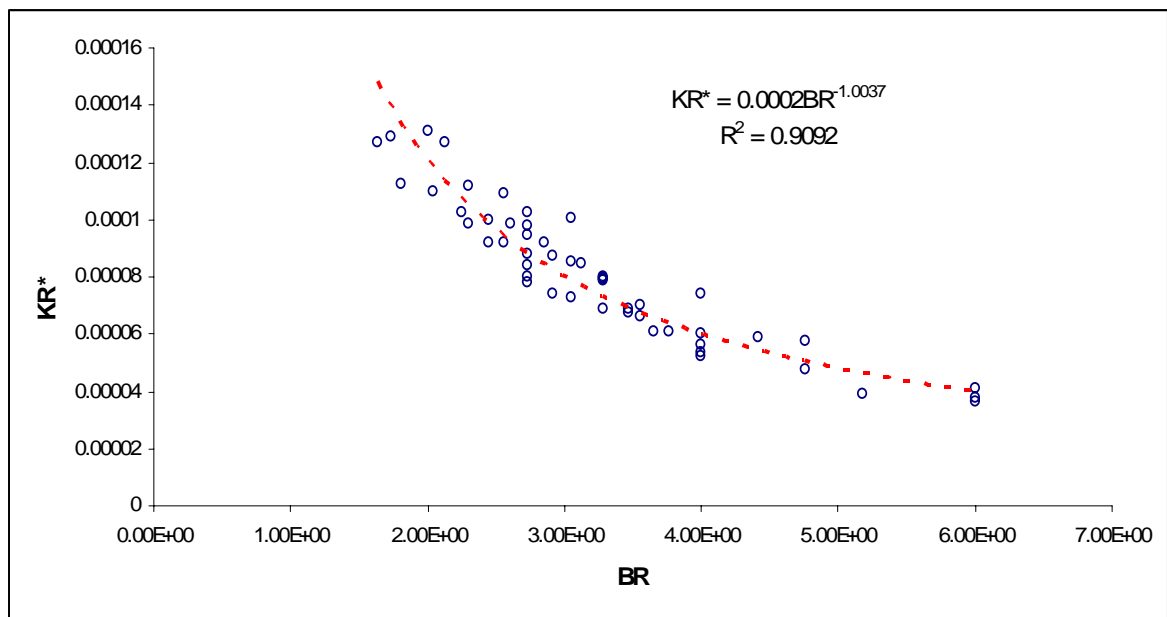


Figura 27: Grafico della correlazione fra KR^* e BR – Balmèr & Tagizadeh Nassèr

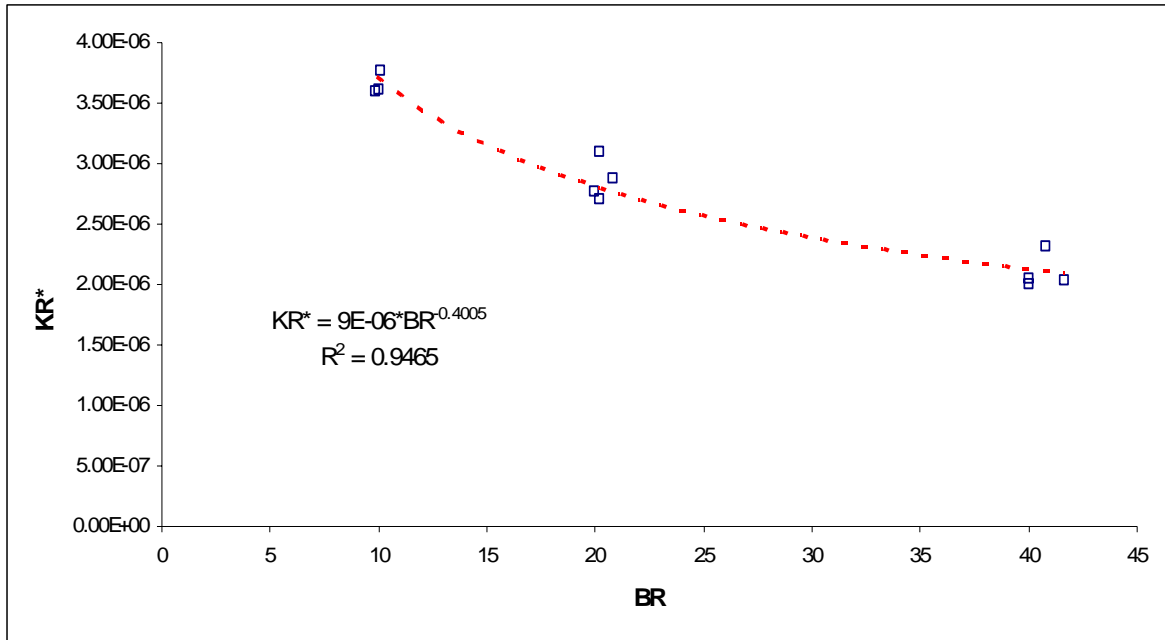


Figura 28: Grafico della correlazione fra KR* e BR– Moog&Jirka

VERIFICA DEI VALORI DI K_r

Sostituendo i valori dei coefficienti α e β ricavati dalle analisi, è possibile ricavare un'espressione predettiva di K_r .

Nel caso del canale circolare, si ricava:

$$K_r \cong 0.00023 \cdot \frac{Q}{h^2 B} \tag{89}$$

mentre, per il canale rettangolare, si ottiene:

$$K_r \cong 9 \cdot 10^{-6} \frac{Q}{h^{2.6} B^{0.4}} \tag{90}$$

Disponendo su assi cartesiani i valori di K_r misurati negli esperimenti e quelli calcolati con le precedenti relazioni, si verifica una più che buona corrispondenza fra i due set di dati. Tutti i punti rientrano nella fascia d'errore massima di $\pm 20\%$.

Analizzando nel dettaglio i risultati, si è osservato che nel caso degli esperimenti su canale circolare solo cinque dati (corrispondenti al 10 % del campione) hanno uno scostamento pari alla prefissata soglia, mentre altri 18, corrispondenti al 36 % del campione, presentano uno scostamento massimo dell'ordine del 10 %; i restanti dati, circa il 60% del campione, rientrano in una fascia d'errore inferiore al 10%.

Nel caso di canale rettangolare, la situazione è ancora migliore, essendo solo due i dati che hanno uno scostamento che si aggira intorno al 10 %, mentre gli altri sono inferiori al 5%.

I grafici in Figura 29 e Figura 30 evidenziano quanto detto.

E' qui utile osservare che i dati provenienti dalle sperimentazioni su canale rettangolare di Moog&Jirka sono in numero ridotto e, quindi, non si ha a disposizione una casistica ampia. Parimenti, i dati di Balemèr&Tagizadeh Nassèr, su canale semicircolare, risentono del fatto che la stima di K_r in laboratorio è afflitta da un presumibile errore dovuto al mancato raggiungimento della completa riossigenazione, come già evidenziato nel paragrafo 2.4.4.

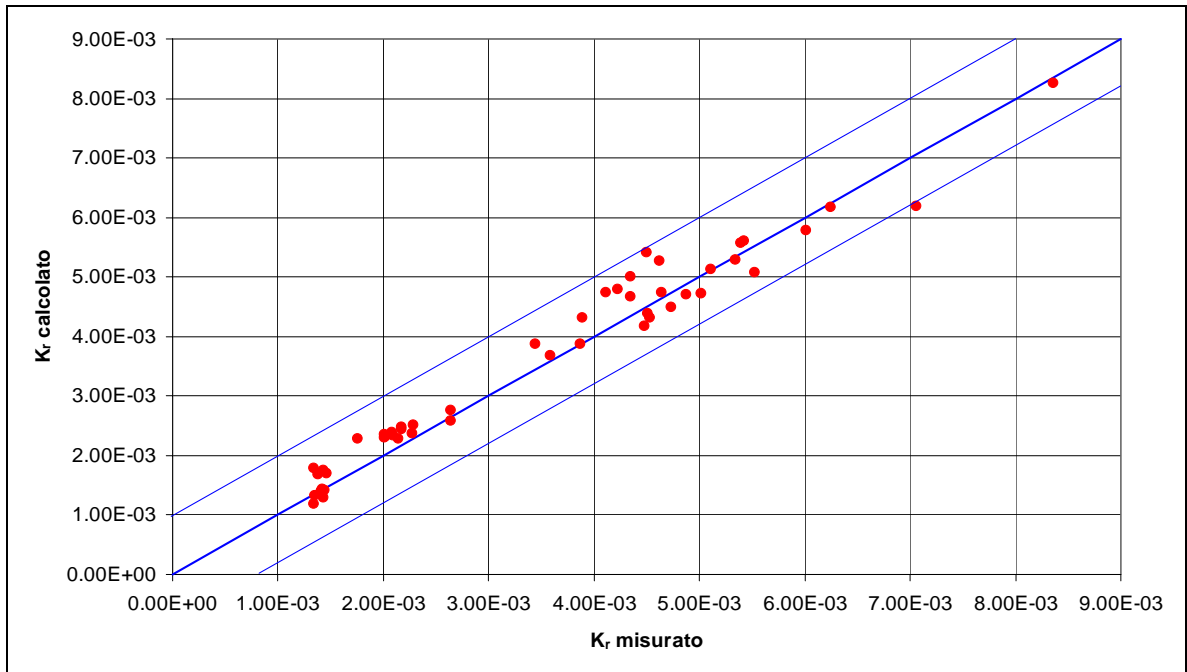


Figura 29: Grafico di correlazione K_r misurato - K_r calcolato per i dati di Balmèr e Tagizadeh Nassèr

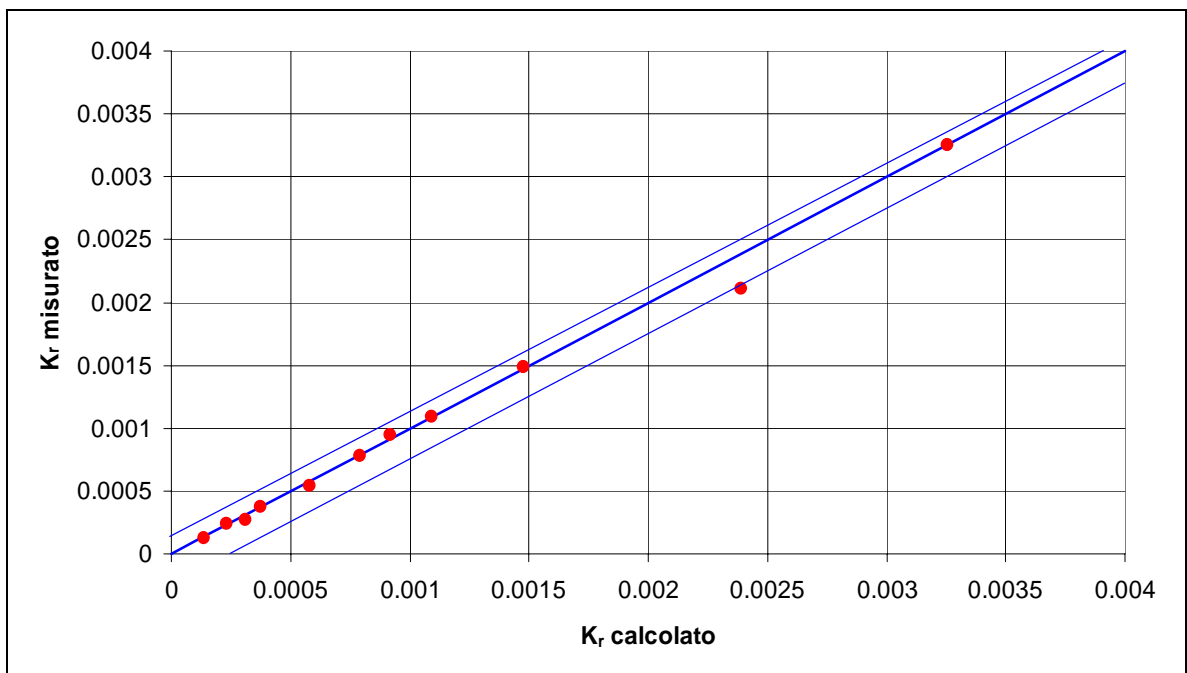


Figura 30: Grafico di correlazione K_r misurato - K_r calcolato per i dati di Moog&Jirka

2.5.7. Rielaborazione dei dati dell'U.S.G.S.

L'applicazione dello schema ricavato dalla precedente analisi dimensionale ai dati dell'U.S.G.S. (1976-1996) è stata preceduta da una valutazione preliminare consistente in un filtraggio dei dati, per verificare quali potessero essere compatibili con lo schema di interesse per questo lavoro.

Si è controllato, in particolare, che le condizioni di moto che si verificavano all'interno dei corsi d'acqua monitorati fossero compatibili con quelle riprodotte in laboratorio, decidendo di considerare la pendenza del fondo alveo (o della linea dell'energia quando questa fosse considerata) la discriminante per la scelta.

Sono stati, allora, fissati tre valori soglia di pendenza, corrispondenti a 0.1%, 0.5% e 1.0%, contati i dati e indagata la correlazione per quelli che avessero valori di pendenza maggiori o uguali alla soglia.

La relazione(86) è stata ricercata per tre diversi insiemi di dati:

- il primo contenente tutto il set dei 255 dati (corrispondente a circa il 52% dei dati contenuti nel database) analizzati relativi a tratti con pendenza superiore allo 0.1%;
- il secondo contenente 62 osservazioni (corrispondente a circa il 13% dei dati contenuti nel database) relativi ai tratti con pendenze superiori allo 0.5%;
- il terzo contenente i valori di 17 osservazioni (corrispondete a circa il 3.5% dei dati contenuti nel database) relativi ai tratti con pendenze superiori all'1.0%.

La relazione fra le variabili adimensionali prima definite ha restituito i seguenti valori dei coefficienti di correlazione.

- Per il primo raggruppamento di dati, relativo a pendenze superiori allo 0.1%, si è ottenuto $\alpha = 0.0015$ e $\beta \cong -1.5125$, con coefficiente di correlazione $R^2=0.76$ (Figura 31).
- Per il secondo raggruppamento di dati, relativo a pendenze superiori allo 0.5%, si è ottenuto $\alpha = 0.0017$ e $\beta \cong -1.4058$, con coefficiente di correlazione $R^2=0.83$ (Figura 32).
- Per il terzo raggruppamento di dati, relativo a pendenze superiori all'1.0%, si è ottenuto $\alpha = 0.001$ e $\beta \cong -1.1927$, con coefficiente di correlazione $R^2=0.81$ (Figura 33).

I grafici evidenziano una similitudine nella forma affusolata con cui i punti si dispongono sul grafico, bene interpolati dalla curva di potenza. Le correlazioni trovate con l'analisi dimensionali riescono dapprima a rappresentare correttamente il fenomeno riossigenativo anche utilizzando dati provenienti da misure su campo.

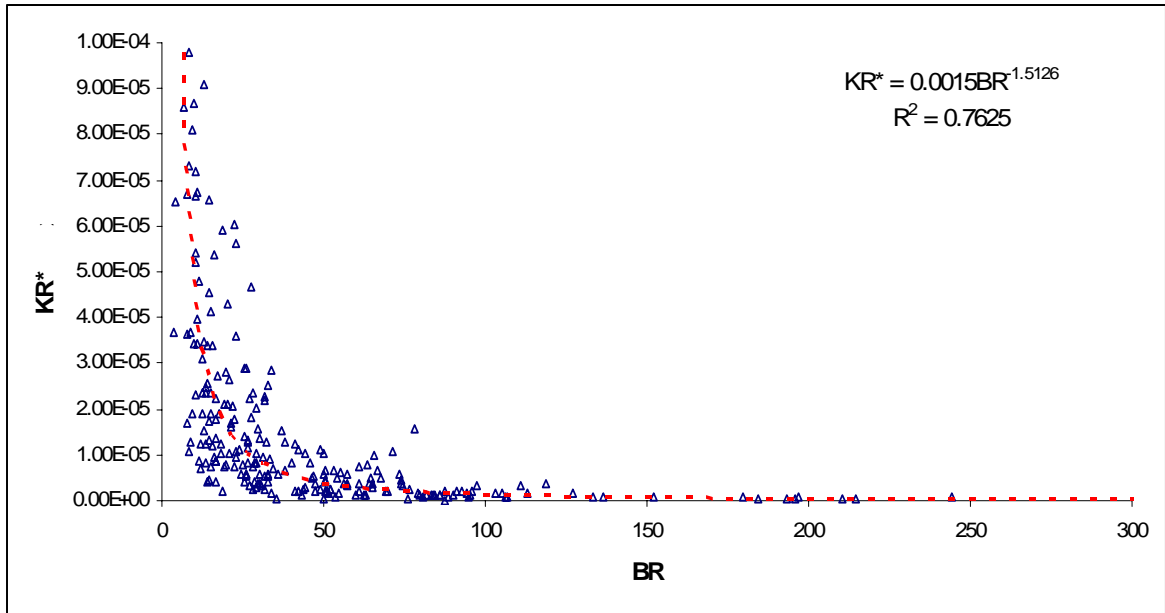


Figura 31: Grafico della correlazione fra KR* e BR, pendenze superiori allo 0.1% - Dati U.S.G.S.

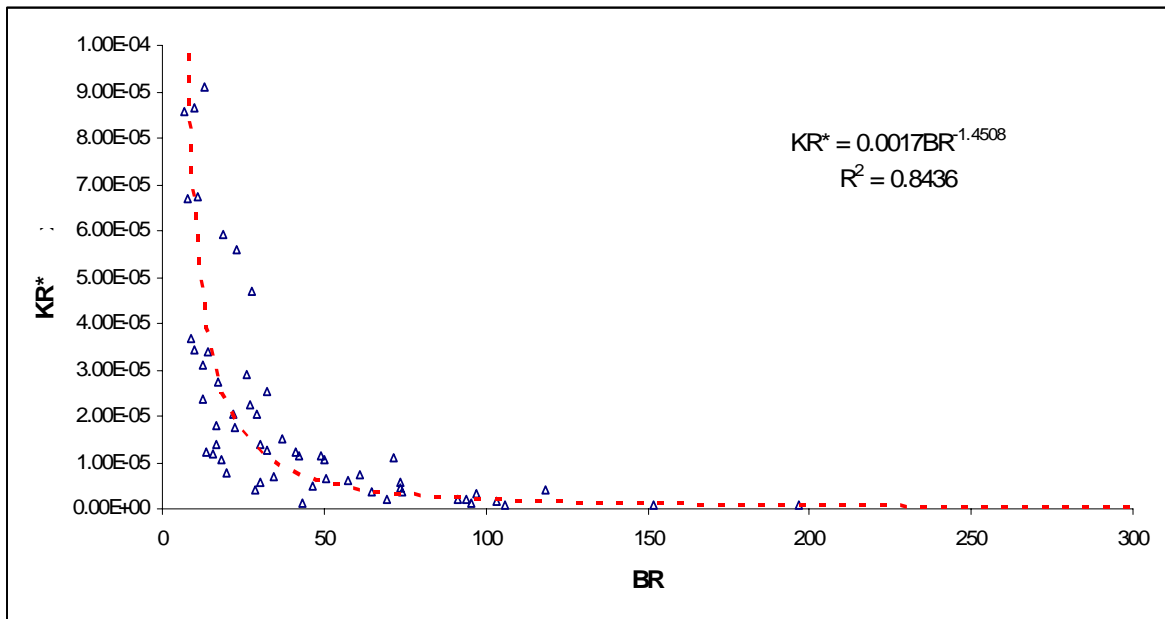


Figura 32: Grafico della correlazione fra KR* e BR, pendenze superiori allo 0,5% - Dati U.S.G.S.

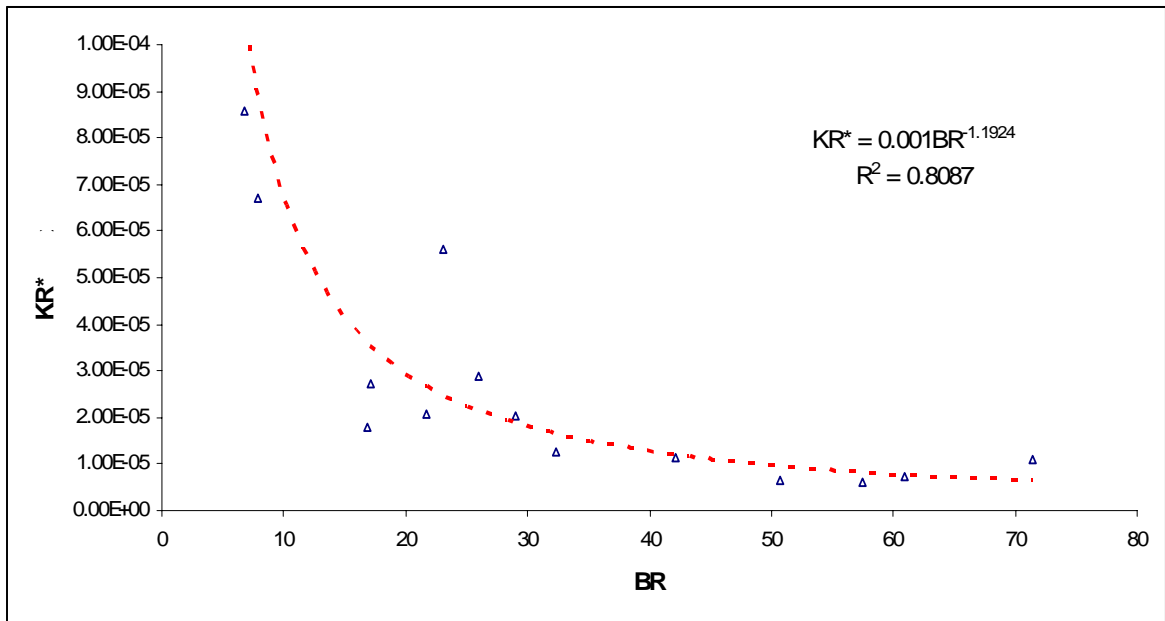


Figura 33: Grafico della correlazione fra KR* e BR, pendenze superiori all'1,0% - Dati U.S.G.S.

2.5.8. *Rassegna delle formule di letteratura*

Gli schemi e le relazioni descritte in precedenza rappresentano solo una piccola, ma importante, parte del voluminoso insieme di formule, soprattutto di origine empirica, contenute nella letteratura.

Con una ricerca bibliografica condotta preliminarmente allo studio sperimentale, si sono analizzate oltre 50 pubblicazioni scientifiche che, in un lasso di tempo di quasi 40 anni hanno documentato circa 130 formule di calcolo del coefficiente di riossigenazione.

Alcune di queste risultano essere aggiornamenti di espressioni precedentemente determinate dagli stessi autori sulla scia di nuove risultanze sperimentali in laboratorio e/o in situ.

Sulla base di quanto detto in precedenza, è possibile classificare l'intero complesso di formule in due categorie:

1. formule teoriche e semi empiriche, ricavate dall'applicazione degli schemi concettuali della riossigenazione, eventualmente tarati attraverso dati di campo e/o di laboratorio;
2. formule sperimentali, ricavate da regressioni su dati di campo e/o di laboratorio.

Dare un giudizio di affidabilità delle varie formulazioni è estremamente difficile, in quanto molto spesso non sono indicate le condizioni al contorno sulle quali sono state ricavate le

formule, anche perché in alcuni casi non si è riusciti a rintracciare la pubblicazione originale degli autori e, spesso, neanche le fonti di riferimento sicuro, in quanto le espressioni sono all'interno di tabelle riepilogative di report generali.

In Appendice1 al presente lavoro sono riportate tutte le formule trovate, ordinate per anno di pubblicazione dell'articolo su cui sono state rinvenute e con l'indicazione degli autori.

Le formule teoriche e semi-empiriche

La caratteristica fondamentale delle formule teoriche risiede nella presenza della diffusività molecolare tra i parametri di riferimento.

Gli altri parametri maggiormente rappresentati sono:

- Tirante (h);
- Velocità media (U);
- Pendenza (i).

Nella tabella in Allegato1 corrispondono alle formule n°: 1, 2, 23, 25, 48, 49, 50, 51, 58.

Le formule sperimentali

Le formule sperimentali, come già anticipato, sono caratterizzate dall'essere il risultato di regressioni multiparametriche.

Le variabili utilizzate sono di solito molto semplici da ricavare anche se, talvolta, le espressioni contengono parametri idraulici fra loro stessi correlati, segno di una mancanza di analisi dimensionale del fenomeno.

Sono state individuate quattro classi principali di formulazioni:

1. Formule riconducibili all'espressione: $K_r = \alpha U^\beta h^\gamma J_E^\delta$;
2. Formule dipendenti da portata e raggio idraulico;
3. Formule costruite su parametri a-dimensionali;
4. Formule dipendenti da altri parametri.

Le formule della prima classe sono quelle con i corrispondenti numeri:

4, 6, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 26, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 42, 43, 44, 52, 53, 54, 55, 60, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 94, 95, 96, 97, 99, 103, 108, 109, 110, 112, 120, 121, 124.

Alla seconda classe corrispondono le formule con i seguenti numeri:

65, 66, 113, 121, 125.

Analogamente, le formule appartenenti alla terza classe sono:

5, 9, 10, 13, 45, 46, 47, 75, 76, 83, 84, 85, 95, 102, 106, 107, 111, 115, 116, 117, 118, 122, 123, 126, 127.

Infine alla quarta classe sono riconducibili le formule con i seguenti numeri:

29, 39, 59, 61, 62, 63, 64, 68, 90, 100, 101, 114, 27, 28.

2.5.9. *Le formule di letteratura di maggiore uso*

Lo studio e l'applicazione decennale delle formule predittive del coefficiente di riossigenazione prima esposte ha permesso di selezionare tre espressioni, in particolare, in tre diversi campi di validità, che, allo stato attuale delle conoscenze, hanno restituito i migliori risultati.

Tutte e tre le relazioni sono riconducibili all'espressione $K_r = \alpha U^\beta h^\gamma$ e sono:

$$- \text{O'Connor \& Dobbins: } K_r = 3,93 \frac{U^{0,5}}{h^{1,5}} \quad (91)$$

$$- \text{Churchill: } K_r = 5,026 \frac{U}{h^{1,67}} \quad (92)$$

$$- \text{Owen and Gibbs: } K_r = 5,32 \frac{U^{0,67}}{h^{1,85}} \quad (93)$$

La formula di O'Connor&Dobbins ha un ampio campo di applicabilità; rappresenta, infatti, lo standard di riferimento per la determinazione del coefficiente di riossigenazione. La formula di Churchill è, invece, particolarmente adatta per fiumi con velocità maggiori, mentre quella di Owen&Gibbs è valida in un campo di applicazione per fiumi con tiranti idrici e velocità minori. Nella seguente Figura 34 in un abaco sono riassunti i campi di validità delle tre formule.

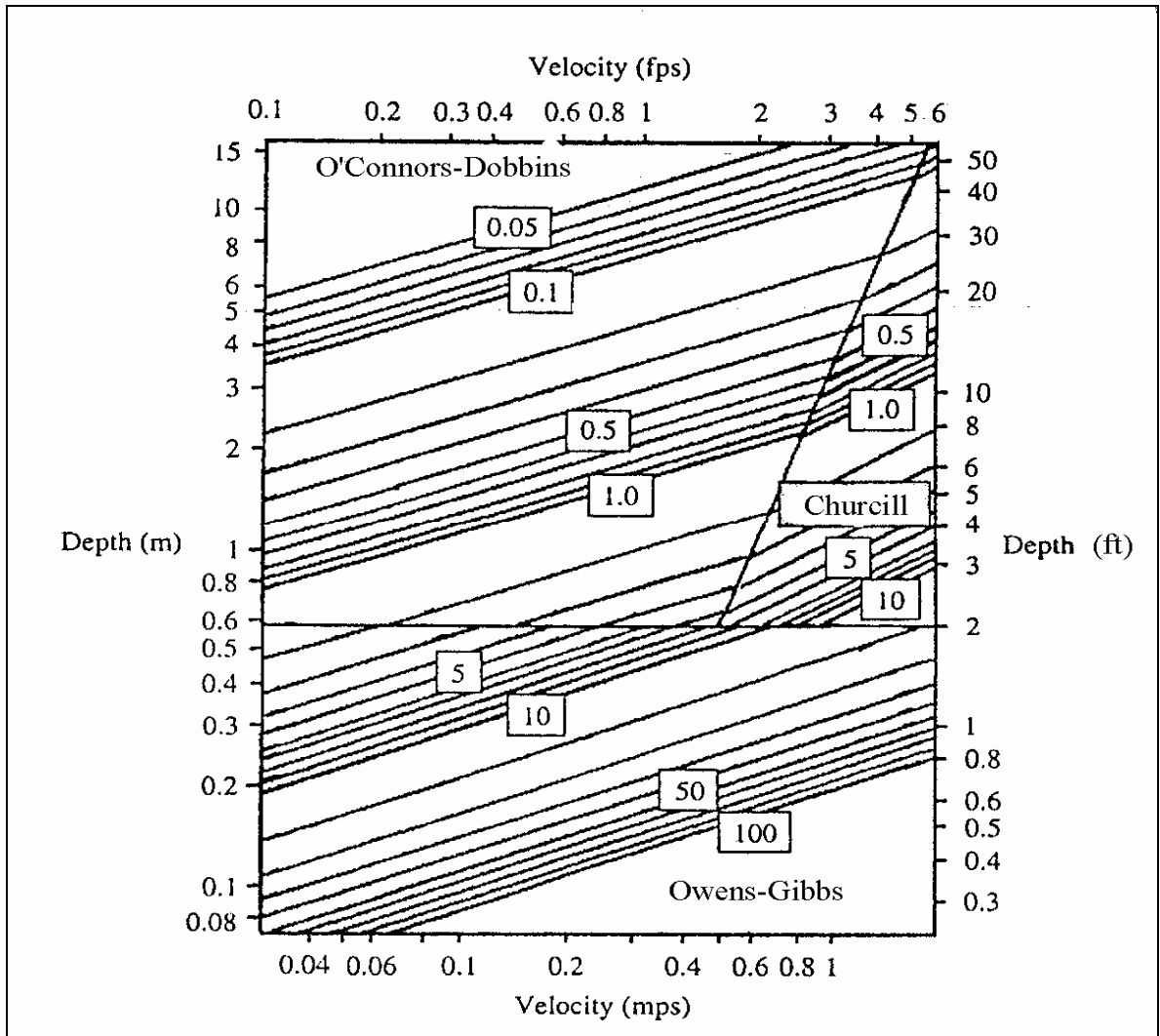


Figura 34: Campo di validità delle formule di riossigenazione (Chapra, 1997)

3. L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE DI LABORATORIO CONDOTTA ALL'UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

INTRODUZIONE

L'attività sperimentale alla base del lavoro di ricerca, di cui la presente tesi di dottorato costituisce una tappa importante, ha inizio in seno al Dipartimento di Difesa del Suolo "V.Marone" dell'Università della Calabria nell'anno 2000 (De Filpo et al., 2000), all'indomani dell'entrata in vigore del D.L.vo 152/99.

L'attività di ricerca ha mosso i primi passi sulla scia delle nuove procedure di monitoraggio dei corsi d'acqua e, soprattutto, sulla previsione di istituzione di Piani di Tutela dei corpi idrici da redigersi anche in funzione dalle loro capacità autodepurative.

L'applicazione delle relazioni di letteratura aveva evidenziato un loro difetto di interpretazione dei fenomeni che si verificano nei corsi d'acqua calabresi spesso con pendenze elevate e tiranti idrici relativamente bassi.

I primi tentativi di definire nuove relazioni si sono basati su misurazioni di campo, concentrandosi sul tratto montano del fiume Lao e sul tratto del fiume Crati che attraversa la città di Cosenza.

Difficoltà logistiche, legate soprattutto al censimento degli scarichi e alla quantificazione della massa organica attiva presente sulle golene, rappresentata oltre che da vegetazione anche da rifiuti di ogni tipo, hanno spinto il gruppo di ricerca a concentrarsi su indagini di laboratorio, cercando configurazioni geometriche e idrauliche compatibili con le caratteristiche dei fiumi calabresi.

Le prime indagini di laboratorio sono state condotte su un canale di forma rettangolare in dotazione del Laboratorio Grandi Modelli Idraulici del Dipartimento di Difesa del Suolo, concepito per studi di tipo prettamente idraulico e, perciò, poco adatto all'implementazione di prove a sfondo ambientale. I primi risultati (Veltri et al., 2004, Veltri et al. 2005), comunque, sono stati incoraggianti e hanno spinto il gruppo di ricerca a investire nella

continuazione di questo filone sperimentale e a perfezionare l'apparato sperimentale, spinti anche dalla consapevolezza del deficit di dati presenti in letteratura.

Un'importante intuizione che risale a quelle sperimentazioni è data dalle modalità di calcolo di K_r , meglio descritta nel precedente paragrafo 2.4.1, attraverso la quale è stato possibile analizzare velocemente e correttamente una gran mole di dati.

Questi dati, però, erano viziati da imprecisioni dovute sia a carenze strutturali, meglio precisate nel prossimo paragrafo 3.1, sia a limiti elaborativi connessi all'aumento della temperatura durante le prove.

Grazie al finanziamento PRIN-COFIN 2005 a titolo "Caratterizzazione teorica e sperimentale dell'impatto sui corsi d'acqua ricettori degli inquinanti conservativi e non conservativi veicolati dalle acque meteoriche urbane" è stato possibile porre in essere un nuovo apparato sperimentale, superando i problemi di carattere strumentale.

La certezza di avere dati affidabili ha permesso anche di indagare meglio sugli effetti della variazione di ossigeno disciolto in funzione dell'aumento di temperatura durante la prova, permettendo di raffinare ulteriormente le elaborazioni secondo modalità originali nel panorama della letteratura tecnico-scientifica.

3.1. DESCRIZIONE DEL PRIMO APPARATO SPERIMENTALE

I primi esperimenti condotti all'interno del Laboratorio Grandi Modelli Idraulici del Dipartimento di Difesa del Suolo sono stati eseguiti su un apparato sperimentale costituito da (Figura 35):

1. una canaletta rettangolare con pareti in plexiglass di larghezza $B=48$ cm, lunghezza $L=11$ m e altezza $H_C=50$ cm, montata su di una struttura reticolare in acciaio, poggiata su due martinetti che ne permettono la variazione di pendenza;
2. un controfondo in PVC di lunghezza 10.5 m e due strisce di PVC di altezza 15 cm poggiate sulle pareti, con il contorno reso artificialmente scabro con l'applicazione di sabbia a granulometria uniforme, con $d_{50}=0.5$ mm;
3. un cassone d'acciaio, dalla capacità di 2000 l, alto 1.30 m;
4. una tubazione in PVC ($\varphi=100$ mm) collegante il cassone con la testa della canaletta;

5. una pompa a bassa prevalenza con portata massima di 30 l/s inserita nella tubazione;
6. quattro idrometri a punta manuali;
7. un misuratore di portata ultrasonico;
8. un ossimetro digitale con termometro e barometro incorporati;
9. una bilancia digitale.

Questo apparato, originariamente non destinato alla sperimentazione sui processi riossigenativi, aveva alcune carenze, che hanno negativamente condizionato l'attività sperimentale e i risultati ottenuti. In particolare si riscontravano:

1. ridotta capacità di definire con precisione la pendenza di prova;
2. difficoltà di individuare con precisione la portata di prova;
3. presenza di una significativa discontinuità idraulica che contribuiva ad accelerare il processo riossigenativo.



Figura 35: Strumentazione del primo apparato sperimentale

3.2. PROGETTO E REALIZZAZIONE DEL NUOVO APPARATO SPERIMENTALE

Allo scopo di superare le difficoltà intrinseche del vecchio apparato sperimentale, nel 2006 è stata installata una nuova apparecchiatura, ottimizzata per lo studio dei processi riossigenativi, nell'ambito del progetto di ricerca PRIN-COFIN 2005 "Caratterizzazione teorica e sperimentale dell'impatto sui corsi d'acqua ricettori degli inquinanti conservativi e non conservativi veicolati dalle acque meteoriche urbane".

In particolare sono state previste le seguenti migliorie:

1. prolungamento del canale per permettere il raggiungimento della condizione di moto uniforme;
2. inserimento di un pistone a olio per facilitare le operazioni di variazione della pendenza;
3. eliminazione del salto dal canale alla vasca di valle, garantendo la continuità idraulica;
4. minimizzazione dei volumi delle vasche per limitare gli effetti di ristagno;
5. inserimento di un misuratore di portata elettromagnetico fisso in modo da limitare gli errori di taratura.

3.2.1. *Progettazione della nuova canaletta*

La progettazione della nuova canaletta ha avuto come obiettivo la minimizzazione degli effetti negativi sugli studi di riossigenazione, senza, altresì, trascurare l'efficienza idraulica dell'installazione.

Si è prevista la costruzione di una trave lunga 15 m, per permettere il raggiungimento della condizione di moto uniforme alla corrente liquida fluente nel canale da porre sopra la trave stessa, alta 1.20 m per limitare al massimo le frecce dovute ai carichi distribuiti, larga 50 cm, con la possibilità di mantenere la pendenza costante.

A monte e a valle della canaletta sono stati previsti due cassoni, il primo di dimensioni 1.0 x 1.0 x 0.5 m³, poggiato direttamente sulla trave, più un pozzetto 0.5 x 0.4 x 0.4 m³ direttamente connesso alla condotta di mandata (Figura 36 e Figura 37), il secondo delle

dimensioni $2.15 \times 1 \times 0.6 \text{ m}^3$, più un pozzetto uguale a quello della vasca di monte che permette di lasciare sempre in pressione la condotta di avvicinamento alla pompa.

La condotta di ricircolo, all'interno della quale è previsto l'innesto della pompa, è stata prevista in PVC DN 125, opportunamente raccordata con curve e giunzioni flessibili.

In corrispondenza della pompa, che ha ingresso DN100, è stata prevista una riduzione in ghisa flangiata; l'innesto della condotta dall'uscita della pompa, anch'essa DN100, è prevista con un manicotto in PVC DN 100, flangiato in testa e raccordato alla condotta DN 125 con un opportuno pezzo speciale.

Allo sbocco del cassone di monte è stata prevista una "T", nel punto più depresso del sistema, per permetterne un agevole svuotamento.

Nelle successive Figura 38 e Figura 39 è possibile visionare la struttura complessiva in un modello tridimensionale.

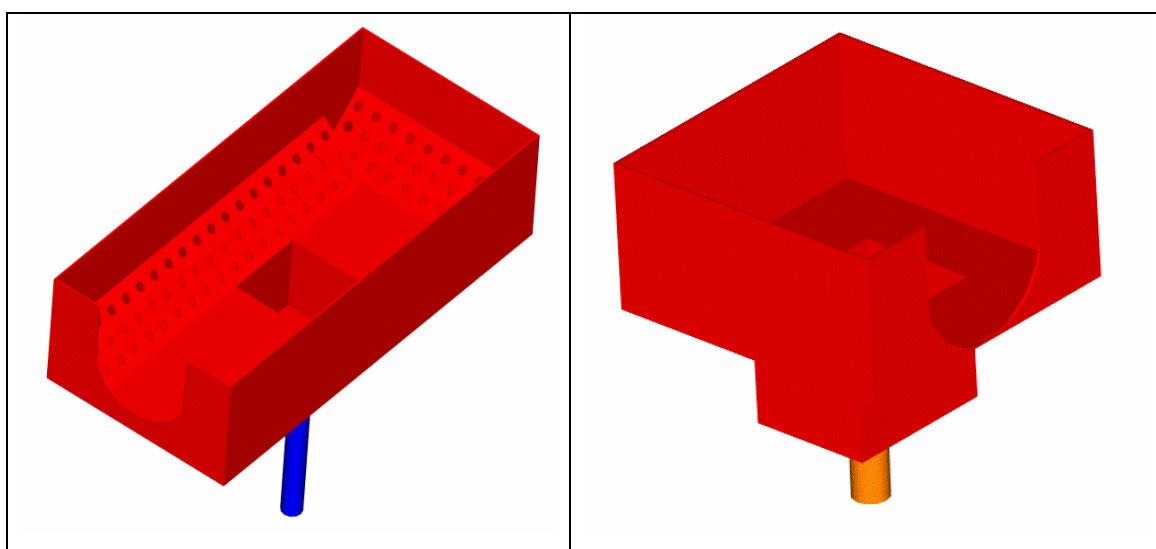


Figura 36: Vasca di valle e di monte

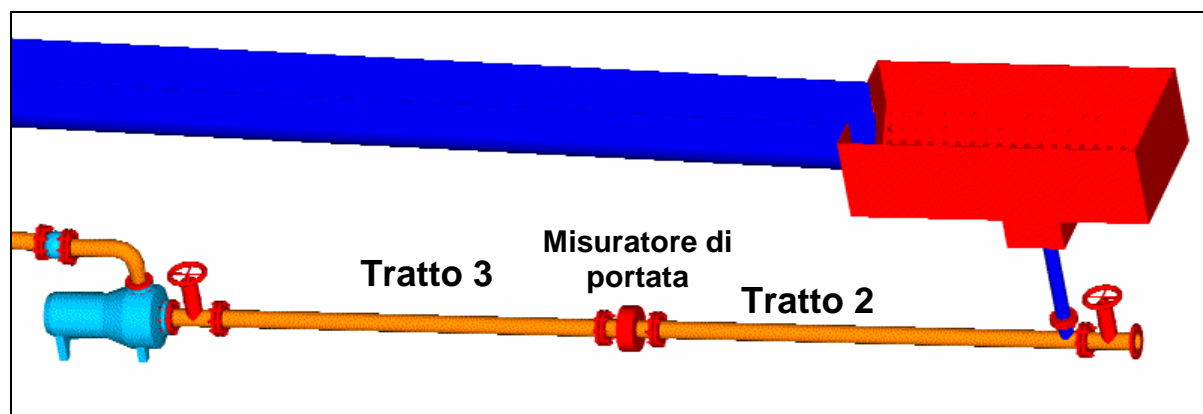


Figura 37: Particolare dello sbocco vasca di valle

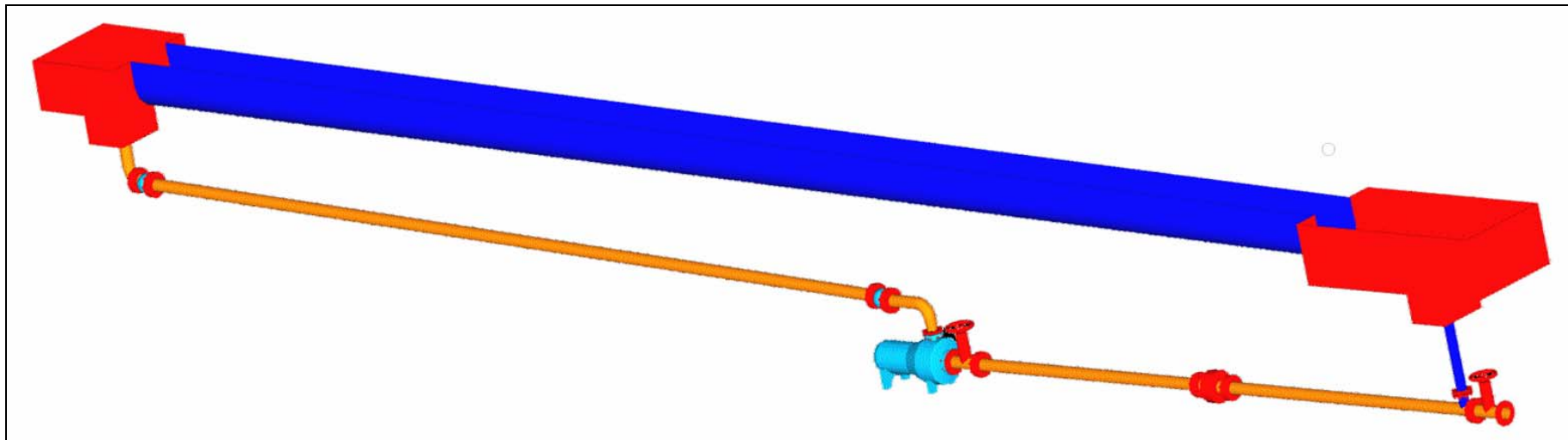


Figura 38: Modello 3D del canale con sezione semicircolare

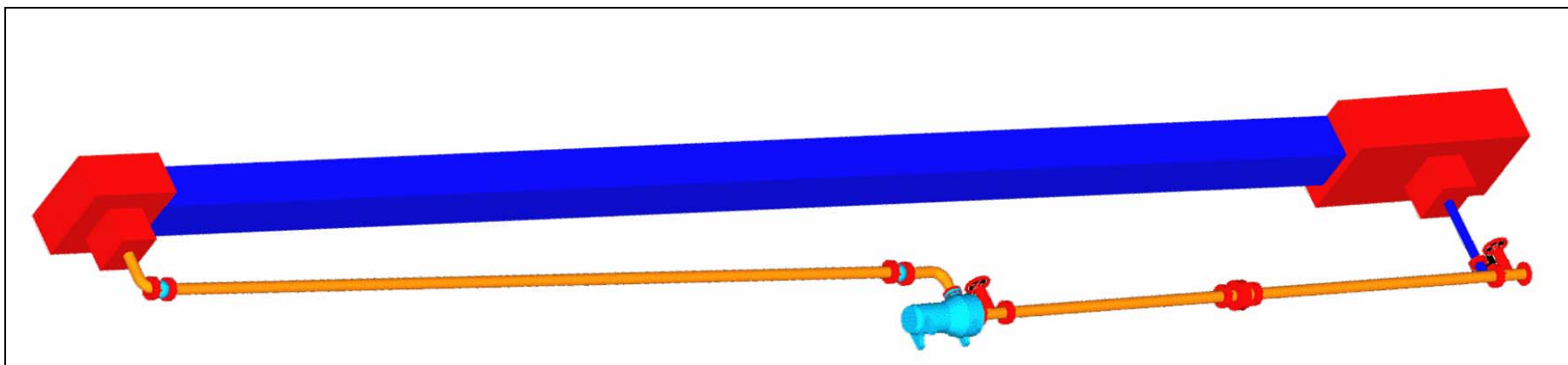


Figura 39: Modello 3D del canale con sezione rettangolare

3.2.2. Realizzazione e montaggio della nuova canaletta

Le operazioni di montaggio (Figura 40) hanno riguardato l'assemblaggio delle seguenti componenti:

- la trave in acciaio;
- le vasche di accumulo a monte e a valle;
- l'impianto di sollevamento.
- il canale di deflusso della corrente.

La trave reticolare in acciaio è suddivisa in tre tronchi da 5 m di lunghezza ognuno, collegati fra loro con spinotti e fazzoletti in acciaio, stretti da 12 bulloni anch'essi in acciaio da 14 mm di diametro per giunzione.

Le travi e i cassoni sono state portati all'interno del capannone, precedentemente sgomberato, con mezzi meccanici (muletto e transpallet) e fissati a terra con bulloni a espansione.



Figura 40: Operazioni di montaggio

In primo luogo si sono trasportate le componenti all'interno del capannone, in modo da renderle immediatamente fruibili agli operai. Il montaggio della trave è stato condotto procedendo da monte verso valle, avendo le tre travi caratteristiche diverse per ogni posizione. Nel tratto a monte, infatti, è presente l'alloggiamento del martinetto pneumatico che permette il sollevamento della trave e quindi la definizione delle diverse pendenze di prova. Il martinetto è costituito da un serbatoio contenente olio sintetico, azionato da una pompa manuale, e da un pistone sollevato dall'olio in pressione. In corrispondenza del castello di alloggiamento del pistone è stata sistemata un'asta graduata, utile per visualizzare facilmente le pendenze di prova. La pendenza (espressa in percentuale) è stata determinata dal rapporto fra l'innalzamento in corrispondenza del martinetto e la lunghezza fra il martinetto e la cerniera di rotazione a valle. Il tratto intermedio della trave è caratterizzato dalla presenza di un giunto "femmina" dal lato di monte e "maschio" verso valle. Il tratto terminale di valle, invece, è caratterizzato dalla presenza di una cerniera (Figura 41) alla base, per garantire la possibilità di rotazione attorno a un punto fisso.

Per permettere l'incastro dei diversi tratti della trave è stato necessario provvedere alla posa in opera di grasso sui giunti e il sollevamento relativo dei tratti fino al perfetto allineamento, mentre l'avvicinamento è stato realizzato con l'ausilio di due catene in acciaio connesse da un moschettone la cui rotazione permetteva elevata precisione. La vasca di accumulo di monte poggia direttamente sulla trave è quindi ad essa solidale nella rotazione. La sua disposizione è stata tale che i fori del supporto, direttamente connesso alla trave, e della vasca medesima si allineassero perfettamente. La giunzione è stata garantita attraverso il serraggio di viti e relativi dadi del diametro di 16 mm.



Figura 41: Particolari della cerniera

La vasca di accumulo di valle (Figura 42) è caratterizzata dall'aver un supporto autonomo rispetto alla trave, composto da un castello di travi HE da 100 mm d'altezza. Il posizionamento è avvenuto in adiacenza al tratto terminale della trave in modo da lasciare 6 cm di gioco, per permettere la rotazione del canale successivamente montato sulla trave in acciaio.

La vasca è idraulicamente connessa al circuito di ricircolo attraverso una condotta in acciaio inserita in un'altra in PVC dal diametro $D=125$ mm che termina in una "T" dalla quale partono due uscite, una che procede allo scarico in un pozzetto (Figura 43) e l'altra verso la pompa di sollevamento.



Figura 42: Particolare vasca di accumulo di valle



Figura 43: Particolare dello scarico e della "T"

L'impianto di sollevamento (Figura 44) è composto, secondo le indicazioni progettuali, dalle seguenti componenti:

1. tubo raccordo dalla vasca di valle flessibile in PeaD, DN 100;
2. tubo di arrivo alla pompa in PVC DN 100;
3. pompa centrifuga da 3 kW, DN=100 in ingresso e DN=125 in uscita;

4. curva in acciaio dalla pompa alla saracinesca;
5. saracinesca in ghisa sferoidale, DN 125;
6. tubo di mandata in PVC, DN 125;
7. tubo raccordo con la vasca di monte flessibile in PeaD, DN 100.

La tubazione di mandata in PVC DN=125 è stata appoggiata su selle in acciaio dall'altezza regolabile, fissate a terra con opportune viti a espansione, distanziate circa 1.5 m fra loro.

In posizione mediana è stato disposto un misuratore di portata elettromagnetico (Figura 45), collegato alla tubazione di mandata attraverso due flange in ghisa sferoidale e alimentato dalla corrente elettrica da 220 V con una messa a terra opportunamente realizzata.

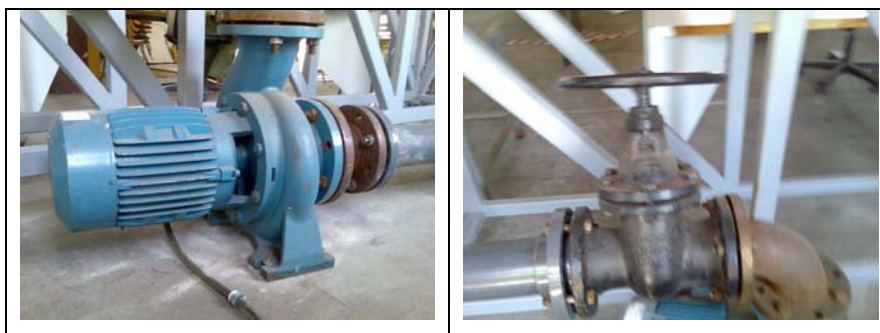


Figura 44: Particolare della pompa sommersa e della saracinesca



Figura 45: Misuratore di portata elettromagnetico

La connessione fra il tubo di mandata e il cassone di monte (Figura 46) è realizzato attraverso una curva in PVC che collega il tubo flessibile a una tubazione in PVC che si introduce direttamente nel cassone.



Figura 46: Particolare del giunto al cassone di monte

Il canale di deflusso della portata è stato realizzato, in una prima fase, con la posa in opera di una tubazione in PVC, tagliata in mezzeria longitudinalmente. Le tubazioni hanno lunghezza di 6 m, per cui, al fine di coprire la lunghezza di 15 m, sono stati predisposti dei giunti orizzontali, sfruttando le sagomature della tubazione. La posa è avvenuta procedendo da valle verso monte, curando al meglio la connessione con la vasca di valle, punto estremamente delicato per via della rotazione del canale. Il giunto (Figura 47) è stato realizzato posizionando, in corrispondenza dell'apertura della vasca, un tappo costituito da una lastra in PVC, opportunamente sagomata per accogliere uno spezzone di tubazione DN=500 e facilitare l'ingresso della tubazione di arrivo. Fra le due teste di tubo circolare è stato frapposto uno strato di gomma, sufficientemente spesso e flessibile, utile a permettere le rototraslazioni del canale indotte dalla rotazione della trave attorno alla cerniera.

I successivi tronchi di tubazione sono stati posti verso monte e giuntati in corrispondenza dei giunti (Figura 48) predisposti in fase di produzione di tubo. All'interno del giunto è stata frapposta la guaina in gomma in dotazione, incollata per evitare traslazioni e, infine, gli spazi sono stati riempiti con colla speciale per PVC, per assicurare al meglio la tenuta idraulica. Per garantire, infine, la costanza della forma circolare della sezione semicircolare, sono stati costruiti dei puntoni in legno (Figura 48), incastrati nel bordo superiore della sezione medesima. Il fondo del canale è stato modificato con la posa di sabbia a granulometria uniforme ($d_{50}=0.25$ mm e successivamente $d_{50}=3$ mm), fissate a questo con stesa di colla a presa in acqua.



Figura 47: Particolare giunto di immissione nella vasca di valle



Figura 48: Particolare giunto tubazione di deflusso, dei puntoni in legno e della sabbia

La posa del canale è avvenuta su opportune selle d'appoggio per limitare le inflessioni dovute al peso proprio e dell'acqua contenuta all'interno.

La connessione con il cassone di monte è stata garantita attraverso la frapposizione, in corrispondenza dell'apertura del cassone medesimo, di un tappo costituito da una lastra in PVC opportunamente sagomato per accogliere la sezione circolare. Contrariamente alla vasca di valle non è stato necessario costruire un giunto, essendo sufficiente garantire la tenuta idraulica. Un ultimo particolare degno di menzione è il posizionamento nelle vasche di monte e valle di griglie in legno (Figura 49 e Figura 50) per la dissipazione delle turbolenze che si generano sul pelo libero.

L'approvvigionamento idrico è garantito dall'acquedotto comunale attraverso la presenza di un'autoclave (Figura 51) esterna per compensare le eventuali mancanze d'acqua e le pressioni di esercizio.



Figura 49: Particolare dell'imbocco dalla vasca di monte



Figura 50: Griglie di dissipazione nella vasca di monte e di valle



Figura 51: Autoclave esterno e impianto idraulico interno al capannone

L'impianto interno era già presente e, al fine di accelerare le operazioni di riempimento, sono stati collegate tutte le uscite disponibili (nel numero di 5) attraverso tubi in gomma dal diametro di $\frac{1}{2}$ di pollice (Figura 52). Questi tubi indirizzano l'acqua all'interno di un cassone da 3000 l posto in adiacenza al cassone di monte, nel quale l'acqua viene convogliata attraverso una pompa sommersa e una tubazione in gomma da 2 pollici.

Il primo set di prove è stato condotto su un canale di forma semicircolare, montato in un periodo immediatamente successivo al montaggio della struttura e di tutta la componentistica idraulica.



Figura 52: Particolari dei tubi insistenti sui cassoni

Una volta esaurita la fase di prove su sezione circolare si è provveduto a smontare questa e a montare la sezione rettangolare.

La sezione rettangolare è stata costituita da pannelli di PVC dello spessore di 2 cm per il fondo e 0.5 cm per le sponde (Figura 53), poggiate su due angolari preventivamente saldate sulla struttura e sorrette da piedritti distanti un metro l'uno dall'altro (Figura 54). Le sponde sono state costituite da una successione di due pannelli dell'altezza di 40 mm, uniti fra loro in modo che quello interno potesse essere staccato per facilitare la variazione di scabrezza (Figura 55). Le sponde, infine, sono assicurate in sommità dalla presenza di un asse in legno (Figura 56) a cui sono state fissate, con viti autofilettanti e la costanza della larghezza è garantita da puntoni in legno (Figura 57).

Una particolare cura è stata data alla sezione di imbocco, in quanto la presenza di una brusca discontinuità di sezione fra il cassone di monte e il canale provocava un'intensa attività di vortici tipici delle perdite di imbocco per brusco allargamento. Sono state, allora, fissati due fogli di PVC della stessa altezza del canale, dall'imbocco fin dentro la vasca, in modo da permettere un graduale restringimento della sezione di imbocco (Figura 58); si è avuta cura di evitare che si generassero a tergo di questi pannelli, delle zone a debole ricambio idrico che potessero falsare i risultati delle prove di riossigenazione.



Figura 53: Pannelli di PVC per la sezione rettangolare



Figura 54: Angolari e piedritti di appoggio alla sezione rettangolare



Figura 55: Sezione rettangolare di deflusso



Figura 56: Fissaggio in testa delle sponde



Figura 57: Particolare dei punti



Figura 58: Particolare dell'imbocco

3.3. ANALISI IDRAULICA DELLE ESPERIENZE DI LABORATORIO

Il primo passo per confermare con sperimentazioni le ipotesi fatte sulla possibilità di trovare un legame funzionale di tipo adimensionale è quello di caratterizzare le prove dal punto di vista idraulico. Partendo dai dati misurati, principalmente portata, tirante idrico e temperatura, è necessario ricavare tutte le grandezze derivate caratteristiche del moto, anche per individuare il campo di applicabilità delle successive relazioni.

La singola prova, indicata da un numero d'ordine, è identificata da un valore di scabrezza, fisicamente ottenuta incollando sulle pareti dell'alveo sperimentale sabbia con diametro pressoché costante, come descritto nella sezione relativa alla fase di montaggio e di un valore di portata letto su misuratore elettromagnetico e di un'assegnata pendenza di fondo. Le prove eseguite hanno riguardato in totale due sezioni trasversali di deflusso, due scabrezze, sei pendenze e cinque portate.

Per quanto riguarda le sezioni di deflusso sono state considerate una sezione circolare, con diametro $D=50$ cm e una sezione rettangolare, con larghezza corrispondente alla larghezza della superficie libera $B=40$ cm.

Per quanto riguarda le scabrezze, sono stati considerati campioni di sabbia con $d_{50}=0.25$ e 3.0 mm, le pendenze 0.5 , 1.0 , 1.5 , 2.0 , 2.5 , 3.0 % e le portate 5 , 10 , 15 , 20 , 25 l/s.

Ciascuna prova ha avuto inizio fissando la pendenza desiderata del canale e riempiendo il cassone di valle.

Il volume d'acqua presente nel dispositivo è stato stabilito in funzione del valore di portata e pendenza proprio di ogni prova, facendo in modo di evitare che si verificassero fenomeni di rigurgito dal cassone verso il canale e la formazione di salti dal canale al cassone di valle.

Il riempimento del cassone di valle avviene a mezzo di pompa sommersa con presa in un cassone di appoggio (posto nei pressi dell'impianto) che riveste funzione di compenso, in esso viene, infatti, accumulata l'acqua proveniente dall'autoclave a mezzo di 5 diversi attacchi presenti nel laboratorio. Raggiunto il livello idrico necessario per la prova nella vasca di valle, si aziona l'impianto di sollevamento e si fissa la portata di prova; la sua stabilizzazione, letta grazie a un misuratore elettromagnetico flangiato sul tubo di mandata, avviene agendo su una saracinesca posta all'uscita della pompa.

La sua modulazione permette di generare perdite di carico localizzate al variare delle quali varia l'erogazione della portata. Nel corso di ogni prova sono state effettuate 7 letture di tirante, ognuna delle quali relativa alla singola sezione significativa individuata lungo lo sviluppo del canale sperimentale (Figura 59).



Figura 59: sviluppo longitudinale del canale

La sezione 1 è distante 2 m dal cassone di monte, da questa fino all'ultima le stazioni di rilievo dei dati idraulici sono poste ogni 2 m, mentre dalla settima e ultima sezione fino all'imbocco del cassone di valle intercorre la distanza di 1 m.

La misura del tirante idrico avviene per mezzo di un idrometro manuale a punta con lettura a nonio; per ogni sezione si rilevano le quote relative rispettivamente della superficie libera (z_s) e del fondo dell'alveo sperimentale (z_f) ottenendo il tirante h per differenza:
$$h = z_s - z_f .$$

Noti i tiranti nelle sezioni stabilite si è passati al calcolo delle grandezze idrauliche caratteristiche della sezione.

Per quanto riguarda la sezione semicircolare esse sono:

- grado di riempimento: $\frac{h}{D}$ dove D è il diametro del canale;

- angolo al centro della sezione: $\beta = 2 \arccos\left(1 - 2\frac{h}{D}\right)$ (rad);
- larghezza della superficie libera: $B = D \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$ (m);
- area liquida: $A = \frac{r^2}{2}(\beta - \sin\beta)$ (m^2) dove $r = \frac{D}{2}$ (m);
- perimetro bagnato: $P = \frac{D}{2}\beta$ (m);
- tirante significativo, rapporto fra l'area liquida e la larghezza della superficie libera: $h_s = \frac{A}{B}$ (m);

Per quanto riguarda la sezione rettangolare, esse sono:

- area liquida: $A = B \cdot h$ (m^2);
- perimetro bagnato: $P = B + 2h$ (m);

Per entrambe le sezioni sono state calcolate le seguenti grandezze:

- raggio idraulico: $R_{Hf} = \frac{A}{P} f$ (m), dove f è il coefficiente di forma di Marchi, pari a 0.9 per la sezione semicircolare e 0.8 per la sezione rettangolare larga;
- velocità media, rapporto fra portata e sezione liquida considerando il moto uniforme: $U = \frac{Q}{A}$ (m/s);
- numero di Froude, F_r , rapporto fra la velocità media e la celerità di una piccola onda gravitazionale che si propaga sulla superficie libera: $F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}}$;
- energia cinetica: $E_k = \frac{U^2}{2g}$ (m);
- indice di resistenza (o "friction factor") λ , ricavato dalla relazione di Darcy-Weisbach: $i = \frac{\lambda}{4R_{Hf}} \frac{U^2}{2g}$;
- numero di Reynolds Re : $Re = \frac{4UR_{Hf}}{\nu}$;

- viscosità cinematica ν (m^2/s), rapporto fra viscosità dinamica e densità dell'acqua, dipendente dalla temperatura dell'acqua.

La legge di variazione di quest'ultima grandezza si può ricavare dalla seguente espressione, risultato di una regressione esponenziale dei dati di letteratura (Figura 60):

$$\nu = (1.623 \cdot e^{-0.0227 \cdot T}) \cdot 10^6$$

La formula contiene quale parametro caratteristico di ciascuna prova sperimentale la temperatura media di prova T pari a:

$$\sum_{i=1}^n \frac{T_i t_i}{T_p} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

dove T_i sono le temperature che si registrano durante la prova, t_i sono i tempi cumulati per ogni temperatura T_i registrata, T_p è il tempo di fine prova, ovvero la differenza tra l'istante temporale in cui termina la fase riossigenativa e l'istante temporale in cui la stessa inizia ed n è il numero totale di prove.

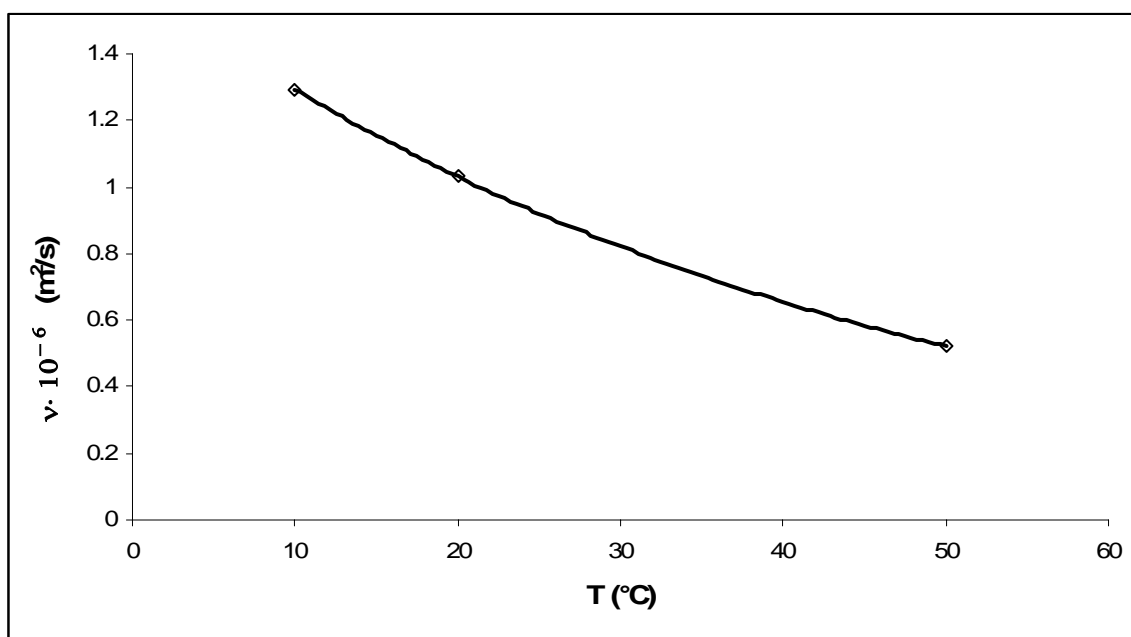


Figura 60: Andamento della viscosità cinematica in funzione della temperatura

Per la determinazione dell'altezza di moto uniforme è stata utilizzata la formula di Gauckler-Strickler:

$$Q = K_s R_H^{2/3} A \sqrt{i} \quad (94)$$

Il valore di K_s (coefficiente di “lisciezza” di Strickler, espresso in $m^{1/3}s^{-1}$) è stato tarato sulla base dei dati di tirante misurati: verificato che in canaletta si instaura una condizione di moto pressoché uniforme, come è evidente dalle elaborazioni riportate in Allegato 3, si è calcolata l'altezza idrica media h dei sette valori misurati e si è stimato il valore di K_s in modo che l'altezza di moto uniforme h_u fosse più vicina possibile al valore medio dei tiranti misurati. Il valore di K_s ritenuto attendibile è quello che minimizza la media degli scarti percentuali $E(\%)$ fra la media dei 7 valori dei idrici tiranti letti h e l'altezza di moto uniforme :

$$E\% = \frac{|h_u - h|}{0.5(h_u + h)} * 100 \quad (95)$$

Nella elaborazione successiva dei dati, si è considerato per ogni valore di pendenza un solo valore di tirante idrico h (tirante medio), rappresentativo dei tiranti misurati nel corso della prova, in seguito associato univocamente a ogni valore di portata Q .

Nelle successive Tabella 4, Tabella 5, Tabella 6 e Tabella 7, sono riportate le elaborazioni dei principali parametri idraulici precedentemente definiti per le forme di sezione e scabrezza considerate nella campagna sperimentale.

Prova	Q	h	i	T	v	K_s	h_u	E (%)	h_s	h/D	β	A	P	B	R_{Hf}	U	Ek
	l/s	cm	%	°C	m ² /s	m ^{1/3} s ⁻¹	cm		cm		rad	m ²	m	m	m	m/s	m
1	5	3.27	3.00%	27.63	8.7E-07	74	3.27	0.07%	2.21	0.065	1.034	0.0055	0.259	0.247	0.0190	0.916	0.0427
2	10	4.49	3.00%	27.98	8.6E-07	76	4.48	0.04%	3.05	0.090	1.217	0.0087	0.304	0.286	0.0258	1.148	0.0672
3	15	5.46	3.00%	29.87	8.2E-07	75	5.47	0.24%	3.73	0.109	1.347	0.0116	0.337	0.312	0.0311	1.290	0.0848
4	20	6.18	3.00%	28.96	8.4E-07	80	6.09	1.45%	4.23	0.124	1.437	0.0139	0.359	0.329	0.0349	1.436	0.1051
5	25	6.94	3.00%	25.68	9.1E-07	79	6.82	1.70%	4.77	0.139	1.527	0.0165	0.382	0.346	0.0389	1.516	0.1171
6	5	3.37	2.50%	30.28	8.2E-07	76	3.37	0.00%	2.28	0.067	1.051	0.0057	0.263	0.251	0.0196	0.875	0.0390
7	10	4.70	2.50%	28.92	8.4E-07	75	4.70	0.00%	3.20	0.094	1.246	0.0093	0.312	0.292	0.0269	1.072	0.0586
8	15	5.64	2.50%	27.76	8.6E-07	77	5.65	0.01%	3.86	0.113	1.371	0.0122	0.343	0.316	0.0321	1.229	0.0770
9	20	6.42	2.50%	27.81	8.6E-07	78	6.44	0.28%	4.46	0.128	1.466	0.0147	0.367	0.335	0.0362	1.357	0.0939
10	25	7.46	2.50%	28.53	8.5E-07	72	7.45	0.13%	5.15	0.149	1.587	0.0183	0.397	0.356	0.0416	1.363	0.0947
11	5	3.59	2.00%	31.07	8E-07	74	3.60	0.23%	2.43	0.072	1.086	0.0063	0.271	0.258	0.0208	0.796	0.0323
12	10	4.92	2.00%	27.81	8.6E-07	77	4.91	0.26%	3.35	0.098	1.276	0.0100	0.319	0.298	0.0281	1.002	0.0512
13	15	6.04	2.00%	28.32	8.5E-07	75	6.03	0.16%	4.14	0.121	1.420	0.0135	0.355	0.326	0.0342	1.113	0.0631
14	20	6.92	2.00%	26.43	8.9E-07	78	6.79	1.87%	4.76	0.138	1.525	0.0164	0.381	0.345	0.0388	1.216	0.0754
15	25	7.57	2.00%	28.75	8.4E-07	76	7.66	1.26%	5.30	0.151	1.598	0.0187	0.400	0.358	0.0421	1.336	0.0910
16	5	3.73	1.50%	28.57	8.5E-07	77	3.78	1.36%	2.56	0.075	1.106	0.0066	0.277	0.263	0.0216	0.754	0.0290
17	10	5.27	1.50%	32.83	7.7E-07	76	5.29	0.28%	3.64	0.105	1.323	0.0110	0.331	0.307	0.0301	0.905	0.0418
18	15	6.34	1.50%	27.80	8.6E-07	76	6.42	1.26%	4.40	0.127	1.456	0.0145	0.364	0.333	0.0358	1.037	0.0548
19	20	7.32	1.50%	32.29	7.8E-07	75	7.42	1.37%	5.12	0.146	1.571	0.0178	0.393	0.354	0.0409	1.121	0.0641
20	25	8.22	1.50%	31.61	7.9E-07	73	8.38	1.90%	5.79	0.164	1.670	0.0211	0.418	0.371	0.0455	1.185	0.0715
21	5	4.30	1.00%	29.60	8.3E-07	72	4.30	0.09%	2.92	0.086	1.191	0.0082	0.298	0.280	0.0248	0.611	0.0190
22	10	5.90	1.00%	31.04	8E-07	72	5.98	1.41%	4.09	0.118	1.402	0.0130	0.350	0.322	0.0334	0.769	0.0301
23	15	7.07	1.00%	25.35	9.1E-07	74	7.17	1.36%	4.94	0.141	1.542	0.0170	0.386	0.349	0.0396	0.884	0.0399
24	20	8.09	1.00%	28.10	8.6E-07	77	8.09	0.07%	5.69	0.162	1.656	0.0206	0.414	0.368	0.0448	0.970	0.0480
25	25	9.27	1.00%	27.91	8.6E-07	72	9.32	0.53%	6.48	0.185	1.781	0.0251	0.445	0.389	0.0507	0.997	0.0507
26	5	5.40	0.50%	31.97	7.9E-07	61	5.48	1.56%	3.74	0.108	1.339	0.0114	0.335	0.310	0.0307	0.437	0.0097
27	10	7.46	0.50%	31.74	7.9E-07	63	7.53	1.01%	5.21	0.149	1.586	0.0183	0.396	0.356	0.0416	0.546	0.0152

28	15	9.04	0.50%	28.73	8.5E-07	62	9.25	2.33%	6.37	0.181	1.757	0.0242	0.439	0.385	0.0496	0.620	0.0196
29	20	10.38	0.50%	32.37	7.8E-07	64	10.50	1.09%	7.36	0.208	1.893	0.0295	0.473	0.406	0.0561	0.678	0.0234
30	25	11.47	0.50%	29.22	8.4E-07	65	11.64	1.45%	8.21	0.229	1.998	0.0340	0.500	0.420	0.0613	0.735	0.0275

Tabella 4: Dati idraulici $d_{50}=0.25$ mm – sezione circolare

<i>Prova</i>	<i>Q</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>T</i>		<i>KS</i>	<i>hu</i>	<i>E (%)</i>	<i>hs</i>	<i>h/D</i>		<i>A</i>	<i>P</i>	<i>B</i>	<i>RHf</i>	<i>U</i>	<i>Ek</i>
	<i>l/s</i>	<i>cm</i>	<i>%</i>	<i>°C</i>	<i>m²/s</i>	<i>m^{2/3} s⁻¹</i>	<i>cm</i>		<i>cm</i>		<i>rad</i>	<i>m²</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m/s</i>	<i>m</i>
1	5	4.40	3.00%	27.63	8.7E-07	40	4.37	0.60%	2.99	0.088	1.205	0.0085	0.301	0.283	0.0253	0.590	0.0178
2	10	5.82	3.00%	30.34	8.2E-07	44	5.82	0.04%	3.98	0.116	1.393	0.0128	0.348	0.321	0.0330	0.783	0.0313
3	15	7.14	3.00%	27.23	8.7E-07	43	7.15	0.17%	4.91	0.143	1.550	0.0172	0.387	0.350	0.0399	0.873	0.0388
4	20	7.93	3.00%	28.02	8.6E-07	46	7.95	0.29%	5.59	0.159	1.638	0.0200	0.410	0.365	0.0440	0.999	0.0509
5	25	8.91	3.00%	28.25	8.5E-07	47	8.77	1.53%	6.19	0.178	1.743	0.0237	0.436	0.383	0.0489	1.055	0.0568
6	5	4.58	2.50%	29.76	8.3E-07	40	4.58	0.00%	3.12	0.092	1.230	0.0090	0.308	0.289	0.0263	0.556	0.0158
7	10	6.09	2.50%	30.62	8.1E-07	44	6.09	0.00%	4.17	0.122	1.427	0.0137	0.357	0.327	0.0345	0.732	0.0273
8	15	7.36	2.50%	32.31	7.8E-07	44	7.39	0.38%	5.07	0.147	1.575	0.0180	0.394	0.354	0.0411	0.835	0.0355
9	20	8.32	2.50%	31.46	7.9E-07	46	8.31	0.03%	5.86	0.166	1.680	0.0214	0.420	0.372	0.0460	0.932	0.0443
10	25	9.31	2.50%	28.58	8.5E-07	46	9.27	0.39%	6.48	0.186	1.785	0.0252	0.446	0.389	0.0509	0.991	0.0501
11	5	4.84	2.00%	31.95	7.9E-07	41	4.76	1.63%	3.23	0.097	1.266	0.0097	0.316	0.296	0.0277	0.513	0.0134
12	10	6.46	2.00%	29.30	8.3E-07	43	6.48	0.31%	4.43	0.129	1.471	0.0149	0.368	0.335	0.0364	0.672	0.0230
13	15	7.69	2.00%	27.56	8.7E-07	45	7.71	0.33%	5.31	0.154	1.612	0.0191	0.403	0.361	0.0428	0.783	0.0313
14	20	8.83	2.00%	28.58	8.5E-07	47	8.69	1.63%	6.13	0.177	1.735	0.0234	0.434	0.381	0.0485	0.856	0.0373
15	25	9.65	2.00%	29.73	8.3E-07	46	9.80	1.50%	6.85	0.193	1.819	0.0266	0.455	0.395	0.0526	0.941	0.0451
16	5	5.16	1.50%	29.84	8.2E-07	40	5.16	0.11%	3.53	0.103	1.309	0.0107	0.327	0.304	0.0295	0.467	0.0111
17	10	7.03	1.50%	29.32	8.3E-07	42	7.03	0.01%	4.84	0.141	1.537	0.0168	0.384	0.348	0.0393	0.595	0.0181
18	15	8.22	1.50%	30.31	8.2E-07	46	8.18	0.46%	5.72	0.164	1.670	0.0211	0.418	0.371	0.0455	0.711	0.0258
19	20	9.20	1.50%	29.90	8.2E-07	47	9.32	1.37%	6.48	0.184	1.773	0.0248	0.443	0.387	0.0503	0.807	0.0332
20	25	9.98	1.50%	30.06	8.2E-07	49	10.19	2.10%	7.12	0.200	1.853	0.0279	0.463	0.400	0.0542	0.897	0.0410
21	5	5.75	1.00%	29.76	8.3E-07	39	5.75	0.01%	3.93	0.115	1.384	0.0126	0.346	0.319	0.0326	0.398	0.0081
22	10	7.63	1.00%	30.62	8.1E-07	43	7.66	0.38%	5.30	0.153	1.605	0.0189	0.401	0.360	0.0425	0.528	0.0142

23	15	9.20	1.00%	32.31	7.8E-07	44	9.24	0.37%	6.41	0.184	1.774	0.0248	0.443	0.388	0.0504	0.605	0.0186
24	20	10.44	1.00%	31.46	7.9E-07	46	10.41	0.28%	7.32	0.209	1.898	0.0297	0.475	0.406	0.0564	0.673	0.0231
25	25	11.59	1.00%	28.58	8.5E-07	46	11.64	0.44%	8.20	0.232	2.009	0.0345	0.502	0.422	0.0618	0.725	0.0268
26	5	6.69	0.50%	27.78	8.6E-07	40	6.71	0.32%	4.60	0.134	1.497	0.0156	0.374	0.340	0.0376	0.320	0.0052
27	10	9.08	0.50%	27.27	8.7E-07	42	9.18	1.05%	6.38	0.182	1.761	0.0243	0.440	0.386	0.0498	0.411	0.0086
28	15	10.93	0.50%	29.10	8.4E-07	44	10.96	0.28%	7.73	0.219	1.946	0.0317	0.487	0.413	0.0587	0.473	0.0114
29	20	12.42	0.50%	29.09	8.4E-07	45	12.52	0.80%	8.91	0.248	2.087	0.0380	0.522	0.432	0.0656	0.526	0.0141
30	25	13.68	0.50%	29.74	8.3E-07	47	13.71	0.24%	9.84	0.274	2.201	0.0436	0.550	0.446	0.0712	0.574	0.0168

Tabella 5: Dati idraulici – $d_{50}=3.0$ mm – sezione circolare

Prova	Q	h	i	T	v	KS	hu	E (%)	A	P	R_{Hf}	U	Ek
	l/s	cm	%	°C	m ² /s	m ^{1/3} s ⁻¹	cm	m	m ²	m	m	m/s	m
1	5	1.65	3.00%	18.92	1.06E-06	82	1.66	0.22%	0.0066	0.4331	0.0122	0.7560	0.0291
2	10	2.41	3.00%	19.20	1.05E-06	90	2.41	0.24%	0.0097	0.4483	0.0172	1.0359	0.0547
3	15	3.28	3.00%	16.12	1.13E-06	82	3.30	0.55%	0.0131	0.4656	0.0225	1.1433	0.0666
4	20	3.84	3.00%	16.83	1.11E-06	84	3.90	1.71%	0.0153	0.4767	0.0258	1.3032	0.0866
5	25	4.51	3.00%	15.55	1.14E-06	84	4.51	0.07%	0.0180	0.4902	0.0294	1.3858	0.0979
6	5	1.71	2.50%	15.76	1.13E-06	86	1.70	0.29%	0.0068	0.4341	0.0126	0.7324	0.0273
7	10	2.60	2.50%	20.85	1.01E-06	87	2.60	0.03%	0.0104	0.4521	0.0184	0.9603	0.0470
8	15	3.34	2.50%	16.63	1.11E-06	88	3.34	0.06%	0.0134	0.4669	0.0229	1.1216	0.0641
9	20	4.09	2.50%	18.38	1.07E-06	86	4.08	0.26%	0.0163	0.4817	0.0271	1.2233	0.0763
10	25	4.85	2.50%	19.10	1.05E-06	82	4.86	0.21%	0.0194	0.4969	0.0312	1.2894	0.0847
11	5	1.80	2.00%	17.71	1.09E-06	88	1.80	0.10%	0.0072	0.4360	0.0132	0.6944	0.0246
12	10	2.76	2.00%	17.13	1.10E-06	89	2.75	0.14%	0.0110	0.4551	0.0194	0.9067	0.0419
13	15	3.62	2.00%	18.71	1.06E-06	87	3.61	0.29%	0.0145	0.4725	0.0245	1.0347	0.0546
14	20	4.42	2.00%	19.80	1.04E-06	85	4.41	0.06%	0.0177	0.4883	0.0289	1.1323	0.0653
15	25	5.16	2.00%	18.68	1.06E-06	84	5.14	0.34%	0.0206	0.5032	0.0328	1.2112	0.0748
16	5	1.99	1.50%	20.44	1.02E-06	86	1.99	0.31%	0.0079	0.4397	0.0145	0.6290	0.0202

17	10	3.09	1.50%	19.12	1.05E-06	86	3.08	0.34%	0.0124	0.4619	0.0214	0.8083	0.0333
18	15	3.88	1.50%	18.29	1.07E-06	90	3.88	0.02%	0.0155	0.4776	0.0260	0.9669	0.0477
19	20	4.70	1.50%	21.26	1.00E-06	86	4.81	1.72%	0.0188	0.4939	0.0304	1.0646	0.0578
20	25	5.52	1.50%	18.72	1.06E-06	87	5.52	0.03%	0.0221	0.5105	0.0346	1.1316	0.0653
21	5	2.29	1.00%	14.30	1.17E-06	85	2.28	0.30%	0.0091	0.4457	0.0164	0.5465	0.0152
22	10	3.34	1.00%	18.03	1.08E-06	93	3.34	0.03%	0.0133	0.4667	0.0229	0.7496	0.0286
23	15	4.38	1.00%	18.09	1.08E-06	91	4.39	0.23%	0.0175	0.4875	0.0287	0.8568	0.0374
24	20	5.50	1.00%	15.12	1.15E-06	86	5.49	0.21%	0.0220	0.5100	0.0345	0.9089	0.0421
25	25	6.26	1.00%	17.59	1.09E-06	88	6.26	0.15%	0.0250	0.5251	0.0381	0.9992	0.0509
26	5	2.98	0.50%	18.87	1.06E-06	78	2.99	0.22%	0.0119	0.4597	0.0208	0.4190	0.0089
27	10	4.71	0.50%	18.90	1.06E-06	77	4.70	0.21%	0.0189	0.4943	0.0305	0.5305	0.0143
28	15	6.10	0.50%	16.26	1.12E-06	78	6.09	0.30%	0.0244	0.5221	0.0374	0.6143	0.0192
29	20	7.43	0.50%	18.12	1.08E-06	77	7.44	0.08%	0.0297	0.5487	0.0434	0.6727	0.0231
30	25	8.41	0.50%	17.83	1.08E-06	78	8.58	1.93%	0.0337	0.5683	0.0474	0.7429	0.0281

Tabella 6: Dati idraulici $d_{50}=0.25$ mm – sezione rettangolare

Prova	Q	h	i	T	v	K_s	h_u	E (%)	A	P	R_{Hf}	U	Ek
	l/s	cm	%	°C	m ² /s	m ^{1/3} s ⁻¹	cm	m	m ²	m	m	m/s	m
1	5	2.43	3.00%	16.82	1.11E-06	44	2.44	0.35%	0.0097	0.4487	0.0174	0.5137	0.0134
2	10	3.46	3.00%	16.94	1.10E-06	51	3.45	0.42%	0.0138	0.4692	0.0236	0.7222	0.0266
3	15	4.30	3.00%	16.71	1.11E-06	54	4.31	0.23%	0.0172	0.4860	0.0283	0.8721	0.0388
4	20	5.00	3.00%	16.32	1.12E-06	57	5.02	0.37%	0.0200	0.5000	0.0320	1.0005	0.0510
5	25	5.69	3.00%	15.52	1.14E-06	59	5.68	0.22%	0.0228	0.5138	0.0354	1.0987	0.0615
6	5	2.56	2.50%	16.20	1.12E-06	45	2.55	0.34%	0.0102	0.4512	0.0181	0.4886	0.0122
7	10	3.47	2.50%	14.92	1.16E-06	55	3.48	0.48%	0.0139	0.4693	0.0236	0.7215	0.0265
8	15	4.49	2.50%	17.04	1.10E-06	55	4.52	0.56%	0.0180	0.4898	0.0293	0.8349	0.0355
9	20	5.33	2.50%	16.80	1.11E-06	57	5.32	0.17%	0.0213	0.5067	0.0337	0.9376	0.0448

10	25	6.23	2.50%	16.65	1.11E-06	56	6.20	0.49%	0.0249	0.5245	0.0380	1.0039	0.0514
11	5	2.72	2.00%	13.87	1.18E-06	45	2.73	0.52%	0.0109	0.4544	0.0192	0.4596	0.0108
12	10	3.67	2.00%	16.71	1.11E-06	57	3.65	0.34%	0.0147	0.4733	0.0248	0.6818	0.0237
13	15	4.72	2.00%	16.10	1.13E-06	57	4.75	0.59%	0.0189	0.4944	0.0305	0.7948	0.0322
14	20	5.67	2.00%	16.20	1.12E-06	57	5.73	1.03%	0.0227	0.5134	0.0353	0.8818	0.0396
15	25	6.71	2.00%	16.46	1.12E-06	56	6.66	0.63%	0.0268	0.5341	0.0402	0.9321	0.0443
16	5	2.90	1.50%	15.06	1.15E-06	47	2.91	0.39%	0.0116	0.4580	0.0203	0.4310	0.0095
17	10	4.13	1.50%	15.83	1.13E-06	54	4.15	0.60%	0.0165	0.4825	0.0274	0.6061	0.0187
18	15	5.09	1.50%	16.21	1.12E-06	59	0.0169	5.10	0.0325	0.0277	0.0325	0.7370	0.0277
19	20	6.25	1.50%	16.84	1.11E-06	57	0.0175	6.30	0.0381	0.0326	0.0381	0.7998	0.0326
20	25	7.12	1.50%	16.67	1.11E-06	59	0.0169	7.15	0.0420	0.0393	0.0420	0.8780	0.0393
21	5	3.26	1.00%	17.69	1.09E-06	48	0.0208	3.27	0.0224	0.0075	0.0224	0.3834	0.0075
22	10	4.90	1.00%	15.33	1.15E-06	51	0.0196	4.91	0.0315	0.0133	0.0315	0.5107	0.0133
23	15	5.97	1.00%	16.29	1.12E-06	57	0.0175	5.96	0.0368	0.0201	0.0368	0.6280	0.0201
24	20	7.08	1.00%	17.92	1.08E-06	59	0.0169	7.05	0.0418	0.0254	0.0418	0.7062	0.0254
25	25	8.28	1.00%	16.43	1.12E-06	58	0.0172	8.29	0.0468	0.0291	0.0468	0.7553	0.0291
26	5	3.90	0.50%	16.89	1.11E-06	52	0.0192	3.88	0.0261	0.0052	0.0261	0.3209	0.0052
27	10	6.01	0.50%	17.40	1.09E-06	52	0.0192	6.09	0.0370	0.0088	0.0370	0.4159	0.0088
28	15	7.19	0.50%	17.86	1.08E-06	60	0.0167	7.25	0.0423	0.0139	0.0423	0.5219	0.0139
29	20	9.29	0.50%	17.42	1.09E-06	56	0.0179	9.24	0.0507	0.0148	0.0507	0.5385	0.0148
30	25	10.54	0.50%	17.08	1.10E-06	57	0.0175	10.65	0.0552	0.0179	0.0552	0.5931	0.0179

Tabella 7: Dati idraulici $d_{50}=3.0$ mm – sezione rettangolare

Allo scopo di stabilire il tipo di moto della corrente, se di corrente “lenta” o “rapida”, ovvero sub-critica o super-critica, si è fatto riferimento al numero di Froude:

per $Fr < 1$: correnti sub-critiche;

per $Fr > 1$: correnti super-critiche.

Una volta definito lo stato della corrente si è passati a una caratterizzazione più approfondita delle prove dal punto di vista idraulico, verificando il regime di moto e calcolando la scabrezza relativa ed equivalente in sabbia ε [L], tramite le relazioni di letteratura (Yen, 2002).

Il parametro di scabrezza ε non ha un significato geometrico ben preciso, come invece avviene nella formulazione di Nikuradse, ma si assume di esso un valore in base agli effetti della stessa scabrezza sulla resistenza della corrente, cioè tramite il rapporto $\frac{\varepsilon}{4 \cdot R_{Hf}}$,

definito “scabrezza relativa”. La relazione utilizzata è la seguente:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -K_1 \log \left(\frac{\varepsilon}{K_2 R_H} + \frac{K_3}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (96)$$

in cui i parametri K_1 , K_2 e K_3 assumono diversi valori, a seconda degli autori che li hanno proposti e della tipologia di sezione di deflusso.

In questa sede si è fatto riferimento ai coefficienti di Reinius (in Yen, 2002), indicati in Tabella 8.

	Geometria del canale	Autori	K_1	K_2	K_3	Note
1	Canale circolare in pressione	Colebrook 1939	2	14.83	2.52	
2	Canale largo	Keulegan 1938	2.03	11.09	3.41	
3	Canale largo	Rouse 1946	2.03	10.95	1.7	
4	Canale largo	Thijssse 1949	2.03	12.2	3.033	
5	Canale largo	Sayre and Albertson 1961	2.14	8.888	7.17	
6	Canale largo	Henderson 1966	2	12	2.5	
7	Canale largo	Graf 1971	2	12.9	2.77	
8	Canale largo	Reinius 1961	2	12.4	3.4	
9	Canale rettangolare	Reinius 1961	2	14.4	2.9	B/h = 4
10	Canale rettangolare	Reinius 1961	2	14.8	2.8	B/h = 2
11	Canale rettangolare	Zegzhda 1938	2	11.55	0	Sabbia addensata

Tabella 8: Coefficienti della formula di Yen (Yen, 2002)

I valori ottenuti per l'indice di resistenza, λ , e per il numero di Reynolds, Re , costituiscono, per la singola prova, le coordinate dei punti (λ , Re) che, posti sull'abaco di Moody, modificato da Yen, permettono di identificare il regime di moto, utile anche per la verifica

della correttezza dell'utilizzo dell'equazione di Gauckler-Strikler.

L'applicazione di questa relazione avviene a seguito della verifica condotta sul valore dello spessore del sub-strato laminare. Dalle esperienze di Nikuradse si ha moto turbolento a parete scabra quando $\frac{\varepsilon}{\delta} > 6$, mentre si ha moto turbolento di transizione quando $0.45 < \frac{\varepsilon}{\delta} < 6$, in cui δ rappresenta il citato spessore del sub-strato viscoso, ricavabile dalla relazione:

$$\delta = 11.5 \frac{U}{u^*} \quad (97)$$

nella quale: U rappresenta la velocità media, e u^* è la già definita velocità d'attrito, pari a:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R_H i}{\rho}} \quad (98)$$

Ulteriore verifica nei riguardi del regime di moto nella canaletta è stata effettuata attraverso il calcolo del numero di Reynolds d'attrito Re^* :

$$Re^* = \frac{\varepsilon u^*}{\nu} \quad (99)$$

Si ricorda che il moto è turbolento pienamente sviluppato allorquando $Re^* > 70$.

Analizzando il grafico in Figura 61 e le successive Tabella 9, Tabella 10, Tabella 11 e Tabella 12, si può affermare che la maggior parte dei punti sperimentali si colloca in regime di moto turbolento pienamente sviluppato, eccetto quelli delle prove riferite alla sezione rettangolare con $d_{50}=0.25$ mm, per le quali quasi tutte le prove si trovano in regime turbolento di transizione.

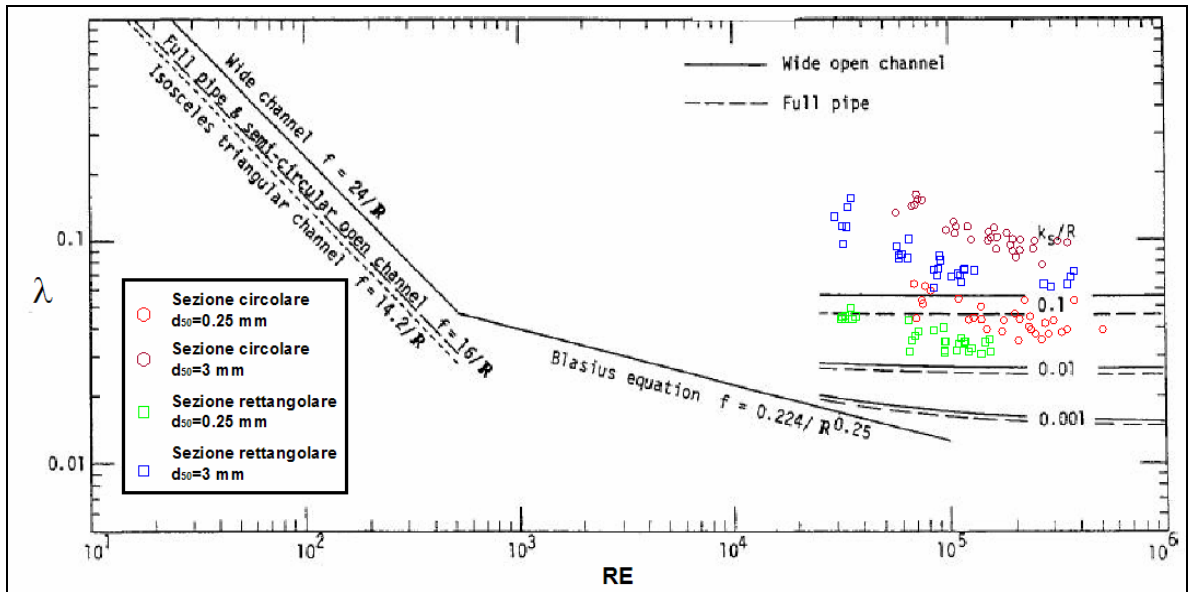


Figura 61: Posizione punti sperimentali sull'abaco di Yen

Prova	Q	i	Fr	λ_f	Re_f	δ	ε	$\varepsilon/4RH_f$	ε/δ	u^*	Re^*
	l/s	%				mm	mm			m/s	
1	5	3.00%	1.62	0.053	8.03E+04	0.13	1.89	0.0249	14.09	0.075	163
2	10	3.00%	1.73	0.046	1.38E+05	0.11	1.76	0.0170	15.34	0.087	178
3	15	3.00%	1.76	0.044	1.95E+05	0.10	1.87	0.0150	18.71	0.096	217
4	20	3.00%	1.84	0.040	2.38E+05	0.10	1.59	0.0114	16.56	0.101	192
5	25	3.00%	1.84	0.040	2.60E+05	0.10	1.77	0.0114	18.06	0.107	209
6	5	2.50%	1.52	0.050	8.40E+04	0.14	1.67	0.0213	12.22	0.069	142
7	10	2.50%	1.58	0.046	1.37E+05	0.12	1.83	0.0170	15.22	0.081	176
8	15	2.50%	1.65	0.042	1.82E+05	0.11	1.65	0.0129	14.63	0.089	170
9	20	2.50%	1.71	0.039	2.28E+05	0.11	1.49	0.0103	14.06	0.094	163
10	25	2.50%	1.59	0.044	2.67E+05	0.10	2.51	0.0151	25.73	0.101	298
11	5	2.00%	1.34	0.052	8.27E+04	0.15	1.90	0.0228	13.07	0.064	152
12	10	2.00%	1.44	0.044	1.31E+05	0.13	1.68	0.0149	12.48	0.074	145
13	15	2.00%	1.45	0.043	1.78E+05	0.12	1.97	0.0144	16.29	0.082	189
14	20	2.00%	1.48	0.041	2.12E+05	0.12	1.94	0.0125	16.40	0.087	190
15	25	2.00%	1.55	0.037	2.67E+05	0.11	1.55	0.0092	14.38	0.091	167
16	5	1.50%	1.25	0.045	7.67E+04	0.17	1.33	0.0154	7.64	0.056	89
17	10	1.50%	1.26	0.043	1.41E+05	0.13	1.71	0.0143	12.76	0.067	148
18	15	1.50%	1.31	0.039	1.72E+05	0.14	1.54	0.0107	11.12	0.073	129
19	20	1.50%	1.32	0.038	2.35E+05	0.12	1.65	0.0101	14.17	0.078	164
20	25	1.50%	1.32	0.038	2.72E+05	0.11	1.83	0.0100	16.26	0.082	189
21	5	1.00%	0.94	0.052	7.30E+04	0.20	2.31	0.0233	11.84	0.049	137
22	10	1.00%	1.01	0.044	1.28E+05	0.16	2.04	0.0153	12.58	0.057	146
23	15	1.00%	1.06	0.040	1.53E+05	0.17	1.77	0.0112	10.44	0.062	121
24	20	1.00%	1.09	0.037	2.03E+05	0.15	1.68	0.0094	11.19	0.066	130
25	25	1.00%	1.05	0.040	2.35E+05	0.14	2.34	0.0116	16.55	0.071	192
26	5	0.50%	0.60	0.063	6.85E+04	0.23	4.59	0.0373	19.57	0.039	227
27	10	0.50%	0.64	0.055	1.15E+05	0.20	4.43	0.0267	21.86	0.045	254
28	15	0.50%	0.66	0.051	1.45E+05	0.20	4.33	0.0218	21.77	0.049	252
29	20	0.50%	0.67	0.048	1.95E+05	0.17	4.27	0.0190	24.84	0.052	288
30	25	0.50%	0.69	0.044	2.15E+05	0.18	3.82	0.0156	21.58	0.055	250

Tabella 9: Parametri caratteristici del moto – $d_{50}=0.25$ mm – sezione circolare

Prova	Q	i	Fr	λ_r	Re _r	δ	ε	$\varepsilon/4RH_f$	ε/δ	u*	Re*
	l/s	%				mm	mm			m/s	
1	5	3.00%	0.90	0.171	6.90E+04	0.12	23.13	0.2285	198.62	0.086	2 303
2	10	3.00%	1.04	0.127	1.27E+05	0.10	19.22	0.1456	200.39	0.099	2 324
3	15	3.00%	1.04	0.123	1.59E+05	0.09	22.27	0.1395	237.98	0.108	2 760
4	20	3.00%	1.13	0.104	2.05E+05	0.09	18.28	0.1039	208.81	0.114	2 422
5	25	3.00%	1.13	0.103	2.42E+05	0.08	20.20	0.1032	244.48	0.120	2 835
6	5	2.50%	0.83	0.167	7.09E+04	0.12	23.27	0.2211	195.16	0.080	2 263
7	10	2.50%	0.95	0.126	1.25E+05	0.10	19.92	0.1446	195.02	0.092	2 262
8	15	2.50%	0.98	0.116	1.76E+05	0.09	20.61	0.1254	228.83	0.100	2 654
9	20	2.50%	1.03	0.104	2.16E+05	0.09	19.06	0.1037	219.56	0.106	2 546
10	25	2.50%	1.04	0.102	2.38E+05	0.09	20.38	0.1001	231.40	0.112	2 683
11	5	2.00%	0.74	0.165	7.24E+04	0.12	24.14	0.2178	195.36	0.074	2 265
12	10	2.00%	0.84	0.126	1.17E+05	0.11	21.15	0.1453	184.74	0.085	2 142
13	15	2.00%	0.90	0.109	1.54E+05	0.11	19.47	0.1138	177.17	0.092	2 055
14	20	2.00%	0.92	0.104	1.96E+05	0.10	20.24	0.1043	200.75	0.098	2 328
15	25	2.00%	0.97	0.093	2.39E+05	0.09	17.91	0.0852	189.77	0.102	2 201
16	5	1.50%	0.66	0.159	6.67E+04	0.15	24.37	0.2067	167.84	0.066	1 946
17	10	1.50%	0.72	0.131	1.12E+05	0.13	24.10	0.1531	189.51	0.076	2 198
18	15	1.50%	0.79	0.106	1.59E+05	0.12	19.56	0.1076	169.19	0.082	1 962
19	20	1.50%	0.85	0.091	1.97E+05	0.11	16.39	0.0814	147.79	0.086	1 714
20	25	1.50%	0.91	0.079	2.37E+05	0.11	13.45	0.0621	126.28	0.089	1 464
21	5	1.00%	0.53	0.162	6.30E+04	0.17	27.56	0.2110	162.84	0.057	1 888
22	10	1.00%	0.61	0.120	1.11E+05	0.15	22.51	0.1325	154.74	0.065	1 794
23	15	1.00%	0.64	0.108	1.56E+05	0.13	22.50	0.1117	174.96	0.070	2 029
24	20	1.00%	0.66	0.098	1.91E+05	0.12	21.04	0.0933	169.85	0.074	1 970
25	25	1.00%	0.68	0.092	2.11E+05	0.13	20.63	0.0835	163.28	0.078	1 894
26	5	0.50%	0.40	0.144	5.57E+04	0.23	26.74	0.1779	114.58	0.043	1 329
27	10	0.50%	0.44	0.116	9.36E+04	0.21	24.95	0.1253	121.63	0.049	1 411
28	15	0.50%	0.46	0.103	1.32E+05	0.18	24.11	0.1026	133.07	0.054	1 543
29	20	0.50%	0.48	0.093	1.65E+05	0.17	22.31	0.0850	130.16	0.057	1 509
30	25	0.50%	0.50	0.085	1.98E+05	0.16	20.24	0.0711	124.87	0.059	1 448

Tabella 10: Parametri caratteristici del moto – d₅₀=3.0 mm – sezione circolare

Prova	Q	i	Fr	λ_r	Re _r	δ	ε	$\varepsilon/4RH_f$	ε/δ	u*	Re*
	l/s	%				mm	mm			m/s	
1	5	3.00%	1.88	0.050	3.50E+04	0.19	1.29	0.0234	6.68	0.064	78
2	10	3.00%	2.13	0.038	6.80E+04	0.16	0.85	0.0110	5.29	0.076	61
3	15	3.00%	2.02	0.041	9.16E+04	0.15	1.39	0.0137	9.20	0.086	107
4	20	3.00%	2.12	0.036	1.21E+05	0.14	1.10	0.0095	7.94	0.092	92
5	25	3.00%	2.08	0.036	1.43E+05	0.13	1.31	0.0099	9.80	0.099	114
6	5	2.50%	1.79	0.046	3.25E+04	0.22	1.04	0.0184	4.66	0.059	54
7	10	2.50%	1.90	0.039	7.00E+04	0.16	1.02	0.0123	6.18	0.071	72
8	15	2.50%	1.96	0.036	9.24E+04	0.16	0.97	0.0094	6.00	0.080	70
9	20	2.50%	1.93	0.036	1.24E+05	0.14	1.16	0.0095	8.06	0.087	93
10	25	2.50%	1.87	0.037	1.53E+05	0.13	1.48	0.0105	11.26	0.093	131
11	5	2.00%	1.65	0.043	3.38E+04	0.23	0.91	0.0153	3.89	0.054	45
12	10	2.00%	1.74	0.037	6.39E+04	0.20	0.90	0.0103	4.59	0.065	53
13	15	2.00%	1.74	0.036	9.57E+04	0.17	1.07	0.0097	6.38	0.074	74
14	20	2.00%	1.72	0.035	1.27E+05	0.15	1.21	0.0093	8.08	0.080	94
15	25	2.00%	1.70	0.035	1.50E+05	0.14	1.35	0.0091	9.32	0.085	108
16	5	1.50%	1.42	0.043	3.57E+04	0.24	1.00	0.0153	4.13	0.049	48

17	10	1.50%	1.47	0.039	6.59E+04	0.20	1.13	0.0117	5.50	0.060	64
18	15	1.50%	1.57	0.033	9.38E+04	0.19	0.84	0.0072	4.42	0.066	51
19	20	1.50%	1.57	0.032	1.29E+05	0.16	0.89	0.0065	5.46	0.071	63
20	25	1.50%	1.54	0.032	1.48E+05	0.16	1.05	0.0067	6.45	0.076	75
21	5	1.00%	1.15	0.043	3.06E+04	0.32	1.13	0.0153	3.53	0.043	41
22	10	1.00%	1.31	0.032	6.36E+04	0.25	0.65	0.0064	2.63	0.050	30
23	15	1.00%	1.31	0.031	9.15E+04	0.22	0.75	0.0058	3.37	0.056	39
24	20	1.00%	1.24	0.033	1.09E+05	0.22	1.13	0.0073	5.23	0.062	61
25	25	1.00%	1.28	0.030	1.40E+05	0.19	0.94	0.0055	4.84	0.065	56
26	5	0.50%	0.77	0.046	3.29E+04	0.36	1.76	0.0189	4.87	0.034	56
27	10	0.50%	0.78	0.043	6.13E+04	0.30	2.11	0.0154	7.07	0.041	82
28	15	0.50%	0.79	0.039	8.19E+04	0.29	2.03	0.0121	7.10	0.045	82
29	20	0.50%	0.79	0.038	1.08E+05	0.26	2.16	0.0111	8.46	0.049	98
30	25	0.50%	0.82	0.034	1.30E+05	0.25	2.00	0.0094	8.13	0.051	94

Tabella 11: Parametri caratteristici del moto - $d_{50}=0.25$ mm - sezione rettangolare

Prova	Q	i	Fr	λ_f	Re_f	δ	ε	$s/4RH_f$	ε/δ	u^*	Re^*
	l/s	%				mm	mm			m/s	
1	5	3.00%	1.05	0.155	3.22E+04	0.17	15.55	0.1985	91.91	0.076	1066
2	10	3.00%	1.24	0.107	6.17E+04	0.15	11.52	0.1088	79.36	0.088	920
3	15	3.00%	1.34	0.088	8.89E+04	0.13	10.20	0.0799	76.74	0.097	890
4	20	3.00%	1.43	0.075	1.14E+05	0.13	8.69	0.0602	68.92	0.103	799
5	25	3.00%	1.47	0.069	1.36E+05	0.12	7.80	0.0490	63.79	0.108	740
6	5	2.50%	0.98	0.149	3.16E+04	0.18	14.91	0.1832	80.86	0.071	938
7	10	2.50%	1.24	0.089	5.90E+04	0.17	8.87	0.0831	53.53	0.081	621
8	15	2.50%	1.26	0.083	8.89E+04	0.14	9.65	0.0728	68.09	0.090	790
9	20	2.50%	1.30	0.075	1.14E+05	0.13	8.83	0.0583	66.18	0.096	767
10	25	2.50%	1.28	0.074	1.37E+05	0.13	9.44	0.0555	74.83	0.102	868
11	5	2.00%	0.89	0.142	2.97E+04	0.21	15.38	0.1776	72.95	0.065	846
12	10	2.00%	1.14	0.084	6.09E+04	0.17	7.89	0.0710	45.26	0.074	525
13	15	2.00%	1.17	0.076	8.62E+04	0.16	8.55	0.0619	53.86	0.082	625
14	20	2.00%	1.18	0.071	1.11E+05	0.15	9.00	0.0561	61.22	0.089	710
15	25	2.00%	1.15	0.073	1.34E+05	0.14	9.54	0.0530	69.16	0.094	802
16	5	1.50%	0.81	0.128	3.03E+04	0.23	13.87	0.1516	60.19	0.058	698
17	10	1.50%	0.95	0.088	5.85E+04	0.19	10.06	0.0813	51.64	0.067	599
18	15	1.50%	1.04	0.070	8.52E+04	0.18	7.58	0.0518	42.66	0.073	495
19	20	1.50%	1.02	0.070	1.10E+05	0.16	9.21	0.0534	57.10	0.080	662
20	25	1.50%	1.05	0.064	1.33E+05	0.15	8.21	0.0433	53.20	0.083	617
21	5	1.00%	0.68	0.120	3.17E+04	0.25	13.70	0.1355	54.18	0.050	628
22	10	1.00%	0.74	0.095	5.61E+04	0.23	13.05	0.0919	57.93	0.059	672
23	15	1.00%	0.82	0.073	8.24E+04	0.20	9.07	0.0549	44.38	0.064	515
24	20	1.00%	0.85	0.066	1.09E+05	0.18	8.18	0.0436	44.27	0.068	513
25	25	1.00%	0.84	0.064	1.27E+05	0.18	10.59	0.0502	58.77	0.072	682
26	5	0.50%	0.52	0.099	3.03E+04	0.34	11.52	0.0981	34.06	0.038	395
27	10	0.50%	0.54	0.084	5.63E+04	0.28	12.07	0.0726	43.02	0.045	499
28	15	0.50%	0.62	0.061	8.16E+04	0.26	7.17	0.0377	27.62	0.048	320
29	20	0.50%	0.56	0.069	1.00E+05	0.24	12.98	0.0568	54.18	0.053	628
30	25	0.50%	0.58	0.062	1.19E+05	0.23	11.20	0.0451	48.42	0.055	561

Tabella 12: Parametri caratteristici del moto - $d_{50}=3.0$ mm - sezione rettangolare

Il calcolo della scabrezza media equivalente in sabbia, ε , riferito a ogni set di prove a d_{50} costante, è stato effettuato considerando la media dei dati ricavati dalle singole prove.

E' stato notato che, con le scabrezze riferite a $d_{50}=0.25$ mm, la scabrezza media delle prove a pendenza pari a 0.5% risultava molto maggiore di quella di tutte le altre prove. Da questa osservazione è stato possibile ottenere la Tabella 13 nella quale sono riportati i valori medi di ε considerando tutte le prove e considerando le sole prove a pendenza maggiore dello 0.5%.

E' stato, altresì, calcolato il rapporto ε/d_{50} , che rende conto di quanto la scabrezza sia superiore al diametro medio dei sedimenti posti sul contorno bagnato.

Forma	d_{50} mm	ε mm	Pendenze	ε/d_{50}
Circolare	0.25	2.22	TUTTE	8.90
Circolare	0.25	1.81	SENZA 0.5%	7.25
Circolare	0.25	4.29	SOLO 0.5%	17.15
Circolare	3	21.32	TUTTE	7.11
Circolare	3	20.86	SENZA 0.5%	6.95
Circolare	3	23.67	SOLO 0.5%	7.89
Rettangolare	0.25	1.22	TUTTE	4.88
Rettangolare	0.25	4.25	SENZA 0.5%	17.00
Rettangolare	0.25	8.05	SOLO 0.5%	32.20
Rettangolare	3	10.48	TUTTE	3.49
Rettangolare	3	10.37	SENZA 0.5%	3.46
Rettangolare	3	10.99	SOLO 0.5%	3.66

Tabella 13: Valutazione della scabrezza media

Per il valore medio di K_s , invece, si è proceduto alla stima sia considerando la totalità delle prove effettuate, sia escludendo quelle con pendenze pari allo 0.5%. Tenendo conto della

relazione di Gauckler-Stricker nella forma $\frac{Q}{\sqrt{i}} = K_s R_{Hf}^{2/3} A$, si sono riportati sull'asse delle

ascisse i prodotti $R_{Hf}^{2/3} A$ e sull'asse delle ordinate i rapporti $\frac{Q}{\sqrt{i}}$; i punti ottenuti si lasciano

bene interpolare da una retta il cui coefficiente angolare individua il valore di K_s (Figura 62 e Figura 63).

È appena il caso di far rilevare che le scabrezze in questione sono relative a tutto il contorno bagnato e non già al solo fondo del canale.

Nell'Allegato 3 sono riportati, per ciascuna delle prove, i grafici e le tabelle dei dati idraulici relativi alle singole prove di laboratorio. Nelle tabelle sono riportati i valori delle grandezze misurate o calcolate per ogni rilievo e, quindi, i grafici dell'andamento del

tirante idrico e della superficie libera, introducendo anche le linee dell'altezza critica e dell'altezza di moto uniforme.

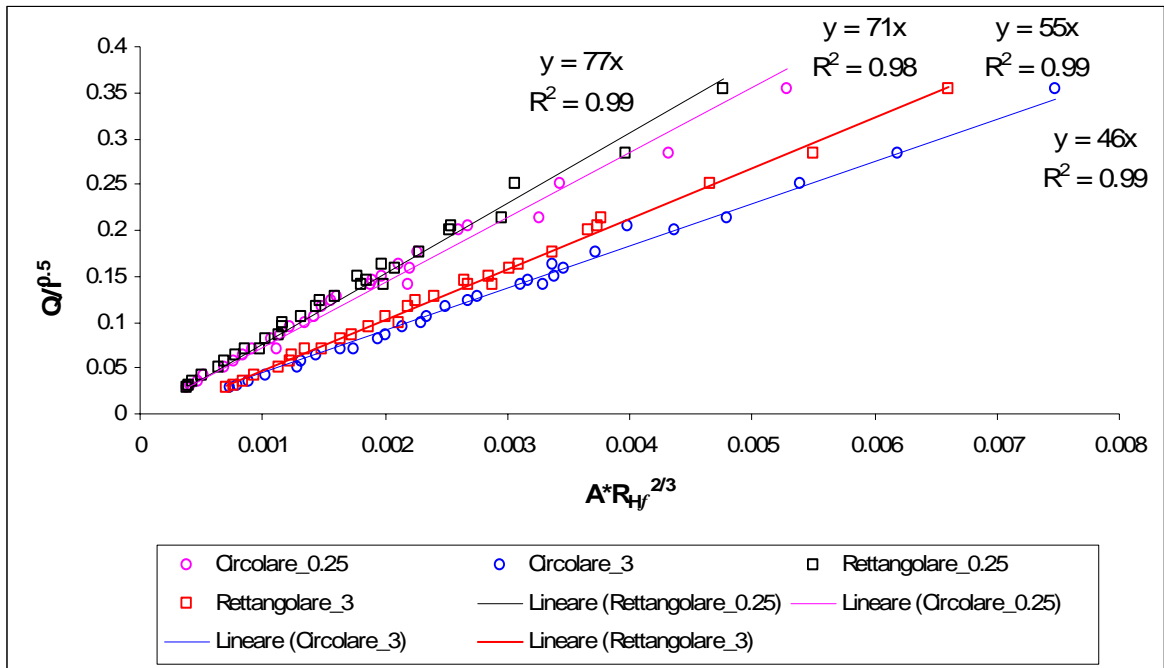


Figura 62: Determinazione di K_s con tutte le prove

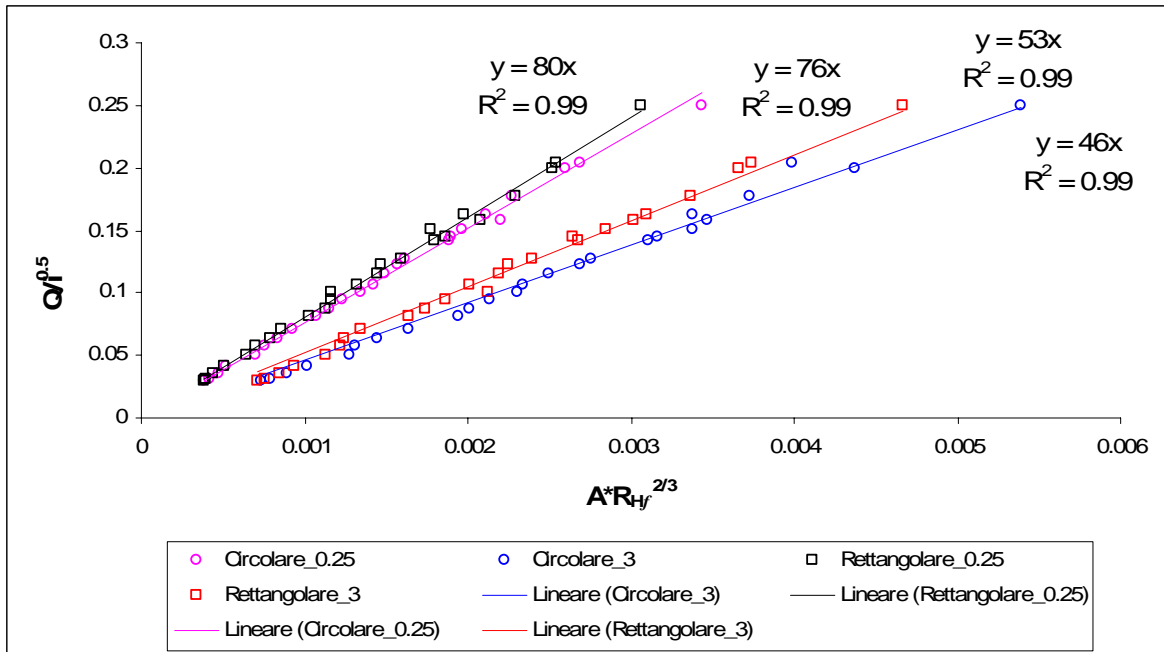


Figura 63: Determinazione di K_s senza le prove a pendenza $i=0.5\%$

4. ANALISI E INTERPRETAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI

INTRODUZIONE

L'analisi degli studi dei problemi riguardanti la riossigenazione dei corpi idrici e, in particolare, l'analisi della dipendenza del coefficiente di riossigenazione dalle caratteristiche idrodinamiche della corrente ha portato alla consapevolezza che l'approccio da seguire per una corretta interpretazione del fenomeno dovesse prevedere una esaustiva e affidabile base di dati sperimentali e una altrettanto rigorosa interpretazione modellistica, cercando, comunque, di ottenere attendibili formulazioni facilmente utilizzabili da parte di chi si proponga la stima di K_r e non possa eseguire raffinate e onerose misure su campo.

Le formulazioni teoriche e semi-empiriche rinvenute in letteratura, a partire dagli schemi concettuali fino alle successive estensioni, hanno il pregio di interpretare in modo brillante il problema dello scambio di ossigeno fra volume liquido e atmosfera, ma, di contro, come in tutti gli schemi concettuali, l'effettiva quantificazione di K_r (o indifferentemente di K_L) avviene attraverso parametri che vanno tarati sulla base di risultanze sperimentali, visto che la base degli schemi è rappresentata dalla turbolenza, allo stato attuale non completamente interpretata.

La necessità di prove sperimentali subordina l'affidabilità della soluzione alla bontà dei risultati sperimentali che, di fatto, rappresentano un limite, visto che ogni parametro di taratura determinato dipende, in modo significativo, dalla completezza e dalla correttezza delle condizioni valutate sperimentalmente.

Per quanto riguarda la raccolta dei dati su corsi d'acqua naturali, è evidente come una esaustiva analisi del problema non possa prescindere dall'osservazione pluriennale di numerosi tratti di corsi d'acqua caratterizzati dall'avere condizioni al contorno note e ben determinate e parametri idraulici caratterizzati dall'avere condizioni di stazionarietà nello spazio e per tutto il tempo della raccolta dei dati. Riguardo alle condizioni al contorno, inoltre, è di fondamentale importanza riuscire a monitorare tratti in cui possano essere ben

determinate la frequenza e l'entità delle immissioni di agenti deossigenanti, sia puntuali quali scaricatori di piena, sia continui quali la risospensione di sedimenti, le acque di falda e le immissioni distribuite dovute alle superfici scolanti, per evitare che questi possano condizionare la successiva interpretazione dei fenomeni.

Per quanto riguarda, poi, i parametri idraulici, c'è la necessità di considerare corsi d'acqua con pendenze diverse in condizioni di portata diverse.

E' di fondamentale importanza, infatti, al fine di condurre uno studio esaustivo, che ciascun tratto di corso d'acqua, caratterizzato da una propria pendenza media del fondo, da una forma di sezione e scabrezza del contorno bagnato (per quanto possibile costanti), dagli scambi idrici con le acque di falda e dalle immissioni, venga studiato a varie portate defluenti. Sarebbe, inoltre, necessario studiare tratti di corsi d'acqua caratterizzati dalle medesime condizioni al contorno, portate sostanzialmente simili e caratteristiche geometriche diverse.

E' evidente che è praticamente impossibile riscontrare condizioni di questo tipo in natura; per queste ragioni, ai fini dello studio della dipendenza del coefficiente di riossigenazione dalle sole caratteristiche idrauliche delle correnti, si è scelto di privilegiare l'analisi in laboratorio. Pur con le incertezze e le difficoltà che hanno caratterizzato la prima fase del periodo di dottorato, si è cercato di eliminare nei modi descritti nel precedente capitolo le cause che rendevano incerti i risultati sperimentali.

Da quanto sopra detto discende la parziale applicabilità del database dell'U.S.G.S. a uno studio di carattere scientifico: l'enorme mole di dati di campo, infatti, è di sicuro interesse per poter individuare una tendenza, o meglio confermare qualitativamente una correlazione, fra i parametri individuati come caratteristici del fenomeno, ma non consente risultati che siano generalizzabili con elevato margine di affidabilità. Il lavoro dell'U.S.G.S., tuttavia, rappresenta un patrimonio di elevato valore, per la mole di dati messi a disposizione, che hanno consentito di ricavare da una campagna di durata ventennale un perfezionamento delle tecniche di misura di K_r e una vastità di casi studiati.

E' evidente, infine, che una iniziativa di tali dimensioni è improponibile da realizzare se non con il contributo decisivo di apparati statali con massa critica superiore alle strutture universitarie.

L'elaborazione condotta da Melching&Flores (1999) sui dati dell'U.S.G.S. ha avuto il pregio di presentare relazioni in grado di interpretare i casi monitorati, ma probabilmente, a causa delle modalità di rilievo dei dati non si è spinta a individuare le grandezze fondamentali descrittive del fenomeno e, di conseguenza, le relazioni ottenute soffrono di limitata generalizzazione. In definitiva, la suddivisione dei dati in quattro sottogruppi ben interpretati dalle equazioni richiamate al paragrafo 2.5.3, limita l'elaborazione alla sola interpolazione dei dati raccolti in situ, ottenendo relazioni che contengono al loro interno grandezze talvolta fra loro stesse correlate e, quindi, sovrabbondanti.

Passando alle esperienze sperimentali di laboratorio ritrovate in letteratura, ci si è resi conto della grossa potenzialità dei dati sperimentali, ma anche della necessità di pianificare in modo diverso la tipologia e la sequenza delle prove.

Le sperimentazioni condotte da Moog&Jirka (1999) e da Balmè&Tagizadeh Nassèr (1995), infatti, avevano, per ragioni diverse, alcune limitazioni:

- assenza di definizione dello stato indisturbato;
- numero limitato di condizioni idrauliche indagate;
- carente inquadramento idraulico delle condizioni di prova;

Gli studi, infatti, sono in primo luogo parziali, in quanto le singole sperimentazioni si riferiscono allo studio di una sola sezione di deflusso e a una sola scabrezza del contorno bagnato, utilizzando, quindi, metodologia e strumentazioni di prova per un solo caso di studio. È nota, invece, l'importanza di acquisire dati, in diverse condizioni, con strumenti tarati allo stesso modo e con la stessa metodologia di prova.

Inoltre, per quanto riguarda le esperienze condotte da Balmè&Tagizadeh Nassèr, l'acquisizione dei dati veniva interrotta in corrispondenza di una percentuale di saturazione compresa fra il 60 e il 70 %, eliminando, di fatto, la coda del processo riossigenativo, molto spesso decisiva per descrivere il fenomeno nella sua interezza.

Entrambi i gruppi di ricerca, inoltre, non hanno tenuto conto di un fatto non trascurabile: l'effetto che ha l'aumento di temperatura durante la prova sul risultato finale.

Come in seguito sarà argomentato in modo più esaustivo, il progredire della prova non permette di conservare le condizioni iniziali, per cui lo "stato di fatto" cambia nel tempo. In particolare, cambia il valore dell'ossigeno disciolto a saturazione, dipendente, a parità di salinità dell'acqua e di pressione barometrica, dalla temperatura. La variazione dell'ossigeno disciolto a saturazione modifica, di conseguenza, il valore del deficit di ossigeno, in base al quale si costruisce la curva di riossigenazione e viene determinato il

coefficiente di riossigenazione.

L'introduzione della correzione dei valori in funzione della temperatura è sicuramente una novità metodologica in riferimento alla raccolta dei dati. Quest'ultima, per altro, fornisce un contributo in termini di vastità di casi esaminati.

Lo studio della variazione dell'ossigeno disciolto a saturazione in funzione della sola variazione della temperatura di prova è stato effettuato tramite l'esecuzione delle prove senza versamento dell'agente deossigenante, altrimenti dette "prove bianche", per una durata compatibile con la durata della prova di riossigenazione. E' stato possibile, in questo modo, costruire delle relazioni fra temperatura e ossigeno disciolto in condizioni dinamiche, che, come si vedrà meglio nel prosieguo, ha una dipendenza pressoché lineare.

Una seconda novità del lavoro sperimentale qui presentato riguarda i parametri utilizzati per l'interpretazione con l'analisi dimensionale dei risultati. Precedenti studi, infatti, non hanno inteso inserire nell'elaborazione l'influenza della tensione superficiale e della larghezza della superficie di interscambio aria-acqua, qui utilizzate. I risultati confortanti ottenuti per questa via, infine, hanno spinto a verificare se anche gli altri dati provenienti da studi di letteratura e raccolti in campo e in laboratorio potessero essere interpretati con le stesse leggi.

4.1. ELABORAZIONE DEI DATI DELL'ULTIMA CAMPAGNA SPERIMENTALE

L'elaborazione dei dati delle campagne sperimentali di laboratorio è stata condotta valutando tutti gli effetti che concorrono alla definizione del processo riossigenativo e, in particolare, all'evoluzione della temperatura durante l'esecuzione della prova.

In primo luogo, quindi, sono state eseguite le prove "bianche", per conoscere l'andamento della temperatura, T , e dell'ossigeno disciolto, OD , che corrisponde alla condizione di saturazione, al procedere del tempo di prova, per poi incrociare i dati pervenendo a una migliore correlazione, rispetto alle trattazioni di letteratura, fra OD a saturazione e T , limitatamente alle condizioni analizzate in laboratorio.

Di fatto, come meglio sarà precisato in seguito, il deficit di ossigeno è stato valutato, istante per istante, come differenza fra OD a saturazione, alla data temperatura, calcolata con la relazione ricavata dall'interpretazione delle prove bianche e concentrazione attuale,

misurata in un punto significativo dell'apparato sperimentale.

Una volta calcolato il deficit, il coefficiente di riossigenazione è stato valutato seguendo la procedura esposta al paragrafo 2.4.1.

4.1.1. Prove di riossigenazione

Le prove di riossigenazione sono state eseguite seguendo diverse configurazioni, elaborate e pianificate in fase di progettazione della sperimentazione.

In particolare, sono state considerate le due forme della sezione di deflusso:

1. forma circolare;
2. forma rettangolare.

Per ciascuna delle due forme, sono stati considerati i casi corrispondenti a: 5 portate, 6 pendenze e 2 diverse scabrezze. Più in particolare:

- portate: 5, 10, 15, 20, 25 l/s;
- pendenze 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 %;
- scabrezze realizzate con l'interposizione sul contorno bagnato di sabbia e ghiaia aventi, rispettivamente, $d_{50} = 0.25$ e 3.0 mm.



Figura 64: Scabrezza del fondo - sezione circolare - 0.25 e 3.0 mm

Le prove sperimentali hanno seguito un preciso protocollo, stabilito nella fase di progettazione e conseguente anche a considerazioni fatte in seguito a precedenti campagne sperimentali:

1. posizionamento sulla pendenza scelta;
2. riempimento del sistema idraulico;

3. accensione della pompa di ricircolo;
4. calibrazione della portata di prova;
5. verifica della stabilizzazione della portata, dell'ossigeno disciolto *OD* e della temperatura *T*;
6. preparazione dell'agente deossigenante (miscela solida di solfito di sodio e cloruro di cobalto)
7. preparazione dell'ossimetro alla misura e registrazione dei dati di *OD*, *T* nel tempo (*t*);
8. versamento della miscela deossigenante all'interno della corrente liquida;
9. lettura dei tiranti all'interno del canale;
10. verifica del raggiungimento del minimo di ossigeno disciolto in acqua;
11. verifica del raggiungimento delle nuove condizioni di saturazione;
12. spegnimento della pompa di ricircolo;
13. trasposizione delle misure di *T* e *OD* sul foglio di calcolo;
14. vuotamento del sistema idraulico;
15. prima verifica dei risultati della prova.

Entrando nel dettaglio dei precedenti passaggi, è utile precisare quanto segue:

1. Il posizionamento del sistema sulla pendenza scelta avviene attraverso il pistone idraulico manuale, secondo delle tacche prestabilite, determinate dal rapporto fra sollevamento del pistone e distanza fra lo stesso e la cerniera di rotazione della struttura reticolare.
2. Il riempimento del sistema idraulico avviene trasferendo il volume d'acqua necessario per ogni prova da un serbatoio di compenso posto nei pressi della vasca di valle alla medesima vasca, con l'ausilio di una pompa sommersa posta all'interno del serbatoio.
3. L'accensione della pompa di ricircolo avviene attraverso il quadro posto all'ingresso del laboratorio.
4. La calibrazione della portata di prova avviene modificando il grado di apertura della saracinesca posta a valle della pompa di ricircolo e verificando, sul misuratore di portata, che la portata stabilizzata sia quella desiderata. Questa è una fase molto delicata delle prove, in quanto la stabilizzazione avviene "per tentativi" ed è molto importante la sensibilità manuale dell'operatore oltre che un'osservazione attenta del display del misuratore di portata, essendo inevitabili piccole variazioni

- istantanee nella misura e, quindi, nella successiva lettura della portata.
5. La verifica della stabilizzazione della temperatura e dell'ossigeno disciolto avviene attraverso la lettura sul display dell'ossimetro, una volta che la sonda sia stata posizionata all'interno della vasca di valle.
 6. La preparazione dell'agente deossigenante avviene versando all'interno di un contenitore di volume noto le quantità di solfito di sodio e cloruro di cobalto necessarie per ogni prova. Queste quantità, infatti, variano a seconda della portata e della pendenza di prova, minori per portate e pendenze basse, maggiori per portate e pendenze alte.
 7. La preparazione dell'ossimetro sulla lettura di OD, T e tempo avviene selezionando il programma interno di misura in tempo reale dei parametri e memorizzazione a determinate scansioni temporali, fissate in 30 s.
 8. Il versamento dell'agente deossigenante avviene in corrispondenza della sezione di imbocco di monte per permettere un adeguato miscelamento in acqua.
 9. La lettura dei tiranti avviene attraverso un idrometro manuale a punta, secondo le modalità esplicitate nel capitolo riguardante l'aspetto idraulico.
 10. La verifica del raggiungimento del minimo di OD avviene leggendo il valore sul display dell'ossimetro e verificando che sia prossimo allo 0.
 11. La verifica del raggiungimento del valore di saturazione avviene leggendo sul display dell'ossimetro il valore di OD e T raggiunto dalla prova e calcolandone la percentuale raggiunta rispetto al valore di saturazione alla temperatura raggiunta, determinata tramite le prove bianche. Sul foglio di calcolo è stata riportata l'equazione della variazione di OD rispetto alla temperatura ricavata dalle prove bianche; inserendo i valori di OD e T letti in tempo reale è possibile determinare la percentuale di saturazione come rapporto fra OD letta in tempo reale e OD di saturazione alla medesima temperatura ricavata dall'equazione medesima.
 12. Lo spegnimento della pompa di ricircolo avviene attraverso il quadro elettrico posto all'ingresso del laboratorio.
 13. Una volta raggiunta la percentuale di saturazione prossima al 100%, secondo le modalità precedentemente descritte, vengono bloccate le acquisizioni dall'ossimetro e richiamati i dati per immetterli nel foglio di calcolo. Una volta terminata l'acquisizione viene liberata la memoria dell'ossimetro.

14. Il vuotamento del sistema idraulico avviene con l'apertura di una saracinesca che scarica direttamente all'interno di un pozzetto collegato alla rete fognaria.
15. La prima verifica dei dati avviene una volta completata l'immissione nel foglio di calcolo, verificando la curva di riossigenazione e la congruità dei dati con quelli precedenti, come sarà meglio specificato in seguito.

4.1.2. Prove bianche

Le prove bianche hanno seguito una procedura standardizzata simile a quella delle prove di riossigenazione e, in ordine cronologico, le hanno precedute. L'unica differenza, rispetto al caso riossigenativo, riguarda l'assenza dei punti 6, 8, 9 e 10 e alcune differenze nei punti 7 e 11.

L'acquisizione dei dati (punto 7), infatti, procede con intervalli di 1 minuto, la prova, inoltre, viene fermata (punto 11) al raggiungimento delle due ore di funzionamento dell'impianto, per avere un tempo comparabile con la durata media di una prova di riossigenazione.

In ogni caso alla fine di ogni prova si procedeva allo svuotamento del sistema e al nuovo riempimento, per simulare al meglio le condizioni che si determinano nelle prove di riossigenazione.

4.1.3. Elaborazione delle prove bianche

L'elaborazione delle prove bianche avviene in "automatico" su un foglio di calcolo opportunamente preparato. L'immissione dei dati dall'ossimetro avviene manualmente e contestualmente vengono costruiti due grafici, uno che riporta l'andamento della temperatura e dell'ossigeno disciolto nel tempo (grafico di tipo 1, Figura 65) e l'altro che riporta l'andamento, nel tempo, dell'ossigeno disciolto in funzione della temperatura (grafico di tipo 2, Figura 66).

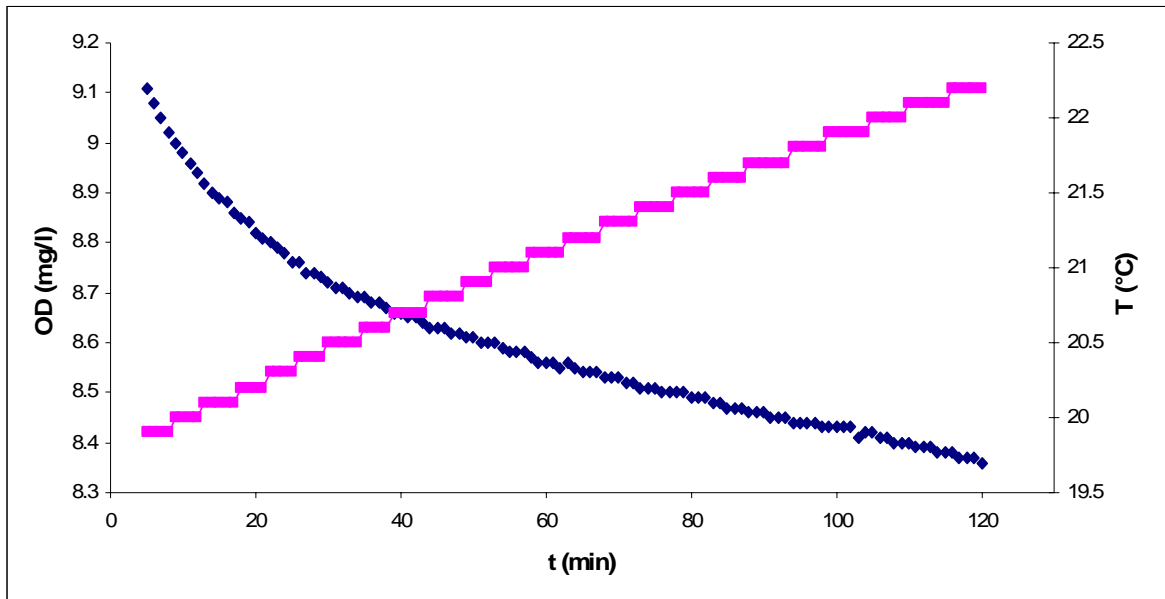


Figura 65: Grafico di "Tipo 1" – prova bianca

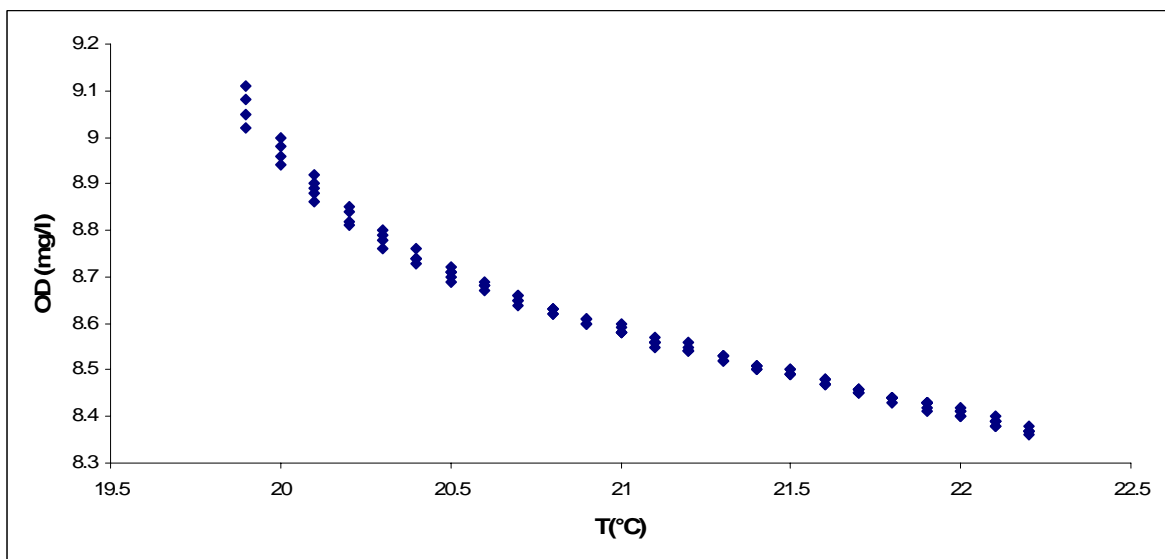


Figura 66: Grafico di "Tipo 2" – prova bianca

Il primo dei due grafici rende idea di come si evolvano nel tempo i due parametri, il secondo, invece, di come l'ossigeno disciolto venga influenzato, in condizioni dinamiche, dalla temperatura che si viene a determinare nel sistema.

Osservando l'andamento del grafico di tipo 1 (Figura 65) si può verificare come T abbia una crescita pressoché lineare in funzione del tempo, OD , invece, ha un andamento decrescente non lineare nella prima parte con tendenza a diventare lineare.

Dall'osservazione fatta su tutte le prove al variare di portata, pendenza e forma della sezione di deflusso, si è ritrovato un comportamento simile. In particolare, per quanto riguarda l'andamento dell' OD , la prova si può suddividere in due parti (Figura 67):

- una fase di avvio, che ha una durata compresa fra 35 e 45 minuti;
- una fase di regime, che dura fino all'interruzione della prova.

Il comportamento non lineare della fase di avvio prova dipende, essenzialmente, dalla necessità che il volume d'acqua si mescoli completamente; si è ricercata, allora, l'esistenza di una correlazione diretta, in condizioni dinamiche, fra la temperatura e l'ossigeno disciolto, nella fase di regime, disponendo tutti i dati di T e OD su due diverse colonne e considerando separatamente quelli riferiti alla sezione circolare e quelli riferiti alla sezione rettangolare.

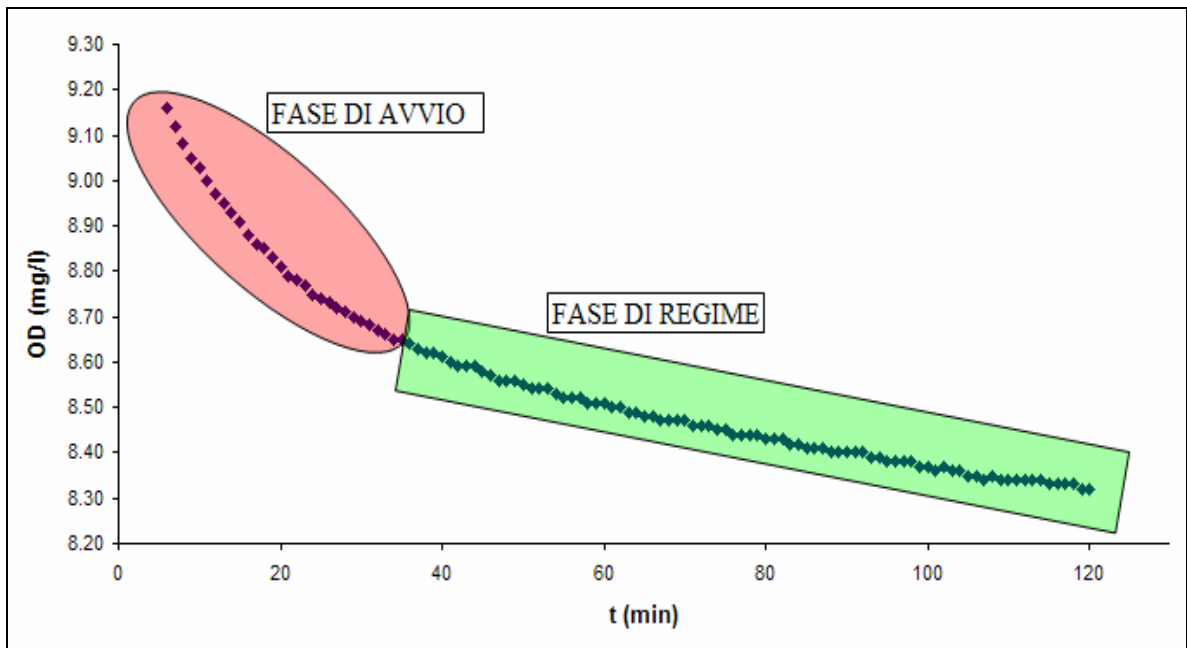


Figura 67: Suddivisione della prova "bianca"

Per quanto riguarda la sezione circolare, è stato indagato un range di temperatura compreso fra 23.4 e 31.4 °C, ritrovando una correlazione lineare, con coefficiente di regressione superiore a 0.87 (Figura 68). Una volta acquisito questo risultato, si è proceduto a una ulteriore elaborazione, considerando la media dei diversi valori di OD ricavati dalla diverse prove per ogni temperatura, ricavando un miglior legame, ancora sotto forma di retta (Figura 69), con coefficiente di correlazione pari a 0.986.

La retta ha equazione :

$$OD = -0.1341T + 11.189 \quad (100)$$

È stata effettuata la verifica della bontà di questa regressione confrontando i risultati misurati e quelli calcolati con la (100).

Come si può osservare in Figura 70, i punti si allineano in modo soddisfacente attorno alla retta a 45°.

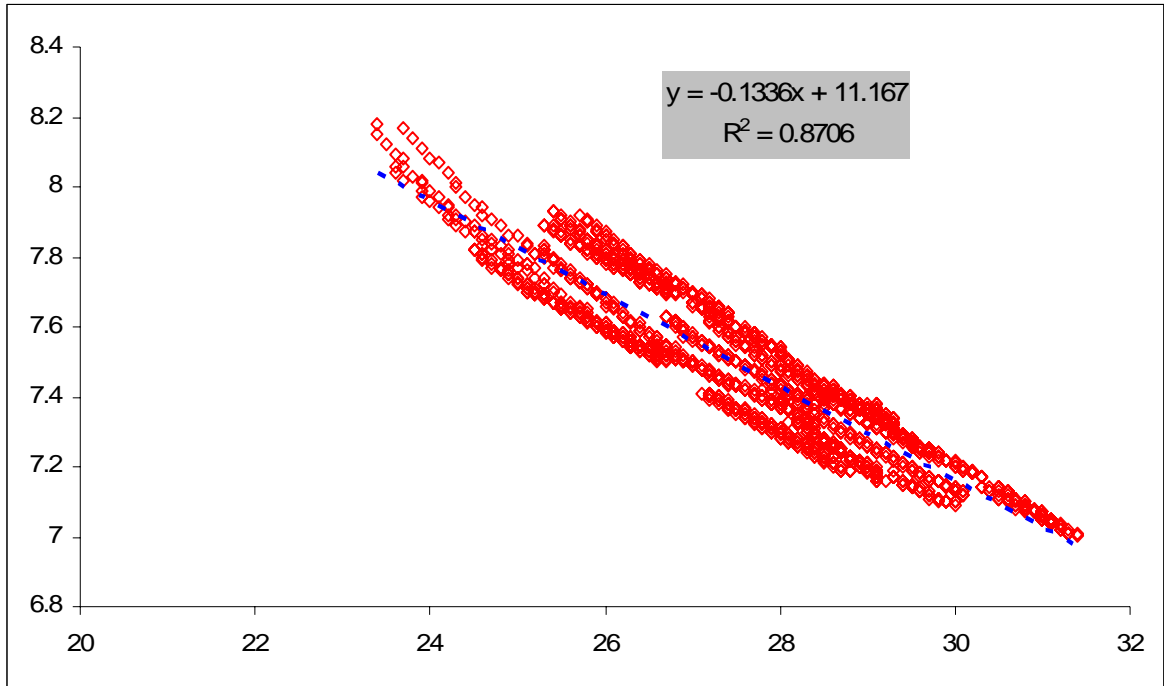


Figura 68: Andamento di OD in funzione di T - prove bianche - sezione circolare

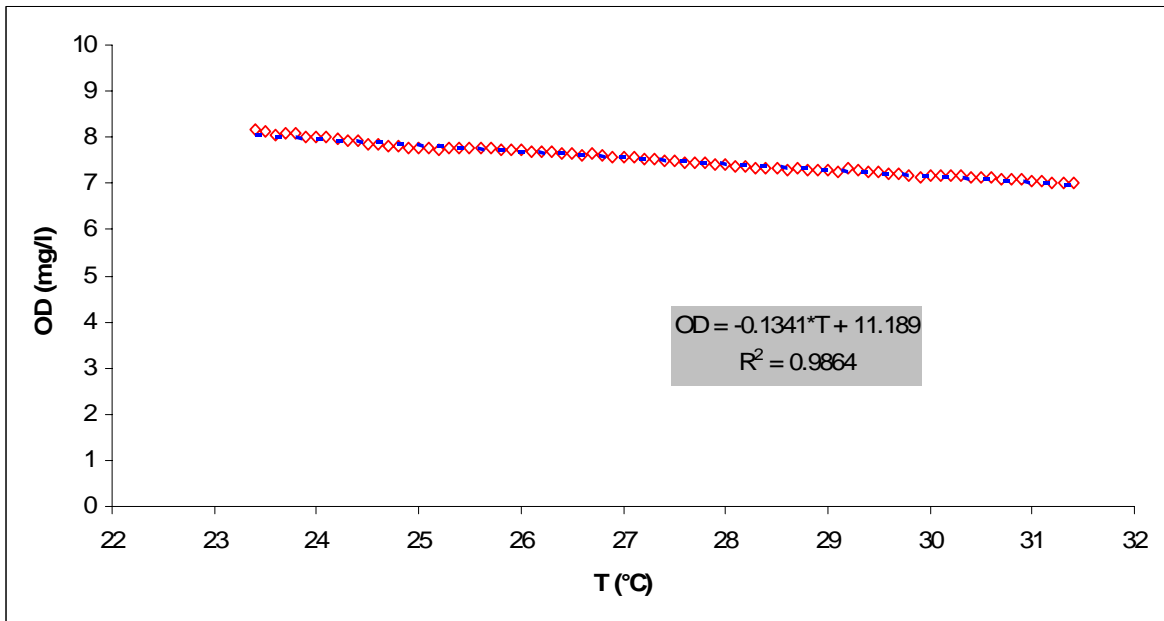


Figura 69: Andamento di OD in funzione di T- rielaborazione prove bianche - sezione circolare

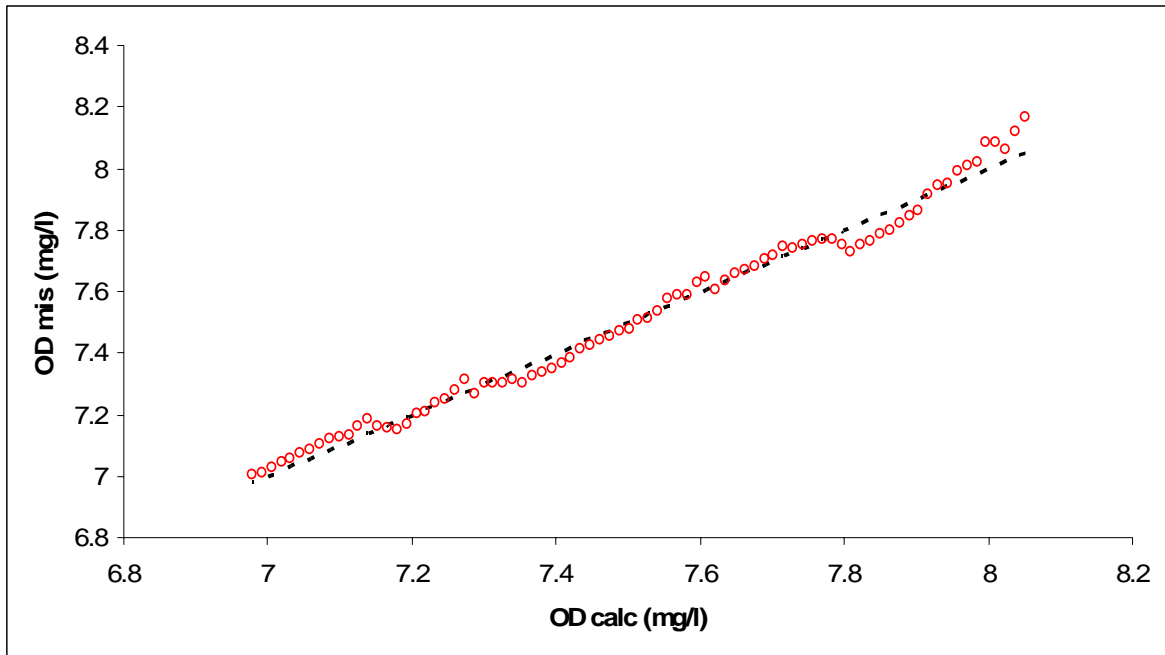


Figura 70: Andamento OD misurato - OD calcolato - prove bianche - sezione circolare

La stessa procedura esposta per i dati provenienti dalla sezione circolare è stata utilizzata per i dati provenienti dalla sezione rettangolare, caratterizzati, però, da un range di temperatura di prova notevolmente diverso a causa delle diverse stagioni in cui sono state condotte le prove. Sono stati, infatti, analizzati dati con temperatura compresa fra 15.5 e 24.3 °C, ritrovando una correlazione lineare, con coefficiente di regressione 0.863 (Figura 71). Mediando i dati di OD per temperature costanti, è stata ricavata una correlazione ancora lineare, con coefficiente di correlazione pari a 0.9613 (Figura 72).

La retta ha equazione :

$$OD = -0.180IT + 12.304 \quad (101)$$

Anche in questo caso è stata effettuata una verifica della bontà della regressione confrontando i risultati misurati e quelli calcolati con la relazione (101). Come si può osservare in Figura 73, i punti si allineano in modo soddisfacente lungo la retta a 45 gradi.

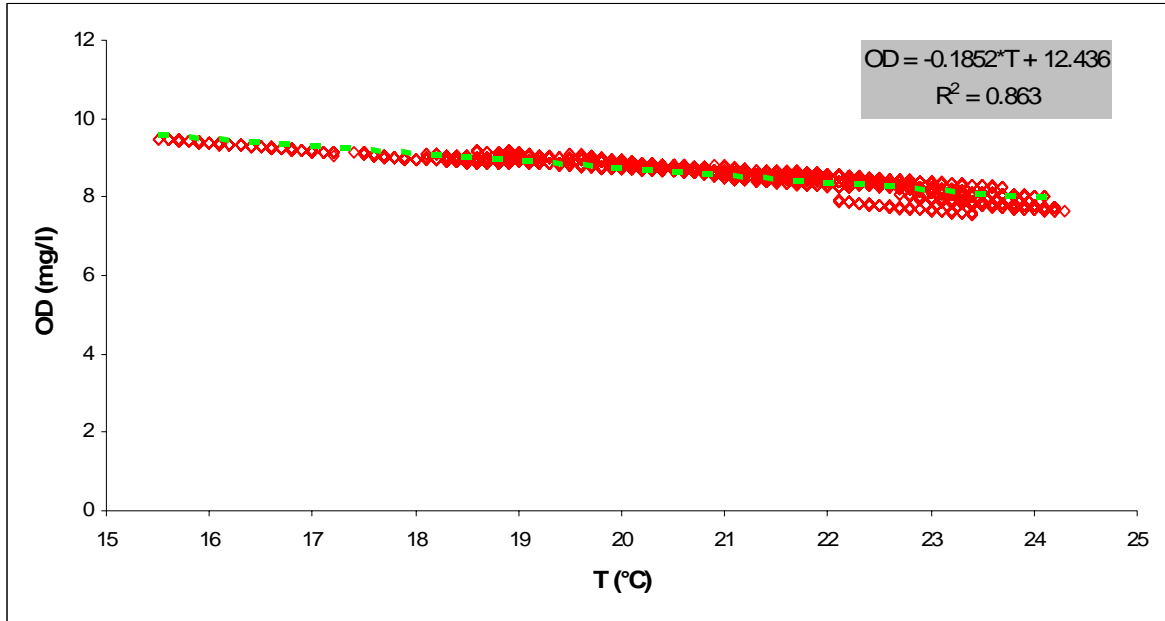


Figura 71: Andamento dell'OD in funzione di T - prove bianche - sezione rettangolare

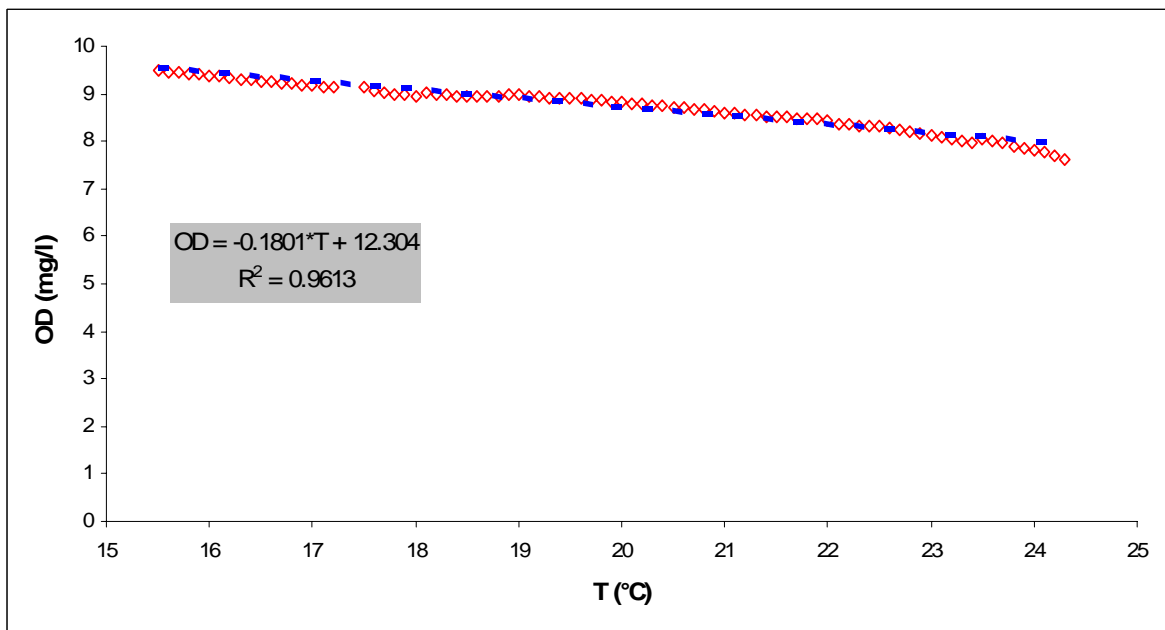


Figura 72: Andamento dell'OD in funzione di T - rielaborazione prove bianche - sezione rettangolare

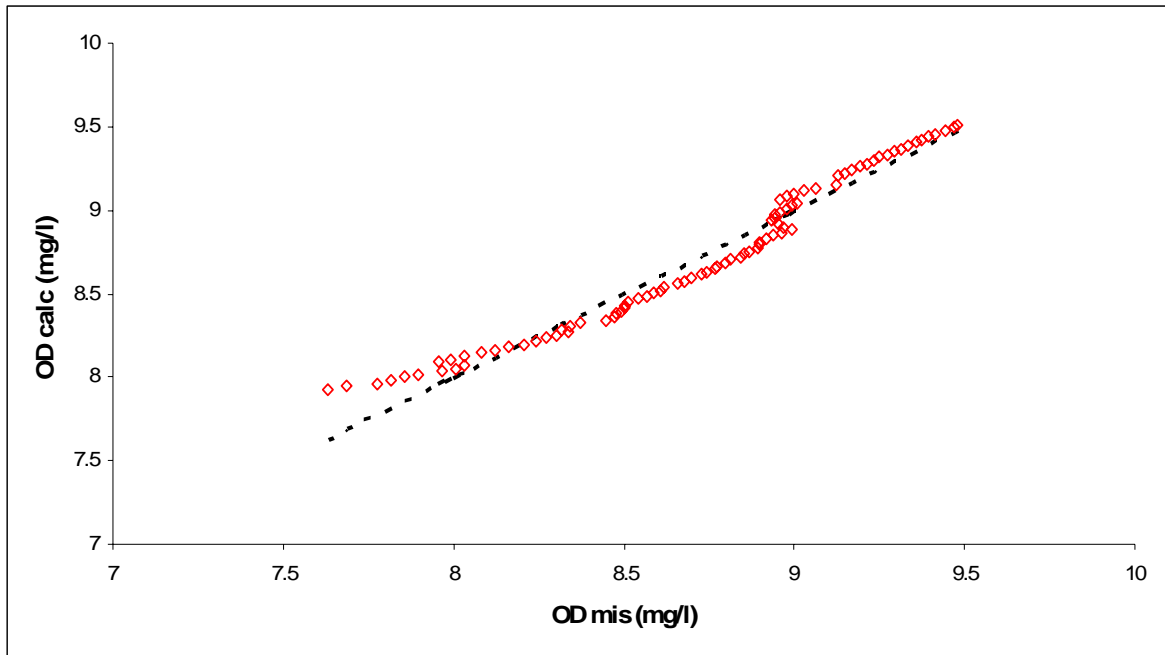


Figura 73: Andamento OD mis - OD calc - prove bianche - sezione rettangolare

Una volta acquisiti questi risultati, si è proceduto a elaborare i dati provenienti dalle prove su canale in sezione circolare e rettangolare considerati appartenenti a un unico campione, in range di temperatura diversi, esplorare la possibilità di costruire un'unica relazione rappresentativa del fenomeno. Come si può osservare in Figura 74, il risultato è molto soddisfacente, essendo evidente l'allineamento dei punti lungo una retta.

Eliminando la "coda" evidente nelle prove su sezione circolare alle temperature minori, è stata ricavata la seguente espressione regressiva lineare complessiva nella forma:

$$OD = -0.1602T + 11.913 \quad (102)$$

con coefficiente di correlazione $R^2 = 0.9881$.

La bontà dell'elaborazione è provata dal confronto fra OD misurato e OD calcolato (Figura 76) e dal valore dell'errore medio fra dato misurato e calcolato, risultato inferiore al 5%. Particolarmente interessante è risultato anche il confronto fra i dati di OD a saturazione calcolati con la precedente relazione (102), rappresentativa delle condizioni dinamiche sperimentali, con la relazione di letteratura (relazione 34 a pag 47, valida in condizioni statiche): lo scostamento medio è risultato del 4.86% (Figura 77), nel range di temperatura considerato.

I risultati di questo studio sono stati utilizzati per la successiva elaborazione delle prove di riossigenazione.

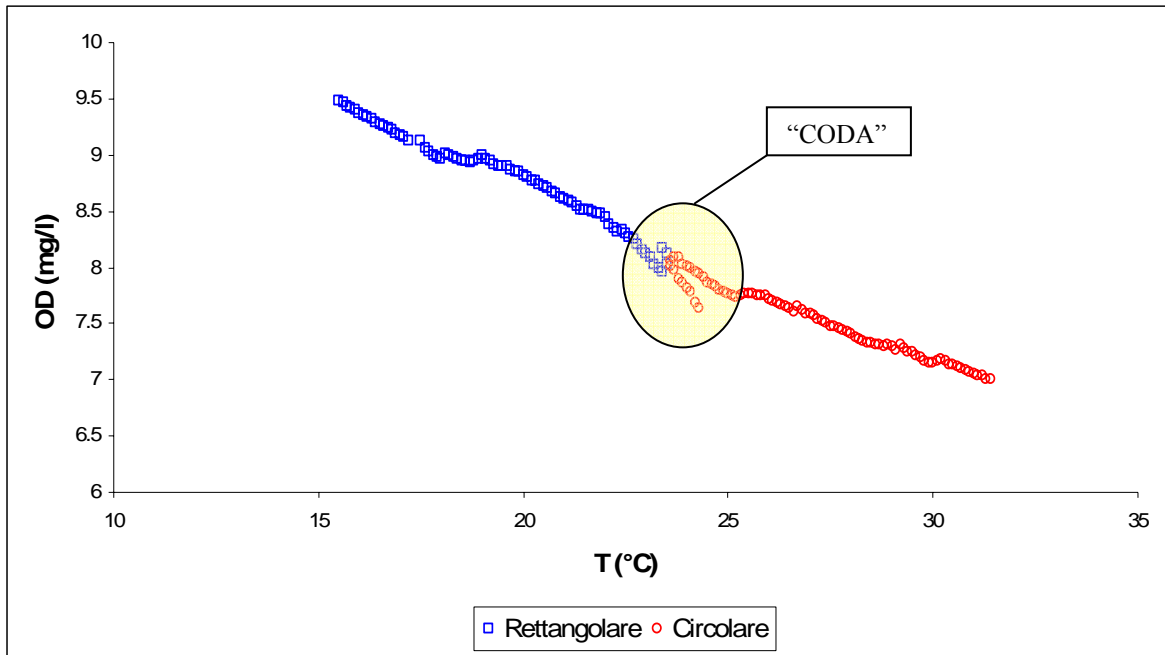


Figura 74: Allineamento dei punti delle prove bianche per le due sezioni

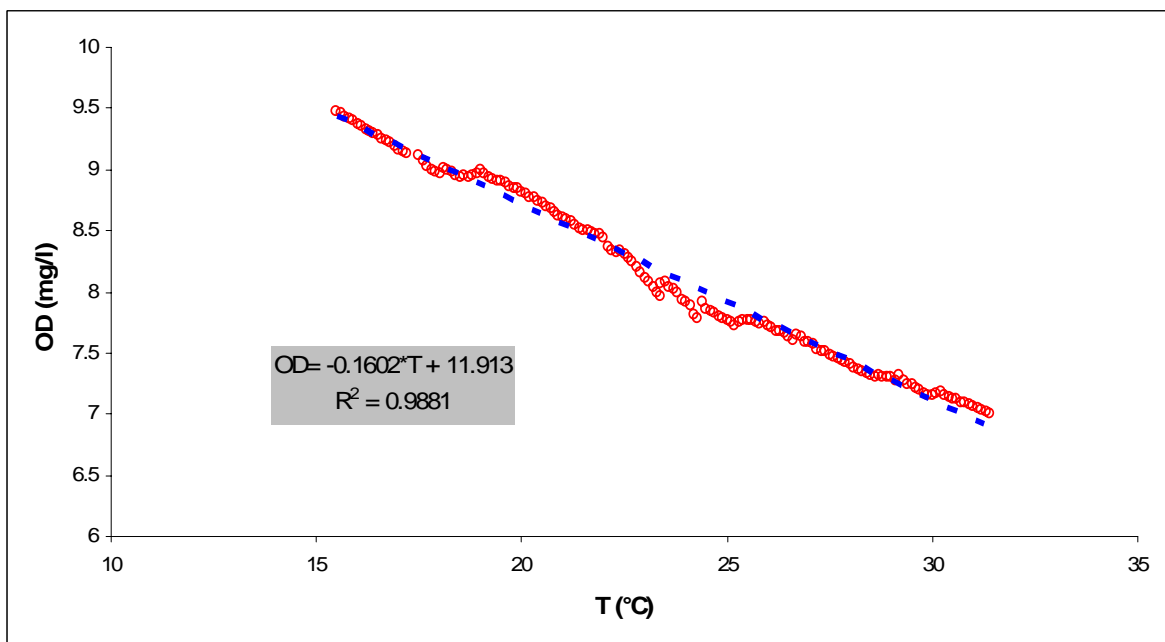


Figura 75: Regressione completa dei dati delle prove bianche

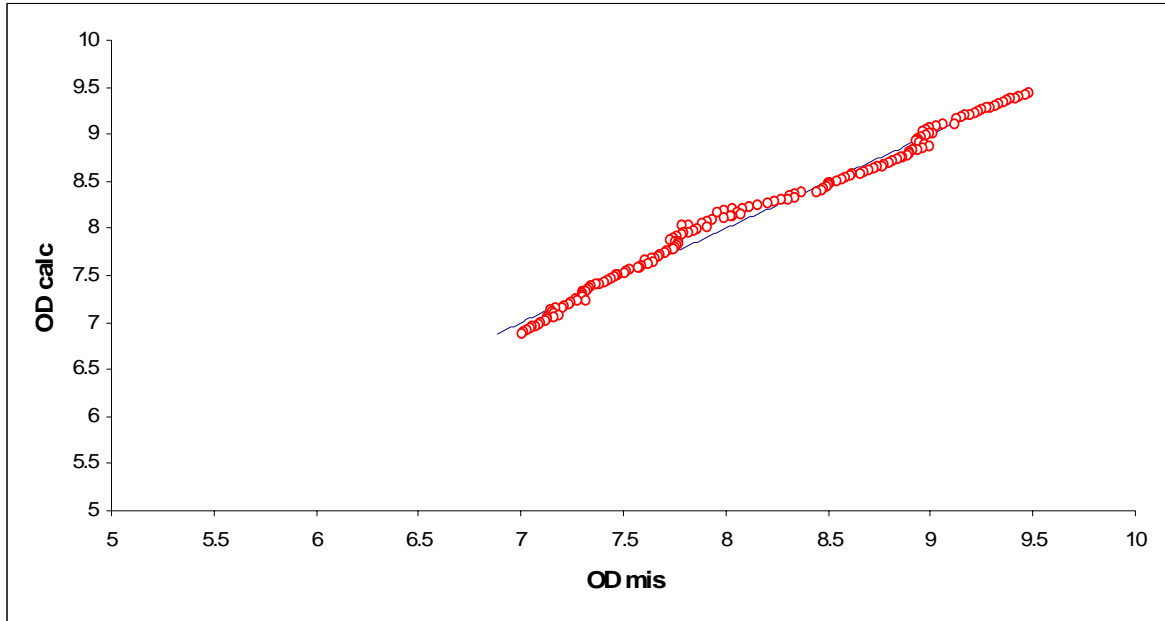


Figura 76: Confronto OD misurato-OD calcolato - prove bianche

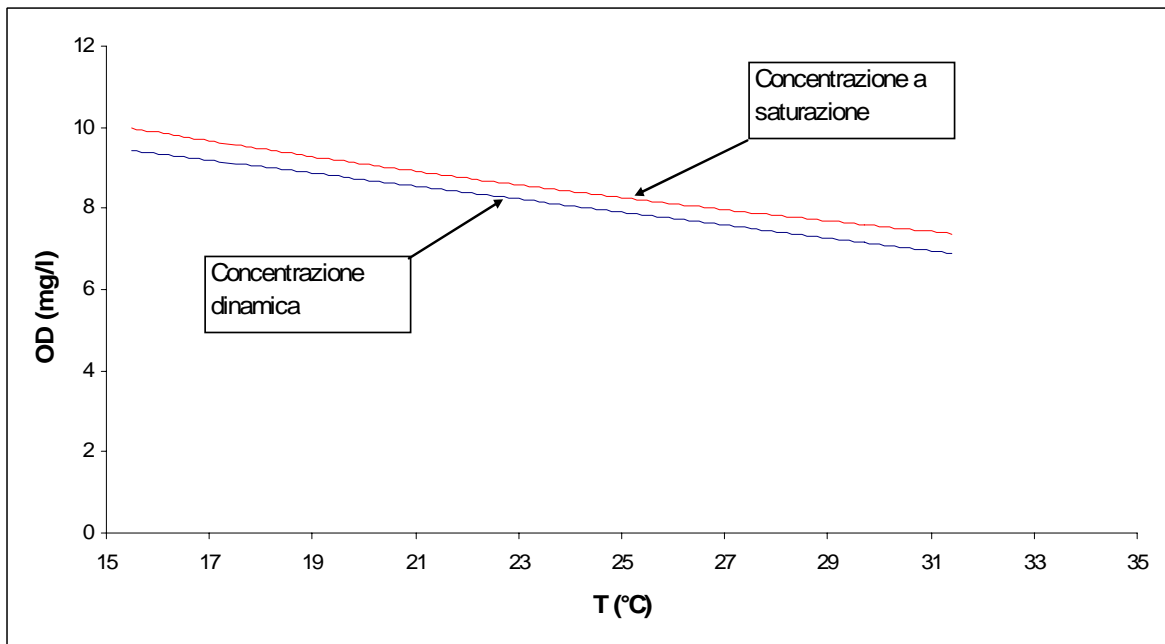


Figura 77: Confronto OD calcolato a saturazione e in condizioni dinamiche in funzione di T

Si è proceduto, inoltre, a verificare l'influenza che ha la scabrezza sull'andamento delle prove bianche, per verificare se fosse necessario procedere all'indagine sperimentale per scabrezze diverse da quella precedentemente indagata e corrispondente a un d_{50} del materiale di fondo pari a 0.25 mm. Si è partiti dalla considerazione che l'evoluzione dell'ossigeno disciolto dipenda dalla variazione di temperatura di prova e si sono ricercati i termini che contribuiscono a questa variazione. L'aumento della temperatura è funzione, essenzialmente, dello scambio energetico dipendente dai seguenti tre fattori:

- scambio termico con l'ambiente circostante;
- girante della pompa;
- attriti nel canale e nella tubazione di mandata.

4.1.4. Il lavoro degli attriti

Al fine di quantificare l'energia responsabile dell'aumento della temperatura e stimare quanta di questa dipenda dagli attriti durante la prova, si è fatto ricorso a una valutazione termodinamica, confrontando l'energia totale acquisita dalla massa fluida durante la prova e il lavoro degli attriti sulla medesima massa durante il medesimo periodo di tempo.

L'energia acquistata dalla corrente è determinabile considerando il sistema aperto composto dal canale immerso nell'atmosfera in una trasformazione isobara: $Q_C = c_p \cdot \Delta T$, dove:

- Q_C : energia termica acquisita dalla massa liquida (kJ);
- c_p : calore specifico a pressione costante ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$);
- ΔT : variazione della temperatura durante la prova (K).

Il valore del calore specifico a pressione costante, c_p , per l'acqua, a temperatura compresa fra 0 e 100 °C, è costante e vale 4,186 kJ.

Il lavoro delle forze d'attrito è determinato a partire dalla conoscenza dello sforzo tangenziale sul contorno bagnato, determinabile, per il moto uniforme, dalla nota relazione $\tau = \gamma \cdot R_H \cdot i$, dove:

- τ : tensione tangenziale sul contorno bagnato P (kPa);
- γ : peso specifico dell'acqua ($\frac{kN}{m^3}$);
- R_H : raggio idraulico della corrente (m);
- i : Pendenza del fondo alveo.

Considerando un volume liquido di lunghezza 1 m e sezione pari all'area liquida, è possibile calcolare il lavoro delle forze d'attrito, L_{Attr} , come prodotto della forza d'attrito, F_{Attr} , che si sviluppa sul fondo per lo spostamento totale del volume liquido durante il periodo di prova limitato a quando transita sul canale a superficie libera, ovvero $L_{Attr} = F_{Attr} \cdot A_b = \tau \cdot P \cdot 1 \cdot \Delta S$, dove A_b è l'area del contorno bagnato per una lunghezza di

un metro, P (m) è il contorno bagnato, 1 è riferito al fatto che si considera un volume di 1 m di lunghezza e ΔS è lo spostamento del volume liquido, pari al prodotto della velocità media della corrente, U , per il tempo di transito nella canaletta per il numero n_V di volte che il volume transita nella canaletta durante la prova t_{ca} . Sostituendo il valore di τ dalla precedente relazione, si determina:

$$L_{Attr} = \gamma \cdot R \cdot i \cdot P \cdot U \cdot t_{ca} \cdot n_V .$$

Il tempo che occorre al volume liquido per compiere un intero giro, t_g , è dato dalla somma di tre contributi:

1. il tempo che occorre al volume liquido per transitare nel canale, t_{ca} , dato dal rapporto fra la lunghezza del canale e la velocità media;
2. il tempo di stazionamento all'interno delle vasche t_v ;
3. il tempo occorrente per il ricircolo in pressione, t_t , dato dal rapporto fra la lunghezza del tubo in pressione, pari alla lunghezza della canaletta e la velocità media all'interno dello stesso.

Da quanto detto si può scrivere che $t_g = t_{ca} + t_v + t_t$. Il tempo t_v è di difficile determinazione e comunque è poco significativo rispetto agli altri due valori, per cui è lecito fissare $t_g \cong t_{ca} + t_t$.

Facendo il rapporto fra il tempo di prova, limitato alla sola fase riossigenativa t_g , e il tempo che occorre al volume liquido per transitare una volta nel canale, è possibile stimare il numero di ricircoli che il volume liquido compie durante il tempo di prova: $n_V = \frac{t_p}{t_g}$.

Esplicitando l'espressione del raggio idraulico, come rapporto fra la sezione liquida (A) e il contorno bagnato (P) si ricava:

$$L_{Attr} = \gamma \cdot \frac{A}{P} \cdot i \cdot P \cdot U \cdot t_{ca} \cdot n_V = \gamma \cdot A \cdot i \cdot U \cdot n_V \cdot t_c \Rightarrow L_{Attr} = \gamma \cdot i \cdot Q \cdot n_V \cdot t_{ca} \text{ (kJ)}.$$

Per verificare la percentuale di energia che provoca il riscaldamento dovuta all'attrito sul fondo del canale, si è calcolato il rapporto fra L_{Att} e Q_C . Nella successiva Tabella 14 sono riportati i calcoli effettuati per le pendenze $i = 3.0\%$, 2.5% , 2.0% e 1.5% e le portate $Q = 25, 20, 15, 10, 5$ l/s. È evidente che la quota di energia che provoca il riscaldamento dovuto agli attriti è trascurabile e raggiunge un valore massimo comunque inferiore al 6%.

Queste considerazioni di carattere energetico hanno consentito di evitare la ripetizione delle prove bianche con scabrezze diverse, essendo trascurabile il contributo degli attriti nel canale all'aumento di temperatura.

Nella Tabella 14 si è indicato con D_{condotta} il diametro, con A_{condotta} l'area della sezione e con U_{condotta} la velocità dell'acqua all'interno della condotta di mandata.

Q	A	i	ΔT	t_b	C_v	$D_{conodotta}$	L_c	U	$A_{conodotta}$	$U_{conodotta}$	t_{ca}	t_i	t_v	t_{rl}	n	L_{Att}	Q_c	L_{Att}/Q_c
l/s	m ²		K	min	kJ/(kg*K)	m	m	m/s	m ²	m/s	s	s	s	s		kJ	kJ	
5	0.005	3.0%	0.7	36	4.186	0.125	16	0.92	0.012	0.41	17.47	39.27	0	56.74	38	1.0	31.6	3.09%
10	0.009	3.0%	2	83	4.186	0.125	16	1.15	0.012	0.81	13.94	19.63	0	33.57	148	6.1	416.9	1.46%
15	0.012	3.0%	1.4	72	4.186	0.125	16	1.29	0.012	1.22	12.40	13.09	0	25.49	169	9.3	379.8	2.44%
20	0.014	3.0%	0.7	29.5	4.186	0.125	16	1.44	0.012	1.63	11.14	9.82	0	20.96	84	5.5	103.7	5.34%
25	0.016	3.0%	1.3	39.5	4.186	0.125	16	1.52	0.012	2.04	10.55	7.85	0	18.41	129	10.0	322.4	3.10%
5	0.006	2.5%	1.9	52	4.186	0.125	16	0.87	0.012	0.41	18.29	39.27	0	57.56	54	1.2	124.1	0.98%
10	0.009	2.5%	1.7	76.5	4.186	0.125	16	1.07	0.012	0.81	14.92	19.63	0	34.56	133	4.9	326.6	1.49%
15	0.012	2.5%	1.8	64	4.186	0.125	16	1.23	0.012	1.22	13.02	13.09	0	26.11	147	7.0	434.0	1.62%
20	0.015	2.5%	1.9	62.5	4.186	0.125	16	1.36	0.012	1.63	11.79	9.82	0	21.61	174	10.0	596.5	1.68%
25	0.018	2.5%	1.8	50	4.186	0.125	16	1.36	0.012	2.04	11.74	7.85	0	19.59	153	11.0	565.1	1.95%
5	0.006	2.0%	2.4	74.5	4.186	0.125	16	0.80	0.012	0.41	20.10	39.27	0	59.37	75	1.5	224.5	0.66%
10	0.010	2.0%	2.1	92.5	4.186	0.125	16	1.00	0.012	0.81	15.96	19.63	0	35.60	156	4.9	487.9	1.00%
15	0.013	2.0%	2	64	4.186	0.125	16	1.11	0.012	1.22	14.37	13.09	0	27.46	140	5.9	482.2	1.23%
20	0.016	2.0%	2	55.5	4.186	0.125	16	1.22	0.012	1.63	13.15	9.82	0	22.97	145	7.5	557.6	1.34%
25	0.019	2.0%	1.5	57.5	4.186	0.125	16	1.34	0.012	2.04	11.98	7.85	0	19.83	174	10.2	541.6	1.89%
5	0.007	1.5%	1.8	65	4.186	0.125	16	0.75	0.012	0.41	21.23	39.27	0	60.50	64	1.0	146.9	0.69%
10	0.011	1.5%	1	67	4.186	0.125	16	0.91	0.012	0.81	17.68	19.63	0	37.31	108	2.8	168.3	1.67%
15	0.014	1.5%	1.9	64.5	4.186	0.125	16	1.04	0.012	1.22	15.43	13.09	0	28.52	136	4.6	461.7	1.00%
20	0.018	1.5%	1.6	45.5	4.186	0.125	16	1.12	0.012	1.63	14.27	9.82	0	24.09	113	4.8	365.7	1.30%
25	0.021	1.5%	1.2	42	4.186	0.125	16	1.18	0.012	2.04	13.50	7.85	0	21.36	118	5.9	316.5	1.85%
5	0.008	1.0%	2.1	92.5	4.186	0.125	16	0.61	0.012	0.41	26.20	39.27	1	66.47	84	1.1	243.9	0.44%
10	0.013	1.0%	2.2	58	4.186	0.125	16	0.77	0.012	0.81	20.81	19.63	2	42.45	82	1.7	320.5	0.52%
15	0.017	1.0%	2.5	55.5	4.186	0.125	16	0.88	0.012	1.22	18.09	13.09	3	34.18	97	2.6	522.7	0.50%
20	0.021	1.0%	2.1	53	4.186	0.125	16	0.97	0.012	1.63	16.49	9.82	4	30.31	105	3.4	559.1	0.61%
25	0.025	1.0%	1.9	48	4.186	0.125	16	1.00	0.012	2.04	16.05	7.85	5	28.90	100	3.9	572.6	0.68%

Tabella 14: Calcolo dei lavori d'attrito per sezione circolare con scabrezza $d_{50}=0.25$ mm

4.1.5. Elaborazione dei dati di riossigenazione

I dati di riossigenazione sono stati elaborati in modo “semi-automatico” con fogli di calcolo opportunamente preparati. Il foglio di calcolo, infatti, è stato così predisposto:

- nella parte in alto a sinistra vengono riportati i dati generali su forma della sezione, portata, pendenza e scabrezza considerata (Tabella 15).

	A	B	C	D	E
1					
2	FORMA	CIRCOLARE			
3	Q	5	l/s	Portata di prova	
4	i	3	%	Pendenza di prova	
5	d ₅₀	0.25	mm		
6					

Tabella 15: Dati generali di prova

- nella parte in alto a destra vengono riportate le celle di calcolo del valore di saturazione attuale, con l’equazione della saturazione ricavata dalle prove bianche, e viene verificata, quindi, la percentuale di saturazione raggiunta dalla prova.

OD = -0.1341*T + 11.189	
a	-0.1341
b	11.189
T	26.7
OD	7.50
OD sat	7.61
% sat	98.57%

Tabella 16: Equazione della prova bianca

Scendendo in basso nel foglio si riportano i valori della durata della fase riossigenativa e della temperatura media di prova. I dati di *OD* sono riportati su di un grafico in funzione del tempo contestualmente al valore dell’*OD_{SAT}* verificando che a un certo punto la retta *OD_{SAT}* diventi asintoto della curva *OD(t)* (Figura 78).

A questo punto, potendo ritenersi conclusa la prova, ai fini della determinazione di *K_r*, si è adottata la procedura descritta nel paragrafo 2.4.1.

Uno dei problemi posti per la determinazione di *K_r*, attraverso le indagini di laboratorio (Veltri et al., 2006) è dovuto alla presenza delle vasche di monte e di valle, che rappresentano volumi di ristagno che, in linea di principio, possono influenzare il valore del coefficiente di riossigenazione attraverso modifiche al valore di *OD*.

E' stata, quindi, verificata l'influenza effettiva che questi volumi possono avere sul processo attraverso le considerazioni che seguono. Si faccia riferimento allo schema dell'impianto di prova per simulare il processo in Figura 79.

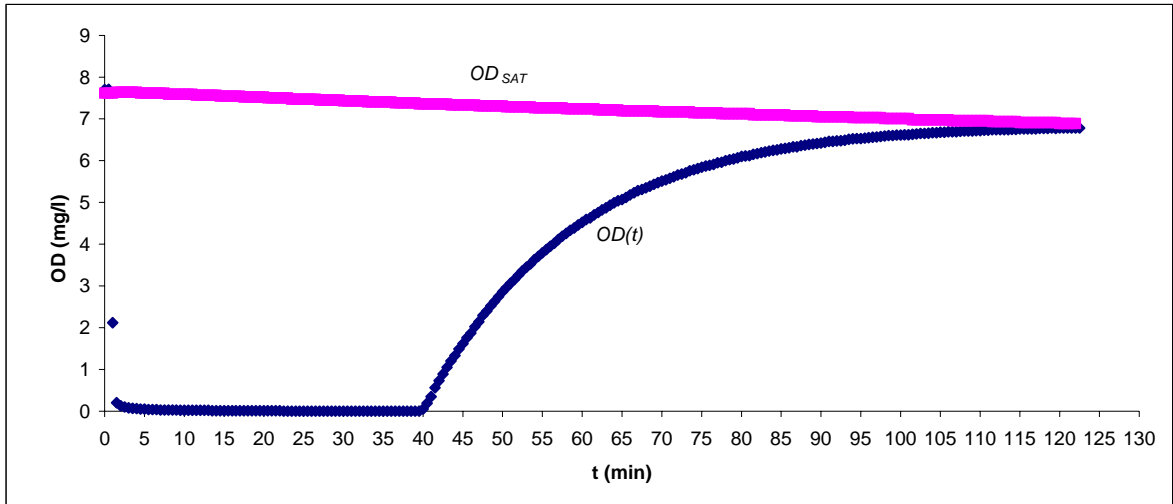


Figura 78: Grafico della prova di riossigenazione

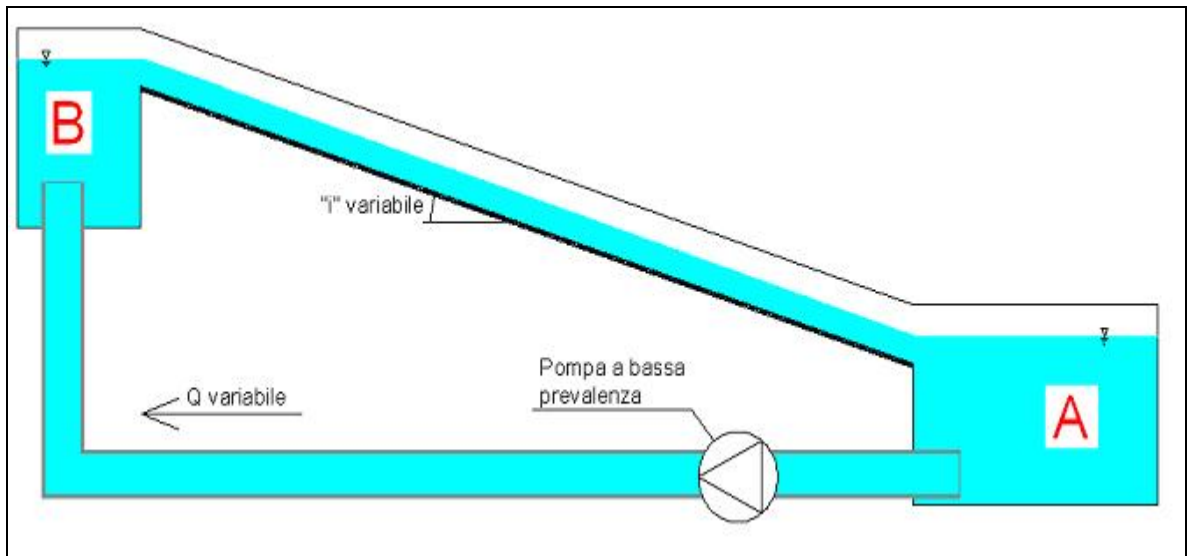


Figura 79: Schema concettuale dell'impianto di prova

Se V_{TOT} è il volume totale nel sistema e V_R è il volume che ricircola durante la prova, nell'intervallo di tempo compreso fra due misurazioni consecutive all'interno della vasca, è possibile scrivere, con sufficiente approssimazione, la seguente equazione di bilancio:

$$c_v(t) * V_v - c_v(t-1) * V_v = \Delta c * V_R \quad 103$$

dove si è indicato con:

- $c_v(t)$ la concentrazione di ossigeno disciolto (OD) nella vasca al tempo t di misura (mg/l);

- $c_v(t-1)$ la concentrazione di ossigeno disciolto nella vasca al tempo $t-1$ di misura (mg/l);
- Δc la variazione di concentrazione di ossigeno disciolto fra due misure successive, per effetto della riossigenazione nella canaletta (mg/l);
- $V_v = V_{TOT} - V_R$ il volume che non partecipa alla riossigenazione (m^3);
- $V_R = Q * \Delta t$ il volume che ricircola durante due successive misure (m^3);
- Q la portata durante la prova (m^3/s);
- Δt la differenza temporale fra due misurazioni successive (s).

Essendo l'intervallo di misura comparabile con il tempo di transito nell'acqua all'interno della canaletta, la variazione di concentrazione Δc può essere ipotizzata (con ridotto margine di errore) pari alla differenza di concentrazione di OD fra l'inizio e la fine della canaletta: $\Delta c = c_c(t)_{x=L} - c_c(t-1)_{x=0}$, dove si è indicato con $x=L$ l'ascissa corrispondente alla fine della canaletta (in corrispondenza dell'immissione nel serbatoio A) e con $x=0$ l'ascissa corrispondente all'inizio della canaletta.

Nell'ipotesi, imposta dalle modalità di prova, di intervallo di misura comparabile con il transito dell'acqua all'interno del canale, è lecito supporre che la concentrazione nell'ascissa iniziale della canaletta sia uguale a quella presente all'interno della vasca B e, quindi, all'interno della vasca A nel medesimo istante temporale, tenendo conto degli effetti del sistema di pompaggio, peraltro valutati tramite lo studio delle prove "bianche". Questa considerazione si traduce nella seguente uguaglianza: $c_c(t-1)_{x=0} = c_v(t-1)$.

Ciò consente di riscrivere l'equazione di bilancio nel modo seguente:

$$c_v(t) * V_v - c_v(t-1) * V_v = c_c(t)_{x=L} * V_R - c_v(t-1) * V_R$$

ossia:

$$c_c(t) = c_v(t) * \frac{V_v}{V_R} + c_v(t-1) * \frac{V_R - V_v}{V_R} \quad (104)$$

I valori ricavati dalla 104 permettono di considerare le concentrazioni, per ogni istante temporale successivo a quello della deossigenazione completa del volume liquido, depurate dall'effetto dei rapporti dei volumi. D'altra parte, non si sarebbe risolto il problema della miscelazione dei volumi se si fosse effettuata la misura di OD direttamente lungo il canale.

4.1.6. *Analisi dei dati per sezione semicircolare e scabrezza con $d_{50}=0.25$ mm*

Il primo set di prove è stata eseguito su una sezione semicircolare con scabrezza omogenea sul contorno bagnato realizzata con sabbia a granulometria uniforme avente $d_{50}=0.25$ mm. La ricerca del coefficiente di riossigenazione è stata condotta secondo le modalità descritte in precedenza e nelle Tabelle dalla 17 alla 22 vengono riportate le progressive di prova, per le forme della sezione, la scabrezza e la pendenza, indicando il valore di K_r alla temperatura media di prova, T_{MED} , il tempo di prova (t_P) e il valore di K_r riportato alla temperatura standard di 20°C $K_r(20)$.

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	31.82	31.97	154.5	23.96
2	10	39.31	31.74	116	29.76
3	15	59.33	28.73	84.5	48.23
4	20	63.79	32.37	73	47.58
5	25	75.60	29.22	58	60.75

Tabella 17: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=0.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	49.25	29.60	92.5	39.22
2	10	66.53	31.04	58	51.20
3	15	76.75	25.35	55.5	67.60
4	20	82.80	28.10	53	68.32
5	25	91.44	27.91	48	75.81

Tabella 18: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=1.0\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	60.77	28.57	74.5	49.59
2	10	66.24	32.83	65.5	48.86
3	15	93.02	27.80	48	77.31
4	20	79.63	32.29	55	59.49
5	25	92.45	31.61	46	70.20

Tabella 19: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=1.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r (20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	71.28	31.07	61.5	54.82
2	10	69.12	27.81	63.5	57.43
3	15	106.85	28.32	44	87.71
4	20	119.81	26.43	38	102.87
5	25	133.06	28.75	34	108.11

Tabella 20: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=2.0\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r (20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	73.30	30.28	62	57.44
2	10	83.23	28.92	50.5	67.36
3	15	114.62	27.76	38.5	95.36
4	20	133.49	27.81	33	110.92
5	25	141.12	28.53	28	115.28

Tabella 21: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=2.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r (20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	65.09	27.63	51	54.31
2	10	97.92	27.98	41.5	81.03
3	15	116.21	29.87	38	91.96
4	20	136.80	28.96	29.5	110.61
5	25	143.71	25.68	29	125.60

Tabella 22: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=0.25$ e $i=3.0\%$

Si può osservare dalle tabelle e dal grafico in Figura 80 che tendenzialmente, eccetto qualche caso isolato, a portate e pendenze più basse corrispondono valori di K_r minori, a riprova del fatto che il valore di K_r è fortemente influenzato dalle caratteristiche della corrente.

Una particolare osservazione va fatta per i valori di K_r riferiti alle prove con pendenza di 0.5%, che risultano distanziati rispetto agli altri.

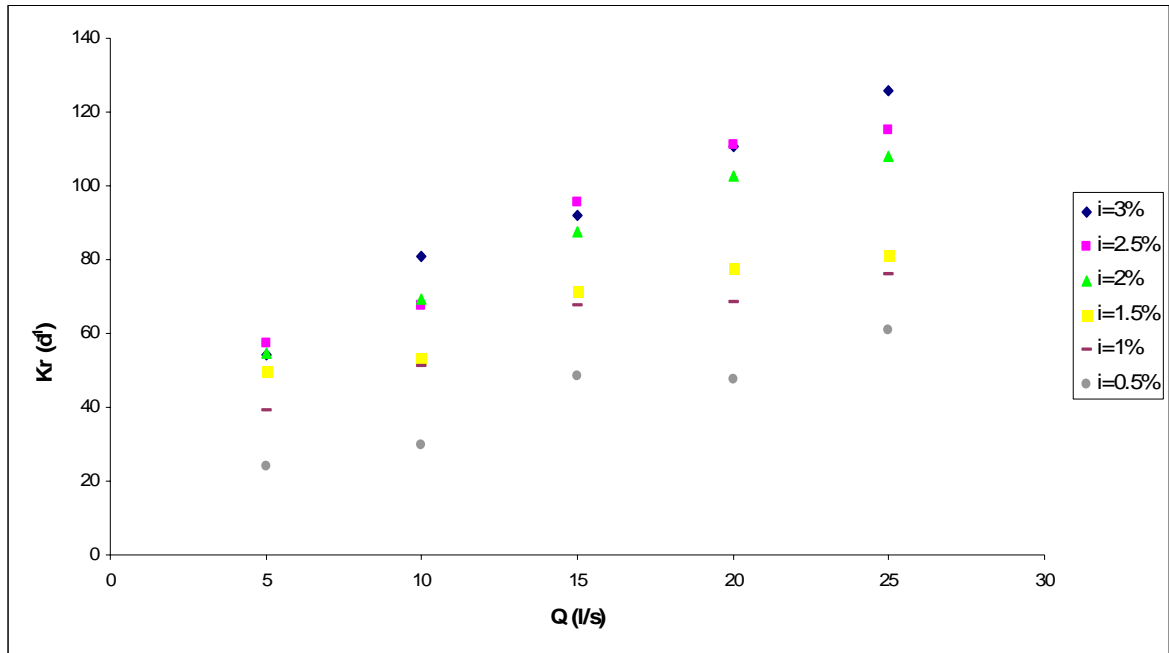


Figura 80: Variazione di K_r in funzione di portata e pendenza – sez circolare – $d_{50}=0.25$

4.1.7. Analisi dei dati per sezione semicircolare e scabrezza con $d_{50}=3.0$ mm

Il secondo set di prove è stato eseguito considerando la sezione semicircolare e scabrezza del contorno bagnato realizzata con ghiaia con $d_{50}=3.0$ mm. Nelle successive Tabelle, dalla 23 alla 28, vengono riportate le progressive di prova, per le forme della sezione, la scabrezza e la pendenza, indicando il valore di K_r alla temperatura media di prova (T_{MED}), il tempo di prova (t_P) e riportato alla temperatura standard di 20°C, $K_r(20)$.

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	19.58	27.78	199.5	16.28
2	10	26.21	27.27	177.5	22.06
3	15	34.85	29.10	136.5	28.08
4	20	44.35	29.09	88.5	35.75
5	25	49.97	29.74	86.5	39.66

Tabella 23: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=0.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	48.24	29.76	96.5	38.27
2	10	63.22	30.62	82	49.14
3	15	75.17	32.31	52.5	56.13
4	20	85.25	31.46	55	64.96
5	25	96.34	28.58	48.5	78.61

Tabella 24: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=1.0\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r (20)$
	l/s	d^{-1}	$^{\circ}C$	min	d^{-1}
1	5	69.55	29.84	62.5	55.07
2	10	77.62	29.32	47	62.23
3	15	100.94	30.31	43	79.05
4	20	98.21	29.90	49	77.65
5	25	111.46	30.06	37.5	87.79

Tabella 25: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=1.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r (20)$
	l/s	d^{-1}	$^{\circ}C$	min	d^{-1}
1	5	70.27	31.95	61	52.93
2	10	98.21	29.30	45	78.76
3	15	100.51	27.56	44	84.01
4	20	112.90	28.58	39	92.12
5	25	133.92	29.73	31.5	106.31

Tabella 26: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=2.0\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r (20)$
	l/s	d^{-1}	$^{\circ}C$	min	d^{-1}
1	5	83.52	29.95	54	65.97
2	10	91.58	28.18	48	75.44
3	15	107.14	28.50	40.5	87.59
4	20	130.90	29.00	33.5	105.73
5	25	128.88	28.91	27.5	104.34

Tabella 27: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=2.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r (20)$
	l/s	d^{-1}	$^{\circ}C$	min	d^{-1}
1	5	81.65	27.63	51	68.13
2	10	105.12	30.34	37.5	82.25
3	15	118.22	27.23	37.5	99.60
4	20	132.34	28.02	34.5	109.40
5	25	154.22	28.25	28.5	126.83

Tabella 28: Coefficiente di riossigenazione sezione circolare per $d_{50}=3$ e $i=3.0\%$

Si può osservare dalle Tabelle e dal grafico di Figura 81 che, come nel caso del precedente set di prove con scabrezza corrispondente a $d_{50}=0.25$ mm, c'è la tendenza, eccetto per qualche caso isolato, a portate e pendenze più basse per valori di K_r minori, a dimostrazione del fatto che il valore di K_r è fortemente influenzato dall'idraulica del corso d'acqua.

Una particolare osservazione, anche in questo caso, va fatta per i valori di K_r riferiti alle prove con pendenza di 0.5%, che risultano distanziati rispetto agli altri.

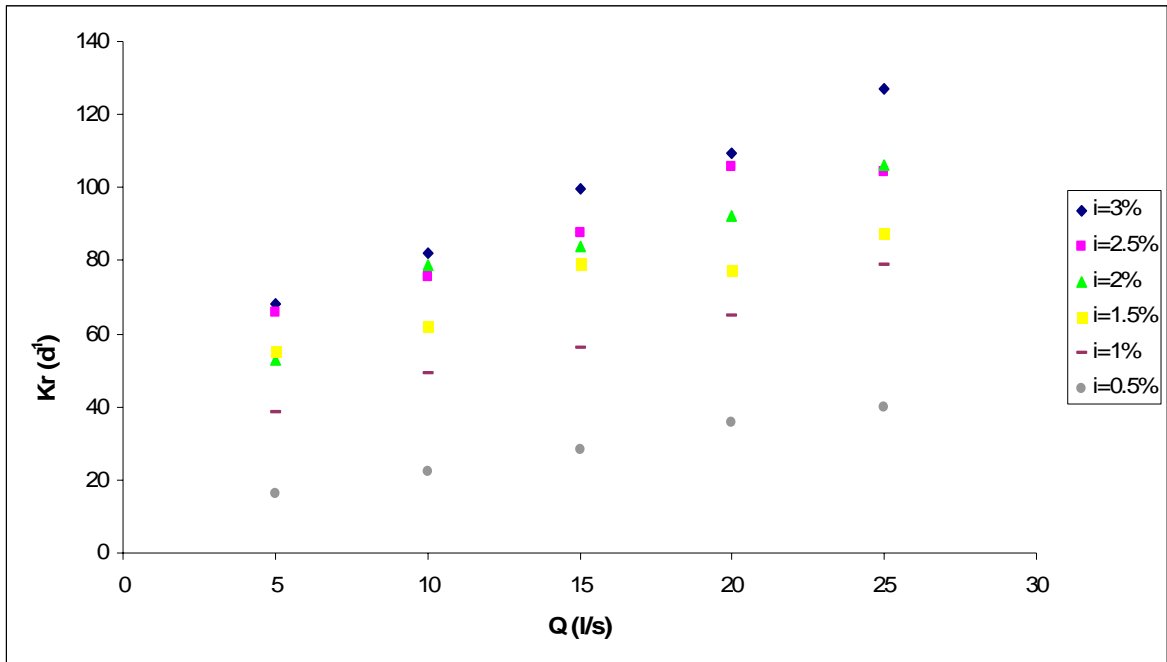


Figura 81: Variazione di K_r in funzione di portata e pendenza – sez circolare – $d_{50}=3.0$ mm

4.1.8. Elaborazione dei dati per sezione rettangolare e scabrezza con $d_{50}=0.25$ mm

Una volta acquisiti i risultati di riossigenazione per la sezione di deflusso circolare, si è proceduto, come descritto in precedenza, al montaggio della sezione rettangolare, di larghezza 40 cm, con la quale si sono ottenuti altri due set di dati, uno riferito alla scabrezza di 0.25 mm e l'altro di 3.0 mm.

Nelle successive Tabelle, dalla 29 alla 34, e nel grafico in Figura 82, vengono presentati i dati ricavati nei modi precedentemente descritti.

Si può osservare, come già successo nel caso dei precedenti set di prove, che tendenzialmente, eccetto che per qualche caso isolato, a portate e pendenze più basse corrispondono valori di K_r minori.

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d^{-1}	$^{\circ}C$	min	d^{-1}
1	5	53.86	18.87	93	55.32
2	10	67.97	18.90	72.5	69.77
3	15	71.86	16.26	80.5	78.52
4	20	69.12	18.12	76	72.28
5	25	89.86	17.83	58.5	94.60

Tabella 29: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=0.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	53.86	14.30	88	61.65
2	10	78.05	18.03	61	81.78
3	15	80.06	18.09	59	83.78
4	20	83.66	15.12	57.5	93.93
5	25	89.42	17.59	54	94.68

Tabella 30: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=1.0\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	72.43	20.44	66	71.68
2	10	79.34	19.12	63.5	81.02
3	15	102.67	18.29	48.5	106.91
4	20	111.46	21.26	43.5	108.17
5	25	107.14	18.72	45.5	110.44

Tabella 31: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=1.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	84.38	17.71	57.5	89.09
2	10	95.33	17.13	51	102.05
3	15	104.26	18.71	46.5	107.50
4	20	112.32	19.80	43.5	112.86
5	25	132.05	18.68	37	136.25

Tabella 32: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=2.0\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	74.16	15.55	66	82.41
2	10	94.75	18.37	55	98.48
3	15	119.09	17.49	42	126.38
4	20	121.68	18.48	42.5	126.16
5	25	126.00	19.13	36	128.63

Tabella 33: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=2.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	81.07	18.92	51.5	83.17
2	10	110.02	19.20	42.5	112.12
3	15	121.97	16.12	40.5	133.74
4	20	140.83	16.83	35.5	151.83
5	25	151.49	15.55	32.5	168.34

Tabella 34: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=0.25$ e $i=3.0\%$

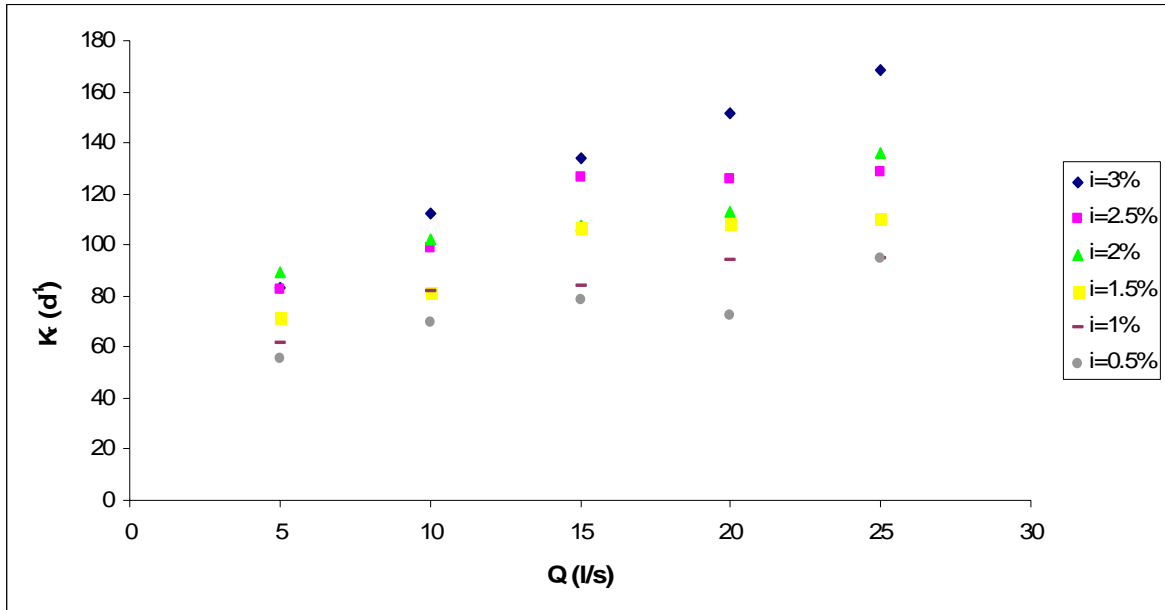


Figura 82: Variazione di K_r in funzione di portata e pendenza – sez rettangolare – $d_{50}=0.25$

Contrariamente a quanto successo nel caso del canale circolare, in questo caso, i valori di K_r riferite alle prove con pendenza di 0.5% , non si caratterizzano per un comportamento molto diverso da quello delle altre prove di questa sezione rettangolare, nel senso che la loro posizione sembra essere compatibile con quella delle altre prove.

4.1.9. *Analisi dei dati per sezione rettangolare e scabrezza con $d_{50}=3.0$ mm*

L'ultimo set di prove della campagna sperimentale si riferisce a una sezione di deflusso rettangolare, con scabrezza sul contorno bagnato determinata dalla interposizione di sabbia a granulometria uniforme avente $d_{50}=3.0$ mm.

I risultati sono riportati nelle successive Tabelle (35-40) e nel grafico in Figura 83.

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d^{-1}	$^{\circ}C$	min	d^{-1}
1	5	29.23	16.89	163.5	31.47
2	10	45.79	17.40	102	48.70
3	15	41.18	17.86	120.5	43.33
4	20	39.89	17.42	110.5	42.40
5	25	44.06	17.08	108.5	47.22

Tabella 35: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=0.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	29.23	17.69	163.5	30.88
2	10	45.79	15.33	102	51.16
3	15	41.18	16.29	120.5	44.97
4	20	45.22	17.92	105	47.51
5	25	55.44	16.43	85	60.33

Tabella 36: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=1.0\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	34.70	15.06	131.5	39.01
2	10	59.90	15.83	78.5	66.13
3	15	59.62	16.21	78.5	65.23
4	20	69.70	16.84	67	75.12
5	25	67.82	16.67	69.5	73.40

Tabella 37: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=1.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	53.71	13.87	89.5	62.12
2	10	66.67	16.71	70.5	72.08
3	15	76.32	16.10	61	83.72
4	20	83.66	16.20	55.5	91.56
5	25	88.70	16.46	53	96.46

Tabella 38: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=2.0\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	67.97	16.20	70	74.38
2	10	83.09	14.92	55.5	93.72
3	15	91.01	17.04	51.5	97.64
4	20	95.47	16.80	48.5	102.99
5	25	106.42	16.65	44	115.21

Tabella 39: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=2.5\%$

PROVA	Q	K_r	T_{MED}	t_P	$K_r(20)$
	l/s	d ⁻¹	°C	min	d ⁻¹
1	5	78.48	16.82	60	84.64
2	10	95.90	16.94	48.5	103.12
3	15	112.90	16.71	41	122.05
4	20	111.02	16.32	42	121.16
5	25	116.78	15.52	40	129.88

Tabella 40: Coefficiente di riossigenazione sezione rettangolare per $d_{50}=3.0$ e $i=3.0\%$

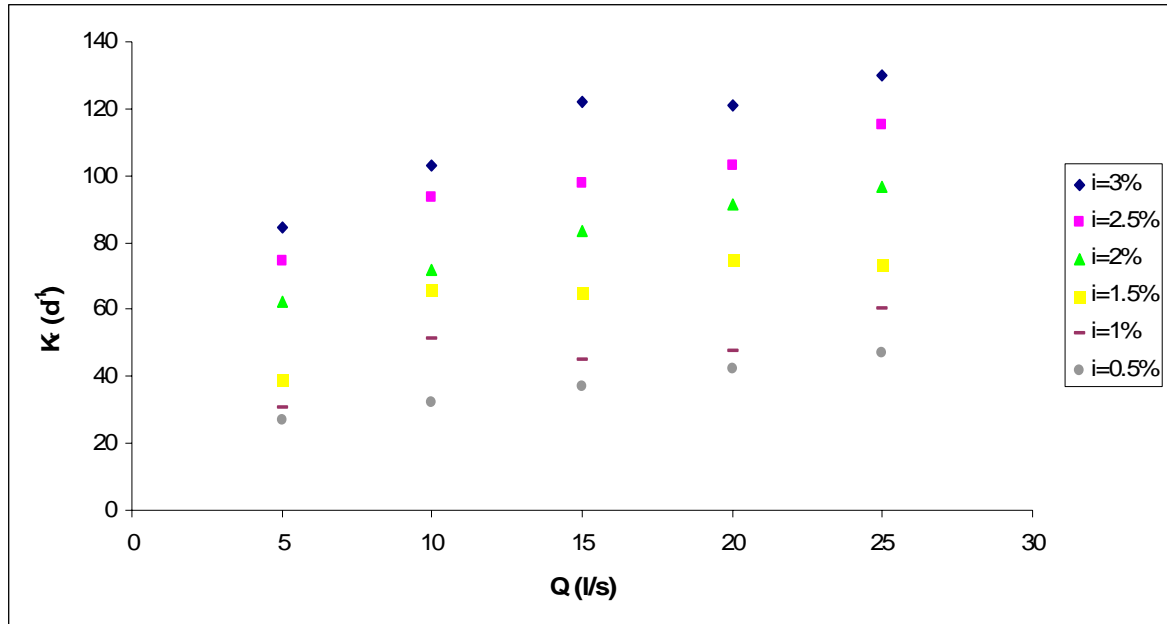


Figura 83: Variazione di K_r in funzione di portata e pendenza – sez rettangolare – $d_{50}=3.0$ mm

Anche in questo caso, come per quello riferito alla sezione rettangolare con $d_{50}=0.25$ mm, i valori di K_r riferiti alle prove con pendenza 0.5% non si caratterizzano per un comportamento molto diverso da quello delle altre prove della sezione rettangolare.

4.2. INTERPRETAZIONE DEI DATI DI SPERIMENTALI

Una volta stimati i valori di K_r per ciascuna portata, pendenza, scabrezza e forma della sezione, si è proceduto alla ricerca del legame funzionale di carattere generale fra le grandezze idrauliche della corrente e il coefficiente di riossigenazione, seguendo l'approccio dell'analisi dimensionale.

Sono stati, quindi, riassunti tutti i valori necessari a definire i raggruppamenti adimensionali ed è stata effettuata l'analisi di regressione, risultata più che soddisfacente con una relazione sotto forma di potenza.

4.2.1. L'analisi dimensionale

Seguendo l'impostazione data alla ricerca, di cui questa tesi rappresenta un compimento intermedio, e avendo a disposizione un notevole set di dati sperimentali omogeneo dal punto di vista delle modalità di raccolta, è stata condotta una nuova analisi dimensionale,

che tiene conto di tutte le grandezze considerate nella schematizzazione del fenomeno fisico. La relazione funzionale in forma generale tra i parametri individuati è la seguente:

$$K_r = f_1(g; \rho; \nu; \sigma; D_m; B; U; h_s; i; J_E; \varepsilon) \quad (105)$$

in cui g [$L T^{-2}$] è l'accelerazione di gravità, ρ [$M L^{-3}$], ν [$L^2 T^{-1}$], σ [$M T^{-2}$] sono rispettivamente la densità, la viscosità cinematica e la tensione superficiale dell'acqua, D_m [$L^2 T^{-1}$] è la diffusività molecolare dell'ossigeno in acqua, B [L] è la larghezza in sommità della corrente, ovvero la larghezza dell'interfaccia aria-acqua, U [$L T^{-1}$] è la velocità media della corrente, h_s [L] è l'altezza significativa della corrente pari a A/B , in cui A [L^2] è l'area della sezione trasversale, i [-] è la pendenza del fondo, J_E [-] è la pendenza della superficie libera e ε [L] è la scabrezza rappresentata dal coefficiente della formula di Colebrook-White come modificata in Yen (2002).

Tutte le grandezze funzioni della temperatura sono riportate ai valori standard di 20°C ($\nu = 1 \cdot 10^{-6} m^2 / s$, $D_m = 1,8 \cdot 10^{-9} m^2 / s$, $\sigma = 7,28 \cdot 10^{-2} kg / s^2$), ciascuna secondo le proprie leggi di variazione.

Una volta definite le grandezze si è proceduto a verificare quali fra queste fossero tra loro correlate da relazioni deterministiche in modo da evitare di falsare i risultati delle correlazioni.

La prima considerazione da fare è sul legame esistente fra la viscosità cinematica e la diffusività molecolare: l'equazione di Stokes-Einstein (Chao et al., 1987), infatti, lega le due grandezze e rende possibile eliminare una delle due dall'analisi. La (105) diventa così:

$$K_r = f_2(g; \rho; \sigma; D_m; B; U; h_s; i; J_E; \varepsilon) \quad (106)$$

In secondo luogo, si è ritenuta valida l'ipotesi di moto uniforme, come evidenziato dai risultati idraulici; in questa ipotesi $i=J_E$ e, inoltre, esiste una relazione del tipo $U = f(h; b; i; \varepsilon)$. Da ciò, quindi, la (106) diventa:

$$K_r = f_3(g; \rho; \sigma; D_m; b; U; h_s; \varepsilon) \quad (107)$$

Scegliendo come grandezze di base indipendenti per l'applicazione del teorema di Buckingham ρ , g , h_s , si ottengono sei parametri adimensionali fra loro legati:

$$K_r \sqrt{\frac{h_s}{g}} = f_4\left(\frac{\sigma}{g \rho h_s^2}; \frac{D_m}{h_s \sqrt{gh}}; \frac{B}{h_s}; \frac{U}{\sqrt{gh_s}}; \frac{\varepsilon}{h_s}\right) \quad (108)$$

La (108) può essere riscritta nel seguente modo:

$$K_r \frac{h_s^2}{D_m} = f_5 \left(We; Sc; \frac{B}{h_s}; Fr; \frac{\varepsilon}{h_s} \right) \quad (109)$$

in funzione dei classici numeri di Weber, We , Schmidt, Sc , Froude, Fr , definiti rispettivamente come:

$$We = \frac{\rho U^2 h_s}{\sigma}; \quad Sc = \frac{\nu}{D_m}; \quad Fr = \frac{U}{\sqrt{gh_s}}$$

Considerato che, avendo riferito le grandezze alla temperatura di 20°C, Sc si mantiene costante, e indicando con:

$$KR = K_r \frac{h_s^2}{D_m}; \quad BR = \frac{b}{h_s}; \quad S = \frac{\varepsilon}{h_s};$$

la (109) diventa:

$$KR = f_6 (We; BR; Fr; S) \quad (110)$$

La (110) esprime, quindi, il legame funzionale fra le variabili adimensionali, di cui occorre precisare la struttura tramite i dati sperimentali disponibili.

4.2.2. *Struttura del legame funzionale*

Il legame funzionale di cui all'equazione (110) ha trovato la sua struttura con l'ausilio dei recenti dati sperimentali. In tutto sono state considerate 100 prove, avendo eliminato quelle riferite alla pendenza dello 0.5%.

Riassumendo, si sono analizzate due sezioni diverse di deflusso: una sezione di forma semicircolare, avente diametro $D=50$ cm e una sezione di forma rettangolare, avente larghezza $B=40$ cm. Per entrambe le sezioni è stata variata la pendenza da 1,0 a 3,0% e la portata da 5,0 a 25,0 l/s. E' stata, inoltre, variata la scabrezza utilizzando campioni di sabbia con $d_{50}=0.25$ e 3,00 mm.

I range di variazione dei parametri dell'analisi dimensionale riferiti ai dati di laboratorio sono riportati nella seguente Tabella 41.

We	BR	Fr	S	KR
65,53	4,83	0,64	0,04	146,18
1503,34	24,19	2,23	1,03	3 374,46

Tabella 41: Range dei parametri adimensionali

La migliore regressione dei dati, con coefficiente di correlazione pari a 0,96, è risultata essere una regressione di potenza multiparametrica della seguente forma:

$$KR = \alpha \cdot We^\beta \cdot B^\zeta \cdot Fr^\iota \cdot S^\varphi \quad (111)$$

in cui $\alpha = 6 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 1.7$, $\zeta = 1.114$, $\iota = -2.54$, $\varphi = 0.0005$.

Dai risultati ottenuti si può osservare che l'influenza del termine S , ovvero della scabrezza rispetto alla profondità della corrente, risulta essere trascurabile, essendo l'esponente del termine stesso molto piccolo. Per questo motivo è stata rifatta la regressione escludendo il parametro S , da cui si è tratta la seguente relazione, in cui è possibile notare la costanza degli esponenti dei numeri adimensionali:

$$KR = 6 \cdot 10^{-3} \cdot We^{1.7} \cdot B^{1.114} \cdot Fr^{-2.54} \quad (112)$$

Il grafico successivo (Figura 84) evidenzia il confronto tra i valori del parametro KR calcolato, KR_{calc} , ricavati attraverso la (112), e quelli di KR misurato, KR_{mis} , ricavati direttamente dai valori ottenuti in laboratorio.

Gli scostamenti percentuali tra KR calcolato e KR misurato sono stati, per tutti i punti campionari, calcolati a partire dalla seguente relazione:

$$E\% = \frac{|KR_{cal} - KR_{mis}|}{0.5 \cdot (KR_{cal} + KR_{mis})} \quad (113)$$

in base alla quale si è ottenuto un valore medio dell'errore standard della stessa $E\%$ pari a 8,61%, un valore massimo del 41,88% e una deviazione standard del 10,35%. Analizzando l'insieme dei valori ottenuti dalla (113) si ottiene che il 30% dei punti ha un errore contenuto entro il 5%, il 47% ha un errore inferiore al 10% e solo lo 0,07% soffre di un errore superiore al 30%.

Esplicitando il valore di K_r dalla (112) e considerando i valori della regressione, si ottiene:

$$K_r = 2.118 \cdot 10^{-3} \cdot U^{0.86} \cdot h_s^{-0.154} \cdot B^{1.114} \quad (114)$$

Dalla (114) si può osservare come K_r aumenti con la velocità media della corrente, U , e con la larghezza della corrente in superficie, B , e diminuisca con l'altezza significativa h_s . Nel grafico successivo (Figura 85) è riportato il confronto tra K_r calcolato, ricavato attraverso la (114), e K_r misurato, ricavato direttamente dai valori ottenuti in laboratorio, entrambi espressi in d^{-1} .

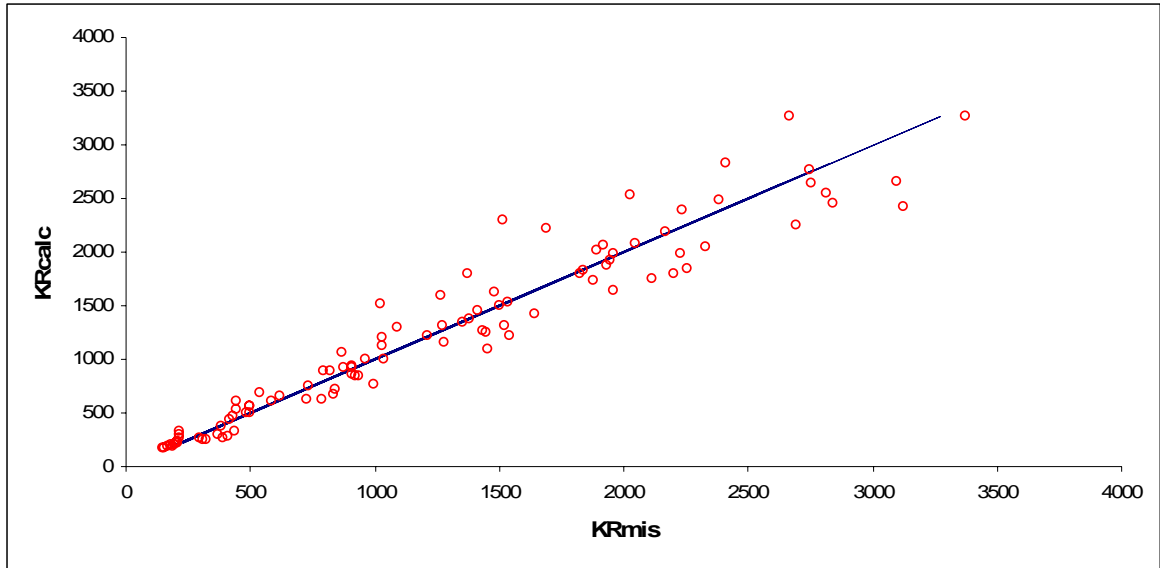


Figura 84: Confronto tra KR misurato e KR calcolato

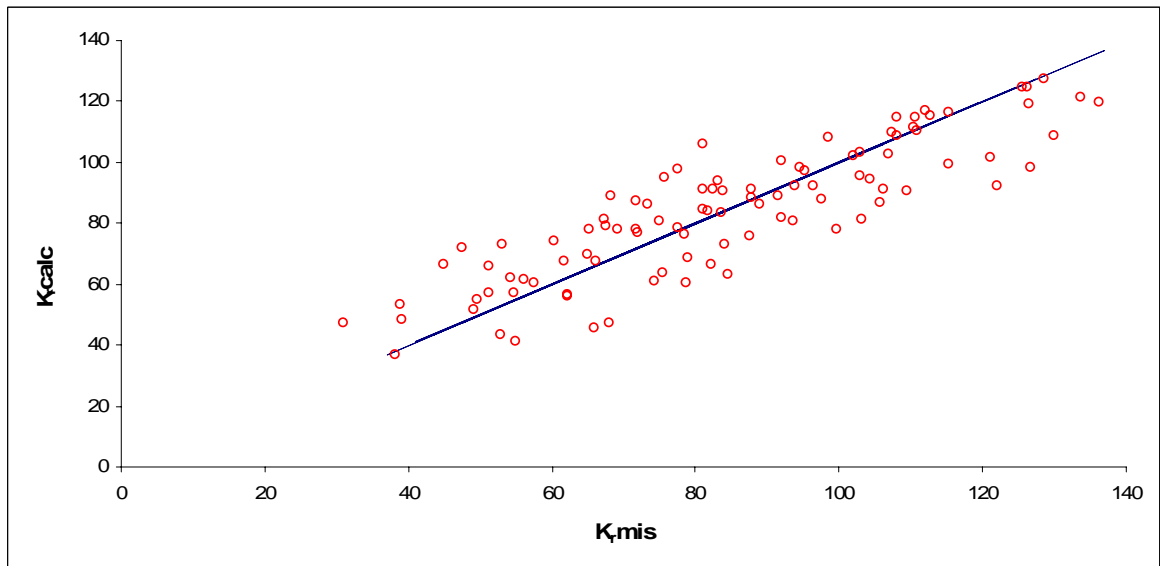


Figura 85: Confronto tra K , misurato e K , calcolato

4.2.3. *Applicazione del modello interpretativo ai dati di letteratura*

Acquisito questo risultato positivo riguardo alla interpretazione dei dati raccolti nel laboratorio “Grandi Modelli Idraulici” del Dipartimento di Difesa del Suolo tramite l’analisi dimensionale, si è proceduto ad applicare la relazione trovata ai dati di letteratura precedentemente esposti.

Il primo passo effettuato, per applicare la (112) ai dati di letteratura, è stato quello di verificarne i limiti di applicabilità e, di conseguenza, si è calcolato, per ogni set di dati, il

range di variazione dei parametri adimensionali utilizzati nella formulazione, riportati nelle successive Tabella 42 e Tabella 43 e confrontato con i range di Tabella 41. E' evidente come non vi sia una completa sovrapposizione dei campi di valori.

We	B	Fr	KR
28.24	9.90	0.36	318.40
1 477.34	41.67	1.91	2 077.29

Tabella 42: Range dei parametri utilizzati da Moog e Jirka (1999)

We	B	Fr	KR
90.95	1.93	0.78	583.33
3 577.63	9.00	3.26	10 133.50

Tabella 43: Range dei parametri utilizzati da Balmè e Tagizadeh Nassèr (1995)

Ritenendo, pertanto, di non essere nelle condizioni di poter applicare la (112), si è proceduto ad applicare nuovamente la (111), al fine di ottenere una nuova struttura del legame funzionale per un campione di dati composto dai dati di letteratura di Moog e Jirka (11 dati) e di Balmè e Tagizadeh Nassèr (50 dati), oltre a quelli della nuova campagna sperimentale del Dipartimento di Difesa del Suolo.

Naturalmente, in questo caso i range di variazione dei parametri dell'analisi dimensionale sono più ampi, come evidenziato nella seguente Tabella 44.

WE	B	Fr	KR
28.24	1.93	0.36	146.18
3 577.63	41.67	3.26	10 133.50

Tabella 44: Range dei parametri adimensionali per tutti i dati sperimentali analizzati

La regressione migliore dei dati, con un coefficiente di correlazione pari a 0.81, risulta la seguente:

$$KR = 80.89 \cdot We^{0,717} \cdot B^{0,704} \cdot Fr^{-0,475} \tag{115}$$

I risultati della correlazione, in termini di confronto tra KR_{calc} e KR_{mis} , sono riportati nella Figura 86, da cui è possibile riconoscere come i dati dei tre set diversi si allineino lungo la bisettrice in tre regioni di spazio diverse, che indicano tre diversi campi di valori considerati. Gli scostamenti tra KR_{calc} e KR_{mis} sono stati effettuati anche in questo caso a partire dalla (113), attraverso la quale si è ottenuto un valore medio dello scostamento del 30.65 % e una deviazione standard del 26.20%.

La stessa procedura di calcolo dell'errore è stata condotta per il solo campione dei dati ricavati dagli esperimenti condotti presso l'Università della Calabria e ha fornito un valore medio del 25.92% e una deviazione standard di 19.94%.

Infine, si sono messi a confronto e riportati in Figura 87 i valori di KR calcolati con le due

formule (112) e (115). Con $KR_{calc}(1)$ si sono indicati i valori ricavati dalla (112) e con $KR_{calc}(2)$ quelli ricavati dalla (115). La figura mostra come la (112) interpreti meglio la distribuzione del campione rispetto alla (115).

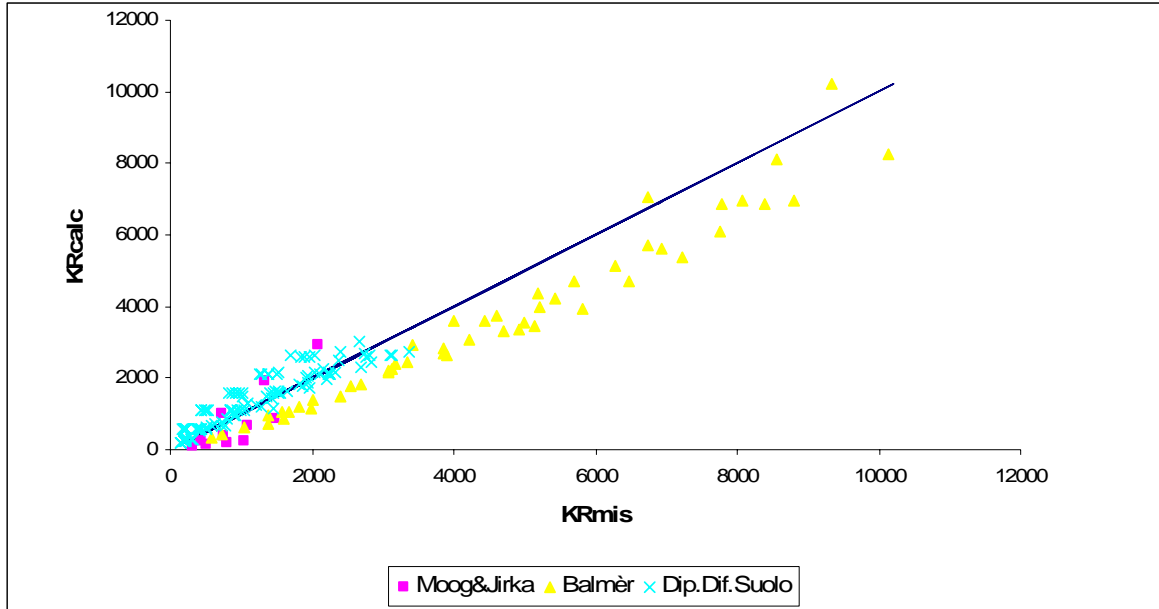


Figura 86: Confronto tra KR misurato e KR calcolato per tutti i dati sperimentali disponibili

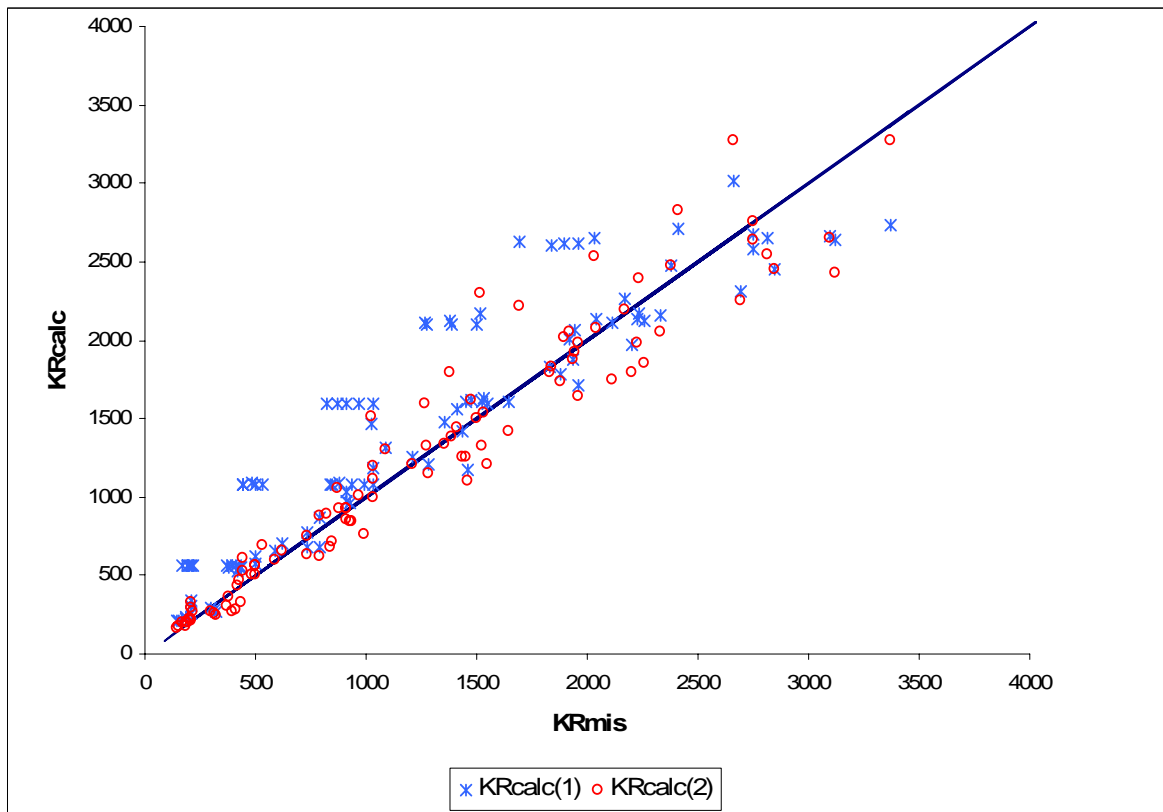


Figura 87: Confronto tra KR misurato, $KR_{calc}(1)$ e $KR_{calc}(2)$

CONCLUSIONI

In questa tesi, in cui è contenuto il lavoro di ricerca degli anni di dottorato, si sono analizzati i processi riossigenativi delle correnti idriche, con l'obiettivo di ricavare una relazione fra il coefficiente di riossigenazione, che indica la capacità di una corrente di riacquisire il quantitativo di ossigeno a saturazione, e le caratteristiche idrauliche della corrente stessa.

In primo luogo è stata fatta una panoramica sulle cause dell'inquinamento dei corsi d'acqua, sui modelli di qualità e sulla normativa europea e nazionale riguardante la qualità delle acque.

Successivamente, si è analizzato il meccanismo di riossigenazione delle correnti idriche, secondo approcci concettuali consolidati, individuando le grandezze caratteristiche del fenomeno.

Allo stesso tempo è stata fatta una ricerca bibliografica finalizzata alla raccolta delle principali formule predittive del coefficiente di riossigenazione, comprendenti relazioni basate su semplici correlazioni di dati oppure su applicazioni della teoria della turbolenza, che ha introdotto elementi originali all'approccio al problema. L'impossibilità, allo stato attuale, di costruire formule predittive prettamente teoriche, data dalla non perfetta interpretazione dei fenomeni legati alla turbolenza, ha indirizzato questa ricerca verso la strada della sperimentazione di laboratorio, interpretando i dati con l'analisi dimensionale.

E' stato, allora, costruito un apparato sperimentale, ottimizzato per questo tipo di studi, in modo da poter svolgere una campagna che permettesse di ricavare valori del coefficiente di riossigenazione legati alle caratteristiche idrauliche della corrente.

Si è proceduto, quindi, a studiare il processo riossigenativo per due forme di sezione: semicircolare con diametro $D=50$ cm e rettangolare con larghezza $B=40$ cm, due scabrezze, corrispondenti alla interposizione di sabbia con $d_{50}=0.25$ mm e ghiaia con $d_{50}=3.0$ mm sul contorno bagnato, 5 portate, 5, 10, 15, 20 e 25 l/s, e 6 pendenze, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 %.

I dati raccolti sono stati elaborati per ricavare le grandezze geometriche e idrauliche caratteristiche del moto e altre grandezze fisiche legate più direttamente al processo riossigenativo.

Una prima importante novità, rispetto agli studi pubblicati sulle riviste specialistiche, dello studio effettuato nel laboratorio “Grandi Modelli Idraulici” dell’Università della Calabria, riguarda l’analisi dell’evoluzione dell’ossigeno disciolto in acqua all’aumentare della temperatura nelle condizioni di prova. Sono state, infatti, eseguite delle prove, definite “bianche” perché fatte senza versamento dell’agente deossigenante, che hanno permesso di legare nel tempo il valore dell’ossigeno disciolto e della temperatura dell’acqua, nelle stesse condizioni idrauliche e ambientali delle prove di riossigenazione, in modo da stabilire una legge di variazione che fosse fedele alle condizioni reali delle prove. Le relazioni di letteratura, infatti, sono riferite a condizioni statiche. I risultati trovati, indipendenti dalla forma della sezione e dalla scabrezza, per il range studiato, sono stati utilizzati per “depurare” i dati di riossigenazione dagli effetti dell’apparato sperimentale. Successivamente, sono state condotte le prove di riossigenazione, secondo la procedura dell’equilibrio disturbato, che hanno permesso di stimare il valore del coefficiente di riossigenazione a partire dall’equazione di Streeter&Phelps opportunamente particolarizzata al fenomeno riossigenativo.

Una volta acquisiti questi dati si è passati all’elaborazione degli stessi attraverso l’analisi dimensionale, sulla base delle grandezze caratteristiche del fenomeno prima individuate.

L’analisi dimensionale formulata ha riguardato la costruzione di una correlazione fra grandezze adimensionali, combinazione di g [LT^{-2}], accelerazione di gravità, ρ [ML^{-3}], ν [L^2T^{-1}], σ [MT^{-2}], D_m [L^2T^{-1}], rispettivamente densità, viscosità cinematica, tensione superficiale dell’acqua e diffusività molecolare dell’ossigeno in acqua, dipendenti dalla temperatura, B [L], larghezza in sommità della corrente, ovvero larghezza dell’interfaccia aria-acqua, U [LT^{-1}], velocità media della corrente, h_s [L], altezza significativa della corrente pari a A/B , in cui A [L^2] è l’area della sezione trasversale, i [-], pendenza del fondo canale, J_E [-], pendenza della superficie libera e ε [L], scabrezza rappresentata dal coefficiente della formula di Colebrook-White come modificata in Yen (2002).

Facendo l’ipotesi, suffragata dalle misure idrauliche, di moto uniforme e considerando il legame deterministico fra viscosità cinematica e diffusività molecolare, sono state selezionate le grandezze indipendenti e ricavati i raggruppamenti adimensionali che hanno permesso di costruire i raggruppamenti adimensionali, dai quali, con l’applicazione dei risultati di laboratorio, si è ricavata la struttura del legame funzionale. Questo legame

è caratterizzato dalla presenza dei classici raggruppamenti di Froude e Weber, dal rapporto fra larghezza della superficie libera e tirante idrico, oltre che dal rapporto fra scabrezza e tirante idrico, risultato, però, ininfluenza.

La novità di questa formulazione è rappresentata dal numero di Weber, in cui è considerata la tensione superficiale, grandezza sempre scartata nei precedenti lavori di letteratura analizzati. La sua presenza, risultata decisiva ai fini dell'interpretazione del fenomeno, rappresenta un'importante novità negli studi di predizione del coefficiente di riossigenazione.

Una volta costruita questa correlazione, si è proceduto ad applicare ad essa i dati di letteratura, pervenendo ad una nuova formulazione, a dimostrazione della correttezza delle grandezze fisiche prese in esame.

L'applicazione di questa nuova formulazione, comunque, è limitata ai range di appartenenza delle grandezze adimensionali, non essendo possibile, a rigore, applicarla a range di valori esterni.

Il buon esito della ricerca è stato possibile anche grazie ai finanziamenti ottenuti nell'ambito del progetto di ricerca PRIN-COFIN 2005 "Caratterizzazione teorica e sperimentale dell'impatto sui corsi d'acqua ricettori degli inquinanti conservativi e non conservativi veicolati dalle acque meteoriche urbane".

BIBLIOGRAFIA

- Atkinson J.F., Blair S., Taylor S., Ghosh U., "Surface Aeration", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 121 n.1, January/February 1995, pp. 113-118.
- Balmèr P., Tagizadeh-Nasser M., "Oxygen transfert in gravity flow sewers", *Water Science and Technology*, Vol. 31 n.7, 1995, pp. 127-135.
- Chapra S., *Surface Water-Quality Modelling*, New York, McGraw-Hill, 1997, pp.834.
- Chao A. C., Chang D. S., Smallwood Jr. C., Galler W. S., "Effect of Temperature on Oxygen Transfer - Laboratory Studies", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 113 n. 5, October 1987, pp. 1089-1101.
- Chu C. R., Jirka G.H. "Wind and Stream Flow Induced Reaeration", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 129 n.12, December 2003, pp. 1129-1136.
- Churchill M. A., Elmore H. L., Buckingham R. A., "The Prediction of Stream Reaeration Rates", *Journal of the Sanitary Engineering Division*, Vol.88 n.SA4, July1962, pp.1-46.
- Cox B.A., "A review of oxygen modelling techniques for lowland rivers", *The Science of the Total Environment*, 134-136, January 2003, pp. 304-334.
- De Filpo M., De Rosa S., Veltri P., "Contributo della classificazione dei corsi d'acqua al risanamento ambientale dei bacini fluviali", in *Atti alla II Conferenza Nazionale sul Drenaggio Urbano*, Palermo, 10-12 Maggio 2000.
- Gelda R.K., Auer M.T., Effler S.W., Chapra S.C., Storey M.L., "Determination of Reaeration Coefficient: Whole-Lake Aproach", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 122 n 4, April 1996, pp. 269-275.
- Ghetti A., *Idraulica*, Padova, Libreria Cortina, 1980, pp.566.
- Gualtieri C., Gualtieri P., Pulci Doria, "Dimensional Analysis of Reaeration Rate in Streams", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 128 n 1, January 2002, pp. 12-18.
- Gualtieri C., Gualtieri P., "Turbolence Based Models for Gas Transfer Analysis with channel Shape Factor Influence", *Environmental Fluid Mechanics*, Vol.4, 2004, pp.249-271.
- Gualtieri C., Pulci Doria G., D'Avino A, "Gas-transfer coefficient in a smooth channel. A dimensional analysis-based equation", in *Atti del XXX° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche - IDRA 2006, Roma, Università La Sapienza, Settembre 2006, pp. 11.*
- Horng-Guan Leu, C.F. Ouyang, Tze-Ti Pai, "Effects of flow velocity and depth on the rates of reaeration and BOD removal in a shallow open channel", *Water Science and Technology*, Vol. 35 n. 8, 1997, pp. 57-67.
- Huisman J.L., Weber N., Gujer W., "Reaeration in sewers", *Water Research*, Vol. 38, 2004, pp. 1089-1100.
- Jha R., Ojha C.S.P., Bhata K.K.S., "Refinemente of predictive reaeration equations for a typical Indian river", *Hydrological Processes*, Vol. 15, 2001, pp.1047-1060.
- Melching C.S., Flores H.E., "Reaeration Equations derived from U.S. Geological Survey database", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 125 n 5, May1999, pp. 407-414.
- Minocha V.K., "Discussion of Dimensional Analysis of reaeration rate in streams", *Journal of Environmental Engineering*, July 2003, pp. 676-677.
- Moog D. B., Jirka G. H., "Air-Water gas transfer in uniform channel flow", *Journal of the Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 125 n.1, January 1999, pp. 3-10.

- Gromiec M.J., Loucks D.P., Orlob G.T., "Stream Quality Model", in *Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs*, Davis, University of California, 1983, pp.176-225.
- Rathbun R.E., "Reaeration Coefficients of Streams- State of the Art", *Journal of Hydraulic division*, Vol. 103 n.HY4, April 1977, pp. 409-424.
- Sirini P., *Ingegneria sanitaria-ambientale. Principi, teorie e metodi di rappresentazione*, Milano, McGraw-Hill, 2003. pp. 535.
- Socolofsky S.A., Jirka G.H., *Special Topics in Mixing and Transport Processes in the Environment - Engineering-Lectures*, Coastal and Ocean Engineering Division -Texas A&M University, 2005, pp168.
- Thackston E.L., Dawson J.W. "Recalibration of a Reaeration Equation", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 127 n. 4, April 2001, pp. 317-321.
- Veltri P., De Filipo M., Maradei G., "Indagine sperimentale sulla riossigenazione dei corsi d'acqua naturali a basso tirante idrico: primi risultati", in *Atti del XXX° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche - IDRA 2004*, Vol. 3, Trento, Bios Cosenza, 2004, pp. 123-130.
- Veltri P., Fiorini Morosini A., Maradei G., "La riossigenazione delle correnti a basso tirante idrico: indagine sperimentale di laboratorio". in *Atti del convegno Acqua e città, I convegno nazionale di Idraulica Urbana*, Sant'Agnello (NA), Centro studi Idraulica Urbana, Settembre 2005, pp. 28-30.
- Veltri P., Fiorini Morosini A., Maradei G., "La dipendenza del coefficiente di riossigenazione dalle caratteristiche idrauliche di un corso d'acqua", in *Atti del XXX° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche - IDRA 2006*, Roma, 2006, pp.162.
- Veltri P., Fiorini Morosini A., Maradei G., Verbeni B., "Analysis of the Re-Oxygenation Process in a Water Streams" in *Atti del Convegno Armonizing the Demands of Art and Nature in Hydraulics, 32nd Congress of IAHR*, Venezia, July 2007a, Vol 1 pp.290
- Veltri P., Fiorini Morosini A., Maradei G., Verbeni B., "La Riossigenazione dei corsi d'acqua: tecniche di misura e validazione con dati di campo di un modello empirico", *Acqua e Città*, Cagliari, 2007b, pp.
- Yen B.C. "Open channel flow resistance", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128 n.1, January 2002, pp. 20-39.

ALLEGATO 1: TABELLA RIASSUNTIVA DELLE FORMULE DI RIOSSIGENAZIONE ANALIZZATE

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
1	$K_r = \frac{480D_m^{1/2}i^{1/4}}{h^{5/4}}$	O'Connor	Dobbins	Sanitary Engineering Division	The prediction of stream reaeration rates	Luglio 1962	
2	$K_r = \frac{127D_m U^{1/2}}{h^{3/2}}$	O'Connor	Dobbins	Sanitary Engineering Division	The prediction of stream reaeration rates	Luglio 1962	
3	$K_r = ae^{bT}$ a=0.4364 b=0.0238	Streeter	Phelps	Sanitary Engineering Division	The prediction of stream reaeration rates	Luglio 1962	
4	$K_r = 0.175U^{0.5}h^{-1.5}$	O'Connor	Dobbins	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
5	$K_r = 2.60 \frac{1.0 + Fr^2}{(0.9 + Fr)^{1.5}} \frac{(UJ_E)^{0.375}}{h} \coth \left[\frac{4.75(UJ_E)^{0.125}}{(0.9 + Fr)^{1.5}} \right]$	Dobbins		Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
6	$K_r = \frac{127D_m U^{1/2}}{h^{3/2}}$	Krenkel	Orlob	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
7	$K_r = 8.70(UJ_E)^{0.5}h^{-1}$	Cadwallader	McDonnell	Journal Of The hydraulics division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
8	$K_r = 638 UJ_E$	Tsivoglou	Wallace	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
9	$K_r = 1.08(1 + 0.17Fr^2)(UJ_E)^{0.375}h^{-1}$	Parkhurst	Pomeroy	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
10	$K_r = 1.17(1 + Fr^{0.5})\mu_*h^{-1}$	Thackston	Krenkel	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
11	$K_r = 0.00102U^{2.695}h^{-3.085}i^{-0.823}$	Churchill, Elmore	Buckingham	Journal Of The Hydraulics division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
12	$K_r = 1.54U^{0.413} i^{0.273} h^{-1.408}$	Bennett	Rathbun	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
13	$K_r = 118 \left(\frac{u_*}{U} \right)^3 \left(\frac{U}{h} \right)$	Lau		Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
14	$K_r = 0.235 U^{0.969} h^{-1.673}$	Churchill, Elmore	Buckingham	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
15	$K_r = 0.241 U h^{-1.33}$	Langbein	Durum	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
16	$K_r = 0.325 U^{0.73} h^{-1.75}$	Owens	Edwards	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
17	$K_r = 0.250 U^{0.67} h^{-1.85}$	Owens	Edwards Gibbs	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
18	$K_r = 0.223 U h^{-1.5}$	Isaacs	Gandy	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
19	$K_r = 0.512 \left(\frac{U}{h} \right)^{0.85}$	Negulescu	Rojanski	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
20	$K_r = 0.212 U^{0.703} h^{-1.054}$	Padden	Gloyna	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
21	$K_r = 0.0847 U^{0.6} h^{-1.40}$	Bansal		Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
22	$K_r = 0.262 U^{0.607} h^{-1.689}$	Bennett	Rathbun	Journal Of The Hydraulics Division	Reaeration coefficients of stream	Aprile 1977	
23	$K_r = 356.7 D_m^{0.5} i^{0.25} h^{-1.25}$	O'Connor (1956)	Dobbins	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	Turbolento. anisotropo
24	$K_r = 4.8 J_E^{0.25} h^{-1.25}$	O'Connor (1956)	Dobbins	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	Turbolento. anisotropo
25	$K_r = 127 D_m^{0.5} U^{0.5} h^{-1.5}$	O'Connor (1956)	Dobbins	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	Turbolento. isotropo

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
26	$K_r = 1.71U^{0.5}h^{-1.5}$	O'Connor (1956)	Dobbins	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	Turbolento. isotrop
27	$K_r = 2.4 * 10^{-2} E_1^{1.321} h^{-2.32}$	Krenkel (1962)	Orlob	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	E1 (m2min-1)
28	$K_r = 2.4 * 10^{-2} E_1^{1.321} h^{-2.32}$	Krenkel (1962)	Orlob	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	E2 (m2min-3)
29	$K_r = 2.6 E_y^{1.237} h^{-2.087}$	Krenkel (1963)	Orlob	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	Ey (m2 s-1)
30	$K_r = 2.18U^{0.969}h^{-1.673}$	Churchill (1962)		International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
31	$K_r = 2.26Uh^{-1.67}$	Churchill (1962)		International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
32	$K_r = 2.31U^{0.67}h^{-1.85}$	Owens (1964)		International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
33	$K_r = 3.0U^{0.73}h^{-1.75}$	Owens (1964)		International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
34	$K_r = 2.23Uh^{-1.33}$	Langbein (1967)	Durum	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
35	$K_r = 2.22Uh^{-1.5}$	Isaacs (1968)	Gandy	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
36	$K_r = 2.064Uh^{-1.5}$	Isaacs (1968)	Gandy	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
37	$K_r = 1.347 U h^{-1.5}$	Isaacs (1968)	Gandy	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
38	$K_r = 1.347 U h^{-1.5}$	Isaacs (1968)	Gandy	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
39	$K_r = 1.347 U h^{-1.5}$	Isaacs (1969)	Maag	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
40	$K_r = 1.347 U h^{-1.5}$	Isaacs (1969)	Maag	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
41	$K_r = 25.7 E^{0.5} h^{-1}$	Cadwallade (1969)	McDonnell	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
42	$K_r = 25.7 E^{0.5} h^{-1}$	Negulescu (1969)	Rojanski	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
43	$K_r = 25.7 E^{0.5} h^{-1}$	Padden (1969)	Gloyna	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
44	$K_r = 2.33 U^{0.674} h^{-1.865}$	Bennett (1972)	Rathbun	International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
45	$K_r = 1088.64 u_*^3 U^{-2} h^{-1}$	Lau (1972)		International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
46	$K_r = 0.116 + 2147.8 i^{1.2}$	Foree (1976)		International Series on Applied Systems Analysis	Mathematical modeling of water quality: Stream, Lakes, and Reservoirs	Aprile 1986	
47	$K_L = 2(1 + 0.17 Fr^2)(iU)^{0.375}$	Parkhurst (1972)	Pomeroy	Jornal Of Environmental Engineering, Vol.121 January 1995	Surface Aeration	Luglio 1995	
48	$K_L = \frac{D_m^{1/2} i^{1/4} g^{1/4}}{k^{1/2} h^{1/4}}$	O'Connor (1956)	Dobbins	Jornal Of Environmental Engineering, Vol.121 January 1995	Surface Aeration	Luglio 1995	

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
49	$K_L = \left[\frac{\delta}{D_m} + \frac{1}{ku_*} \ln(kPe) \right]^{-1}$	Gulliver (1984)	Stefan	Journal Of Environmental Engineering. Vol.121 January 1995	Surface Aeration	Luglio 1995	
50	$K_r = \frac{k}{A_1} \left(\frac{D_m}{v} \right) \frac{u_*}{h}$	O'Connor (1956)	Dobbins	Journal Of Environmental Engineering. Vol.121 January 1995	Surface Aeration	Luglio 1995	
51	$K_r = \frac{1}{A_2} \frac{D_m}{h^{5/4}} \left(\frac{U}{v} \right)^3$	Gulliver (1984)	Stefan	Journal Of Environmental Engineering. Vol.121 January 1995	Surface Aeration	Luglio 1995	
52	$K_r = 3.932 * \frac{U^{0.5}}{h^{1.5}}$	O'Connor	Dobbins	Water Science And Tecnology	Effects of flow velocità and depth on rates of reaeration and bod removal in a aballow open abannel	1997	
53	$K_r = 3.875 * \frac{U^{1.0}}{h^{1.5}}$	Isaacs	Gaudy	Water Science And Tecnology	Effects of flow velocità and depth on rates of reaeration and bod removal in a aballow open abannel	1997	
54	$K_r = 5.025 * \frac{U^{0.969}}{h^{1.673}}$	Churchill		Water Science And Tecnology	Effects of flow velocità and depth on rates of reaeration and bod removal in a aballow open abannel	1997	
55	$K_r = 5.316 * \frac{U^{0.67}}{h^{1.85}}$	Owens	Edwards Gibbs	Water Science And Tecnology	Effects of flow velocità and depth on rates of reaeration and bod removal in a aballow open abannel	1997	
56	$K_r = \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{UD_m}{Lh^2} \right)^{1/2}$	Von Karman's		Water Science And Tecnology	Effects of flow velocità and depth on rates of reaeration and bod removal in a aballow open abannel	1997	
57	$K_r = 2\sqrt{2} \left(\frac{UD_m}{Lh^2} \right)^{1/2}$	Von Karman's		Water Science And Tecnology	Effects of flow velocità and depth on rates of reaeration and bod removal in a aballow open abannel	1997	Piccolo canale
58	$K_L = \sqrt{D_m r}$	Danckwert (1951)		Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Air-Water gas transfer in uniform channel flow	Gennaio 1999/3	

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
59	$K_L = 0.161 Sc^{-1/2} (\epsilon v)^{1/4}$	Lau	Thackston Krenkel	Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Air-Water gas transfer in uniform channel flow	Gennaio 1999/3	
60	$K_r = 3.904 \frac{U^{0.5}}{h^{1.5}}$	O'Connor (1958)	Dobbins	Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Stream reaeration in nonuniform flow: macroroughness enhancement	Gennaio 1999/11	
61	$K_r = a \frac{1.0 + F^2}{(b + F)^{1.5}} \frac{(UJ_E)^{0.375}}{h} \coth \frac{c(UJ_E)^{0.125}}{(b + F)^{0.5}}$	Dobbins (1965)		Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Reaeration equazioni Derived from U.S. geological Survey database	Maggio 1999/407	
62	$K_r = a (u_* / U)^b (U / h)$	Lau (1965)		Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Reaeration equazioni Derived from U.S. geological Survey database	Maggio 1999/407	
63	$K_r = a(1 + bF^2)(UJ_E)^c h^d$	Parkhurst (1972)	Pomeroy	Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Reaeration equazioni Derived from U.S. geological Survey database	Maggio 1999/407	
64	$K_r = a(1 + Fr^b)u_* h^{-1}$	Thackston (1969)	Krenkel	Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Reaeration equazioni Derived from U.S. geological Survey database	Maggio 1999/407	
65	$K_r = 517(Ui)^{0.524} Q^{-0.242}$	Melching	Flores	Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Reaeration equazioni Derived from U.S. geological Survey database	Maggio 1999/407	$Q < 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ 99K2 misuraz.
66	$K_r = 596(Ui)^{0.528} Q^{-0.136}$	Melching	Flores	Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Reaeration equazioni Derived from U.S. geological Survey database	Maggio 1999/407	$Q > 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ 130K2 misuraz.
67	$K_r = 88(Ui)^{0.313} h^{-0.353}$	Melching	Flores	Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Reaeration equazioni Derived from U.S. geological Survey database	Maggio 1999/407	$Q < 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ 77K2 misuraz.
68	$K_r = 142(Ui)^{0.333} h^{-0.66} B^{-0.243}$	Melching	Flores	Journal Of Hydraulic Engineering Vol.125 January 1999	Reaeration equazioni Derived from U.S. geological Survey database	Maggio 1999/407	$Q > 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ 65K2 misuraz.

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
69	$K_r = 5.010 U^{0.969} h^{-1.673}$	O'Connor (1958)	Dobbins	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	
70	$K_r = 173(J_E U)^{0.404} h^{-0.66}$	Churchill (1962)		Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	
71	$K_r = 5.35 U^{0.67} h^{-1.85}$	Krenkel (1962)	Orlob	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	
72	$K_r = 5.14 U h^{-1.33}$	Owens (1964)		Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	
73	$K_r = 186(J_E U)^{0.5} h^{-1}$	Langbein (1967)	Durum	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	
74	$K_r = 24.9(1+F^{0.5})U h^{-1}$	Cadwallacer	McDonnell (1969)	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	
75	$K_r = 23(1+0.17Fr^2)(iU)^{0.375} h^{-1}$	Thackston (1969)	Krenkel	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	
75	$K_r = 24.9(1+F^{0.5})U h^{-1}$	Thackston (1969)	Krenkel	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	
76	$K_r = 23(1+0.17Fr^2)(iU)^{0.375} h^{-1}$	Parkhurst (1972)	Pomeroy	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	
77	$K_r = 31200 iU$	Tsivoglou (1972)	Wallace	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	$Q < 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$
78	$K_r = 15200 iU$	Tsivoglou (1972)	Wallace	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	$Q > 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$
79	$K_r = 543 J_E^{0.6236} U^{0.5325} h^{-0.7258}$	Smoot (1988)		Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
80	$K_r = 1740 U^{0.46} S^{0.79} h^{0.74}$	Moog (1998)	Jirka	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river		
81	$K_r = 5.59S^{0.16}h^{0.73}$	Moog (1998)	Jirka	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	$S < 0.00$
82	$K_r = 5.792 U^{0.5} h^{0.25}$	Cadwallade	McDonnell (1964)	Hydrological Processes	Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river	2001	
83	$K_r = 2.911 * 10^{-2} \left(\frac{u_*^3}{U^2 h} \right)$	Lau		Jornal Of Environmental Engineering, Vol.128 January 2002	Dimensional analysis of reaeration rate in streams	Gennaio 2002	
84	$K_r = 2.88 * 10^{-4} \frac{(1+F)u_*}{h}$	Thackston	Krenkel	Jornal Of Environmental Engineering, Vol.128 January 2002	Dimensional analysis of reaeration rate in streams	Gennaio 2002	
85	$K_r = 2.911 * 10^{-2} \frac{v}{h} Fr^{-3} i^{3/2}$	Lau	Thackston Krenkel	Jornal Of Environmental Engineering, Vol.128 January 2002	Dimensional analysis of reaeration rate in streams	Gennaio 2002	
86	$K_r = 11.057 \frac{J_E^{0.25}}{h^{1.25}} 1.016^{(T-20)}$	O'Connor (1956)	Dobbins	The Science Of The Total Environment 314-316	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
87	$K_r = 3.952 \frac{U^{0.5}}{h^{1.5}} 1.016^{(T-20)}$	O'Connor (1956)	Dobbins	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
88	$K_r = 5.0140 \frac{U^{0.969}}{h^{1.673}} 1.0241^{(T-20)}$	Churchill (1962)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
89	$K_r = 68.4 \frac{E^{0.408}}{h^{0.66}} 1.016^{(20-T)}$	Krenkel (1962)	Orlob	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
90	$K_r = 1.7535 \frac{C_A A_d E_2^{0.375}}{C_4^{1.5} h} \coth \left(\frac{2.751 B E_2^{0.125}}{C_4^{0.5}} \right)$	Dobbins (64/65)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
91	$K_r = 6.9152 \frac{U^{0.73}}{h^{1.75}} 1.0241^{(T-20)}$	Owens (1964)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
92	$K_r = 5.1340 \frac{U}{h^{1.33}} 1.0182^{(T-20)}$	Langbein (1967)	Durum	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
93	$K_r = 4.7531 \left(\frac{U}{h^{1.5}} \right) 1.0241^{(T-20)}$	Isaacs (1968)	Gaudy	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
94	$K_r = 4.05 \frac{U}{h^{1.5}}$	Eloubaldy (1969)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
95	$K_r = 154 \frac{u_*}{h}$	Eloubaldy (1969)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
96	$K_r = 3.60 \frac{U}{h^{1.5}}$	Isaacs (1969)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
97	$K_r = 10.9 \left(\frac{U}{h} \right)^{0.85}$	Rojanski (1969)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
98	$K_r = 24.860 \left(1 + F^{0.5} \right) \left(\frac{u_*}{h} \right) 1.016^{(T-20)}$	Thackston (1969)	Krenkel	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
99	$K_r = 5.5773 \frac{U^{0.607}}{h^{1.689}}$	Bennett (1972)	Rathburn	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
100	$K_r = 2.30(1955.2E_2 - 1657i + 20.87)$	Holtje (1972)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
101	$K_r = 4440 E_2^{1.483}$	Holtje (1972)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
102	$K_r = 2506.7 \frac{U}{h} \left(\frac{u_*}{U} \right)^3$	Lau (1972)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
103	$K_r = 4.52 \left(\frac{U}{h^{1.5}} \right)^{0.703}$	Padden (1972)	Gloyna	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
104	$K_r = 23.0400 \frac{(1+0.17F^2)(iU)^{0.375}}{h} 1.0212^{(T-20)}$	Parkhurst (1972)	Pomeroy	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
105	$K_r = 4.1528 \frac{U^{0.6}}{h^{1.4}} 1.016^{(T-20)}$	Bansal (1973)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
106	$K_r = 123 \frac{u_*}{h}$	Alonso (1975)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
107	$K_r = 0.888 (0.30 + 5570 .8i^{0.5})$	Foree (1976)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
108	$K_r = 22700 iU$	Grant (1976)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	Piccole correnti
109	$K_r = 31200 iU$	Tsioglou (1976)	Neal (1976)	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	Grandi correnti
110	$K_r = 3170 i$	Tsioglou (1976)	Neal (1976)	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
111	$K_r = 23000 \frac{U^{0.76} (1+F)^{2.66} J_E^{1.13}}{h^{0.60}}$	Thyssen (1980)	Jeppesen	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
112	$K_r = \frac{8784 U^{0.734} J_E^{0.93}}{h^{0.42}}$	Thyssen (1987)		The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	
113	$K_r = 88 \frac{(UJ_E)^{0.313}}{Q^{0.353}}$	Tsvoglou (1976)	Neal	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	U<0.556
114	$K_r = 142 \frac{(US)^{0.333}}{H^{0.66} L^{0.243}}$	Tsvoglou (1976)	Neal	The Science Of The Total Environment 314	A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland	Gennaio 2003	U>0.556
115	$K_r = 0.000125(1 + Fr^{1/2}) \frac{u_*}{H}$	Thackston (1969)	Krenkel	Discussions And Closures	Discussion of "Dimensional Analysis of reaeration rate in stream" by P. Gualtieri, C. Gualtieri	Luglio 2003	
116	$K_r = 0.000025(1 + 9Fr^{1/4}) \frac{u_*}{h}$	Moog (1998)	Jirka	Discussions And Closures	Discussion of "Dimensional Analysis of reaeration rate in stream" by P. Gualtieri, C. Gualtieri and G. pulci Doria	Luglio 2003	
117	$K_L(20^\circ C) = 5.026 \frac{U^{0.969}}{h^{1.673}}$	Churchill (1962)		Discussions And Closures	Discussion of "Dimensional Analysis of reaeration rate in stream" by P. Gualtieri, C. Gualtieri and G. pulci Doria	Luglio 2003	
118	$K_r = 2.88 * 10^{-4} \frac{(1 + Fr^{0.5}) u_*}{h}$	Thackston	Krenkel	Discussions And Closures	Discussion of "Dimensional Analysis of reaeration rate in stream" by P. Gualtieri, C. Gualtieri and G. pulci Doria	Luglio 2003	
119	$K_r = 7.235 (iU)^{0.408} h^{-2/3}$	Krenkel	Orlob	Water Research 38	Reaeration in sewers	2003	
120	$K_r = 0.222 U^{0.67} h^{-1.85}$	Owens		Water Research 38	Reaeration in sewers	2003	
121	$K_r = 2.10 (iUg)^{3/8} \left(\frac{h}{D}\right)^{0.4} h^{-1}$	Balmer	Tagizadeh Nasser	Water Research 38	Reaeration in sewers	2003	condotta
122	$K_r = 0.45(1 + Fr^{1/4}) \sqrt{(hgi)} h^{-1}$	Thackston	Krenkel	Water Research 38	Reaeration in sewers	2003	

N° For	Formula	Autore1	Autore2	Titolo Rivista	Titolo Articolo	Anno	Note
123	$K_r = 0.96(1 + 0.17 Fr)(iU)^{3/8} h^{-1}$	Parkhurst	Pomeroy	Water Research 38	Reaeration in sewers	2003	
124	$K_r = 720 U_i$	Tsivoglou	Neal	Water Research 38	Reaeration in sewers	2003	
125	$K_r = 0.4U (h / R_H)^{0.613} h^{-1}$	Tagizadeh	Nasser	Water Research 38	Reaeration in sewers	2003	
126	$K_r = 0.96(1 + 0.17 F_r)(iU)^{0.75} h$	Jessen	Hvitved Jacobsen	Water Research 38	Reaeration in sewers	2003	
127	$K_r = 0.86(1 + 0.20 Fr)(iU)^{3/8} h^{-1}$	Jessen		Water Research 38	Reaeration in sewers	2003	

ALLEGATO 2: ANALISI GRANULOMETRICHE DEI CAMPIONI DI SABBIA COSTITUENTI IL CONTORNO BAGNATO DELLE SEZIONI DI DEFLUSSO UTILIZZATE NELLE SPERIMENTAZIONI CONDOTTE PRESSO L'UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

Campione 1: $d_{50}=0.25$ mm

Peso secco		g	464.83
Passante all'ultimo staccio		g	121.74
Diametro staccio	Trattenuto		Passante
mm	g	%	%
9.5	0	0.00%	100.00%
4.75	0	0.00%	100.00%
2.36	0	0.00%	100.00%
1.18	2.62	0.56%	99.44%
0.6	21.31	4.58%	94.85%
0.3	140.9	30.31%	64.54%
0.15	178.25	38.35%	26.19%
0.075	26.92	46.16%	12.09%

Tabella 45: Percentuali di passate - sedimenti - $d_{50}=0.25$ mm

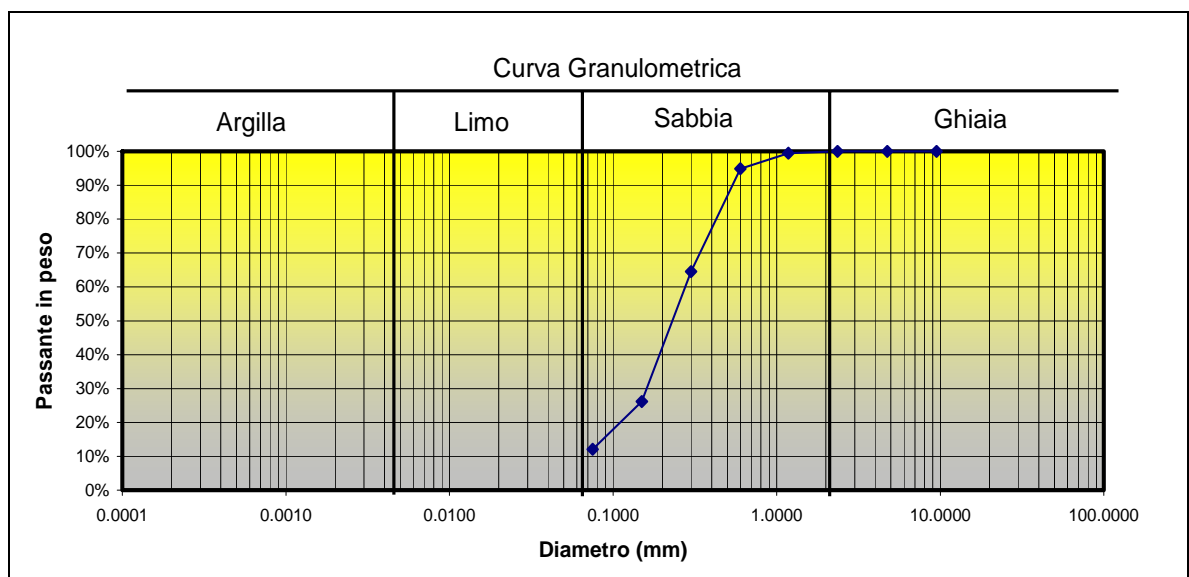


Figura 88: Curva granulometrica - sedimenti - $d_{50}=0.25$ mm

Campione 2: $d_{50}=3.0$ mm

Peso secco	g	503.34
Passante all'ultimo staccio	g	0
Diametro staccio	Trattenuto	
mm	g	%
		%
9.5	0	0.00%
4.75	20.95	4.16%
2.36	364.58	72.43%
1.18	92	18.28%
0.6	10.5	2.09%
0.3	7.33	1.46%
0.15	4.32	0.86%
0.075	0	0.00%

Tabella 46: Percentuali di passate - sedimenti - $d_{50}=3.0$ mm

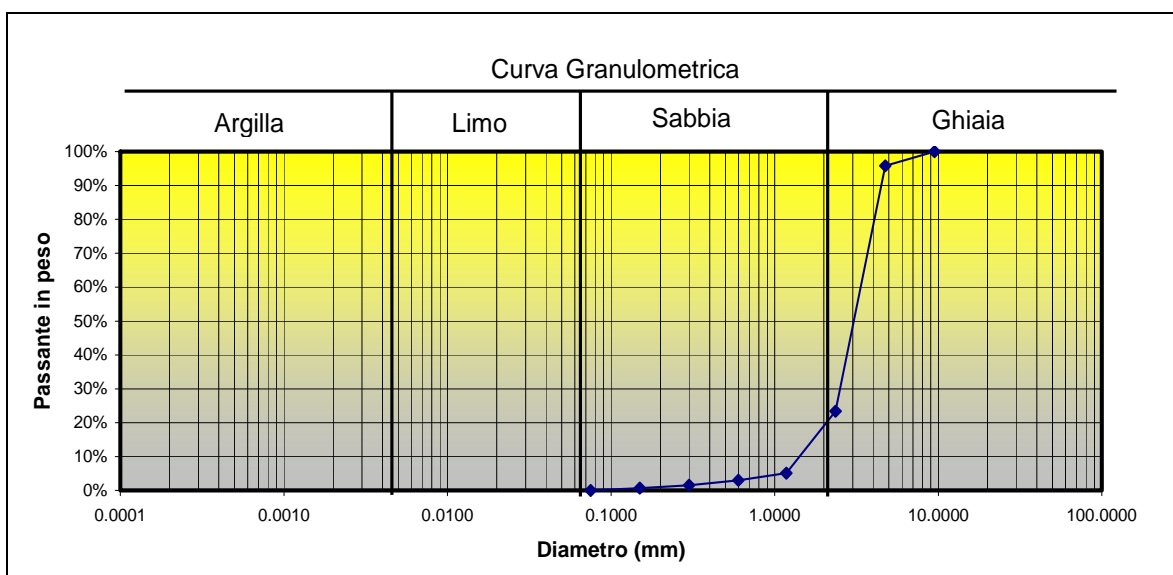


Figura 89: Curva granulometrica - sedimenti - $d_{50}=3.0$ mm

ALLEGATO 3: DISTINTA DELLE GRANDEZZE GEOMETRICHE E IDRAULICHE DELLE PROVE SPERIMENTALI CONDOTTE PRESSO L'UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

In questo allegato si riportano le principali grandezze idrauliche misurate e ricavate dall'attività sperimentale, sia in forma tabulare che grafica, così da evidenziare, in modo particolare, la condizione di moto pressochè uniforme determinatasi durante le prove.

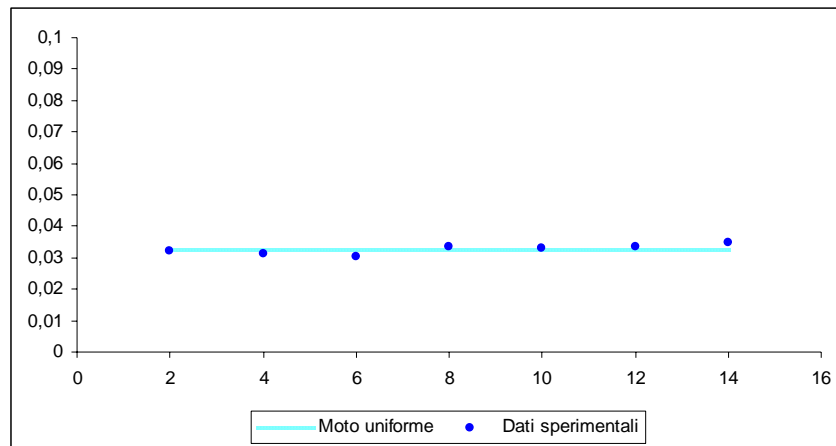
Prova 1 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 3\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

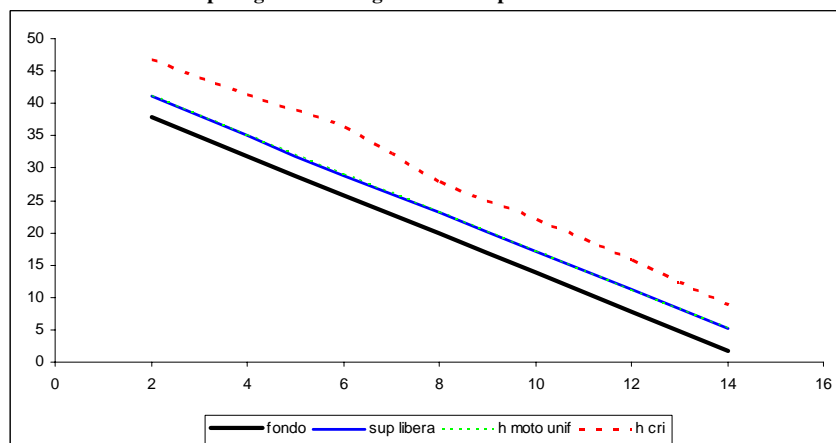
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.27	3.27	74	8.60

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	37.82	41.03	3.21	9.02	0.064	1.025	0.245	0.0053	0.256	0.0187	0.0217	0.940	2.039	0.0451
2	37.82	40.96	3.14	9.62	0.063	1.013	0.243	0.0051	0.253	0.0183	0.0212	0.972	1.751	0.0481
3	37.87	40.91	3.04	10.59	0.061	0.997	0.239	0.0049	0.249	0.0177	0.0205	1.019	1.867	0.0530
4	38.07	41.41	3.34	8.02	0.067	1.046	0.250	0.0056	0.261	0.0194	0.0226	0.887	1.549	0.0401
5	38.14	41.46	3.32	8.16	0.066	1.042	0.249	0.0056	0.261	0.0193	0.0224	0.895	1.568	0.0408
6	37.75	41.11	3.36	7.88	0.067	1.049	0.250	0.0057	0.262	0.0195	0.0227	0.879	1.531	0.0394
7	38.15	41.62	3.47	7.16	0.069	1.066	0.254	0.0060	0.267	0.0201	0.0235	0.838	1.437	0.0358

Tabella P. 1: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=3\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.1: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=3\%$. $Q=5$ l/s

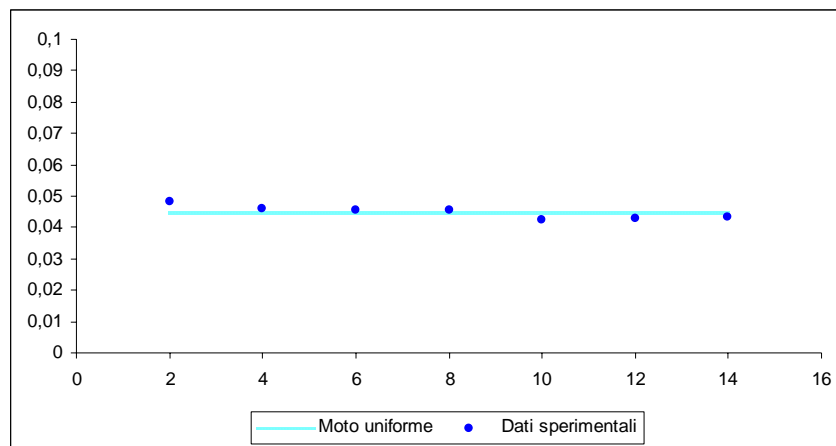
Prova 2- $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 3\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

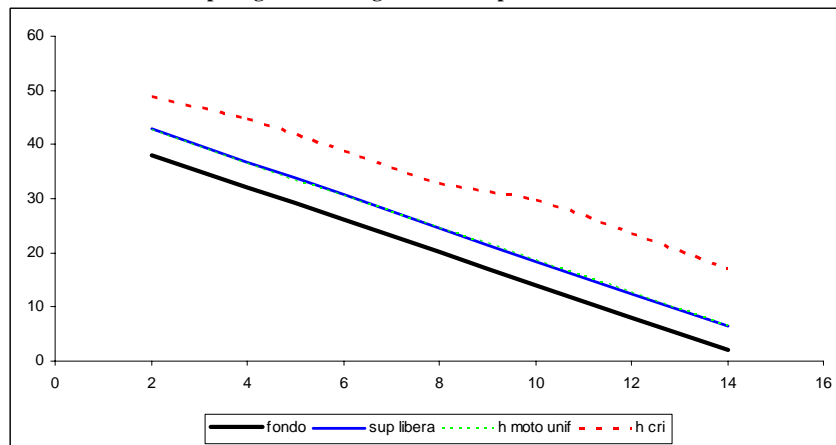
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.49	4.48	76	13.52

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.09	42.91	4.82	10.87	0.096	1.263	0.295	0.0097	0.316	0.0276	0.0328	1.033	1.820	0.0544
2	37.71	42.3	4.59	12.55	0.092	1.231	0.289	0.0090	0.308	0.0263	0.0312	1.110	1.654	0.0628
3	38.1	42.67	4.57	12.71	0.091	1.229	0.288	0.0090	0.307	0.0262	0.0311	1.117	1.668	0.0636
4	38.09	42.64	4.55	12.88	0.091	1.226	0.288	0.0089	0.306	0.0261	0.0309	1.124	1.682	0.0644
5	37.9	42.16	4.26	15.64	0.085	1.185	0.279	0.0081	0.296	0.0245	0.0289	1.238	1.916	0.0782
6	37.85	42.14	4.29	15.32	0.086	1.189	0.280	0.0082	0.297	0.0247	0.0291	1.226	1.889	0.0766
7	37.83	42.15	4.32	15.00	0.086	1.193	0.281	0.0082	0.298	0.0249	0.0293	1.213	1.864	0.0750

Tabella P. 2: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=3\%$. $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.2: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=3\%$. $Q=10$ l/s

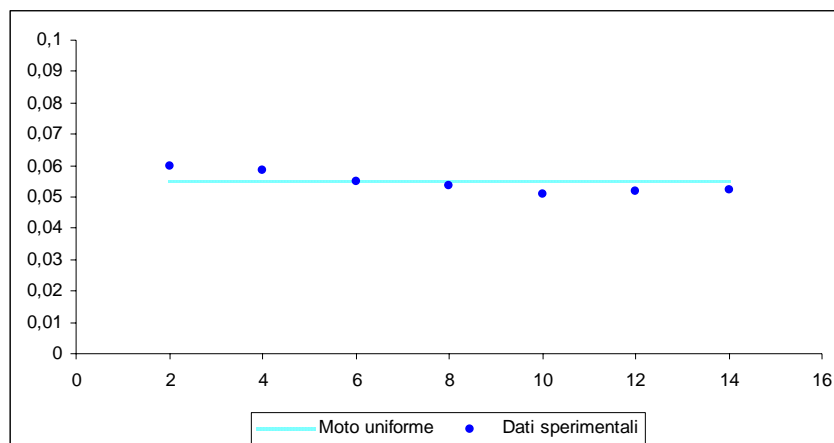
Prova 3– $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 3\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

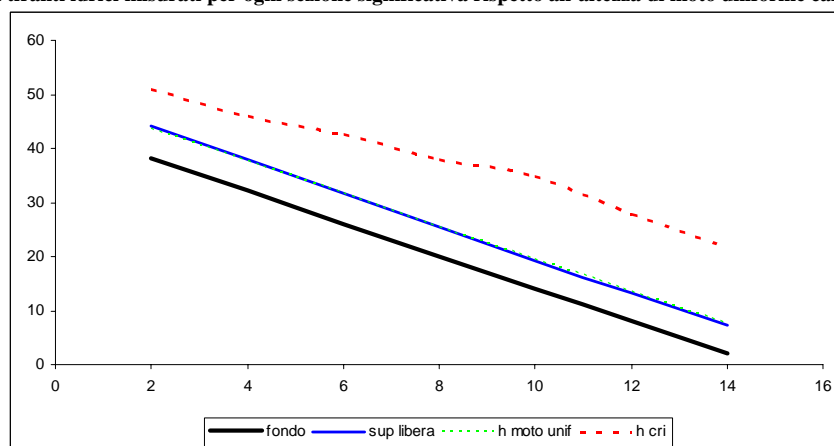
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.46	5.47	75	17.17

Rilievo	z_t	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.09	44.08	5.99	12.94	0.120	1.414	0.325	0.0133	0.353	0.0339	0.0410	1.127	1.776	0.0647
2	37.62	43.47	5.85	13.87	0.117	1.396	0.321	0.0129	0.349	0.0332	0.0400	1.166	1.540	0.0693
3	38.11	43.62	5.51	16.52	0.110	1.354	0.313	0.0118	0.338	0.0313	0.0376	1.273	1.732	0.0826
4	38.04	43.41	5.37	17.81	0.107	1.336	0.310	0.0113	0.334	0.0306	0.0366	1.322	1.821	0.0891
5	37.85	42.95	5.1	20.72	0.102	1.300	0.303	0.0105	0.325	0.0291	0.0348	1.426	2.016	0.1036
6	37.84	43.02	5.18	19.80	0.104	1.311	0.305	0.0108	0.328	0.0296	0.0353	1.394	1.955	0.0990
7	37.82	43.04	5.22	19.36	0.104	1.316	0.306	0.0109	0.329	0.0298	0.0356	1.378	1.926	0.0968

Tabella P. 3: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$, $i=3\%$, $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.3: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$, $i=3\%$, $Q=15$ l/s

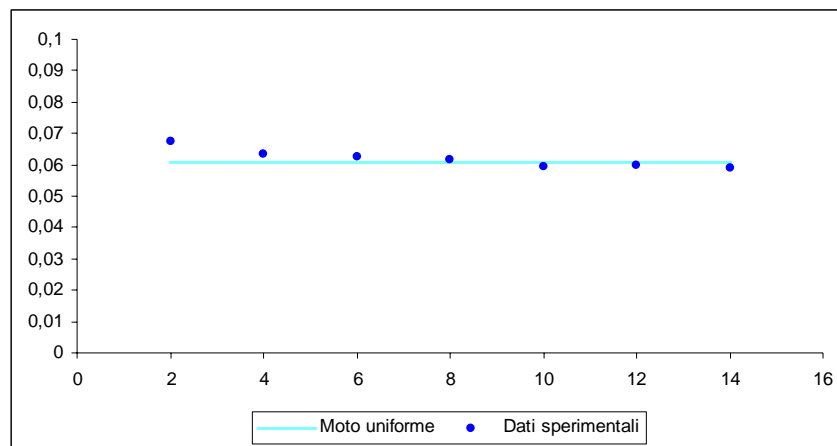
Prova 4- $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 3\% \\ Q = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

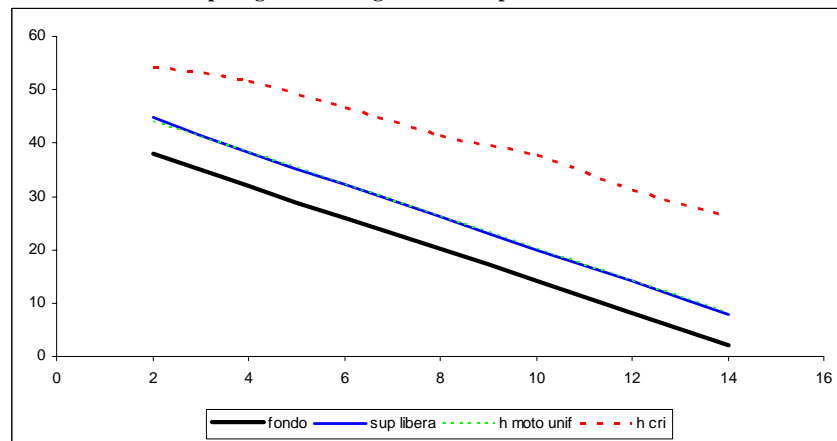
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
6.18	6.09	80	21.15

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.05	44.79	6.74	16.31	0.135	1.504	0.342	0.0158	0.376	0.0379	0.0463	1.265	1.877	0.0815
2	37.76	44.08	6.32	19.67	0.126	1.454	0.332	0.0144	0.363	0.0357	0.0433	1.389	1.764	0.0983
3	38.14	44.37	6.23	20.51	0.125	1.443	0.330	0.0141	0.361	0.0352	0.0427	1.418	1.814	0.1025
4	38.09	44.24	6.15	21.30	0.123	1.433	0.328	0.0138	0.358	0.0348	0.0421	1.445	1.861	0.1065
5	37.89	43.83	5.94	23.57	0.119	1.408	0.324	0.0132	0.352	0.0336	0.0406	1.521	1.992	0.1179
6	37.89	43.87	5.98	23.12	0.120	1.413	0.324	0.0133	0.353	0.0338	0.0409	1.506	1.966	0.1156
7	37.85	43.74	5.89	24.16	0.118	1.401	0.322	0.0130	0.350	0.0334	0.0403	1.540	2.025	0.1208

Tabella P. 4: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=3\%$. $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P. 4: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=3\%$. $Q=20$ l/s

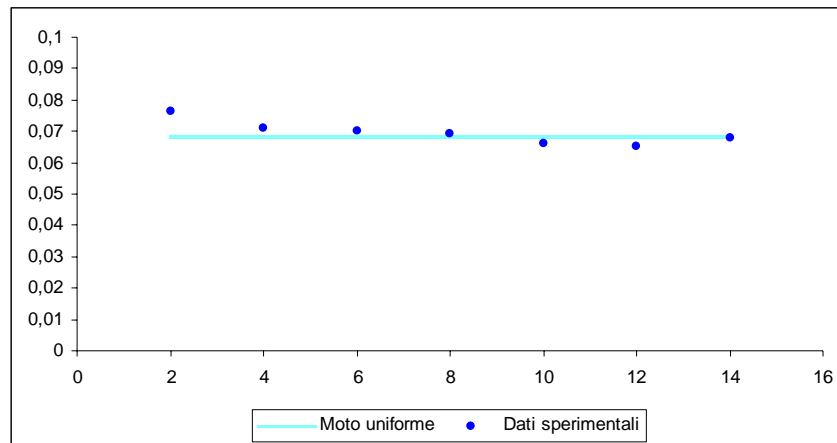
Prova 5– $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 3\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

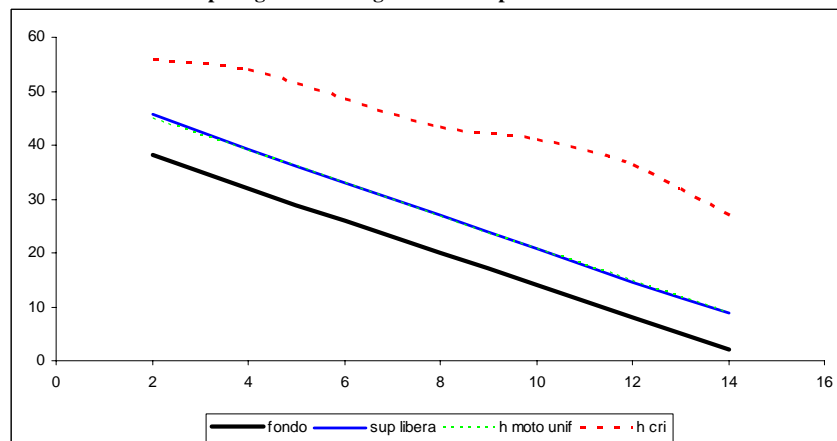
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.94	6.82	79	23.63

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.06	45.68	7.62	17.84	0.152	1.604	0.359	0.0189	0.401	0.0424	0.0526	1.323	1.842	0.0892
2	37.74	44.82	7.08	22.08	0.142	1.543	0.349	0.0170	0.386	0.0396	0.0487	1.472	1.766	0.1104
3	38.08	45.1	7.02	22.63	0.140	1.536	0.347	0.0168	0.384	0.0393	0.0483	1.490	1.796	0.1132
4	38.06	45	6.94	23.40	0.139	1.527	0.346	0.0165	0.382	0.0389	0.0477	1.515	1.836	0.1170
5	37.88	44.48	6.6	27.08	0.132	1.487	0.338	0.0153	0.372	0.0371	0.0453	1.630	2.026	0.1354
6	37.89	44.4	6.51	28.19	0.130	1.477	0.337	0.0150	0.369	0.0367	0.0447	1.663	2.081	0.1409
7	37.85	44.64	6.79	24.94	0.136	1.510	0.343	0.0160	0.377	0.0381	0.0467	1.564	1.916	0.1247

Tabella P. 5: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=3\%$. $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P. 5: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=3\%$. $Q=25$ l/s

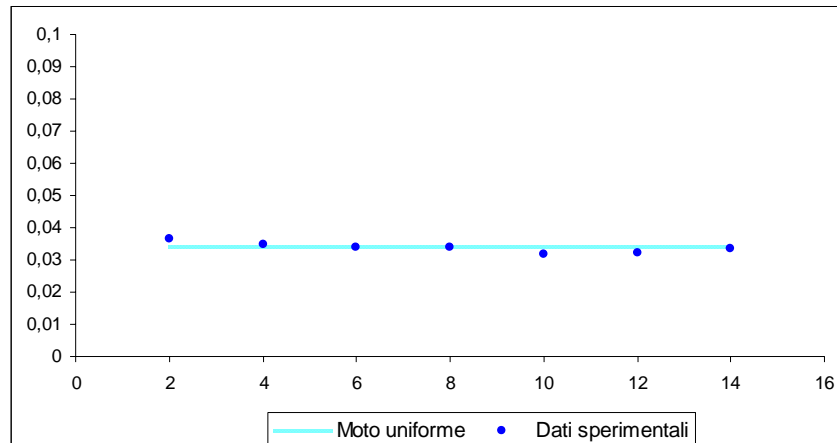
Prova 6– $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 2.5\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

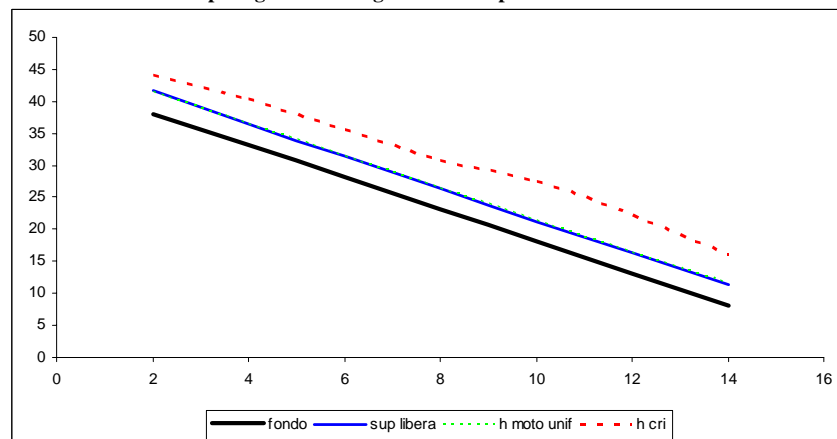
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
3.37	3.37	76	7.86

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.09	41.75	3.66	6.12	0.073	1.096	0.260	0.0065	0.274	0.0212	0.0248	0.775	1.571	0.0306
2	37.74	41.2	3.46	7.22	0.069	1.065	0.254	0.0059	0.266	0.0201	0.0234	0.842	1.445	0.0361
3	38.08	41.48	3.4	7.61	0.068	1.055	0.252	0.0058	0.264	0.0197	0.0230	0.864	1.496	0.0380
4	38.09	41.47	3.38	7.74	0.068	1.052	0.251	0.0057	0.263	0.0196	0.0229	0.871	1.513	0.0387
5	37.9	41.07	3.17	9.36	0.063	1.018	0.244	0.0052	0.255	0.0185	0.0214	0.958	1.718	0.0468
6	37.9	41.1	3.2	9.10	0.064	1.023	0.245	0.0053	0.256	0.0186	0.0216	0.945	1.686	0.0455
7	37.85	41.18	3.33	8.09	0.067	1.044	0.249	0.0056	0.261	0.0194	0.0225	0.891	1.558	0.0404

Tabella P. 6: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2.5\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P. 6: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2.5\%$. $Q=5$ l/s

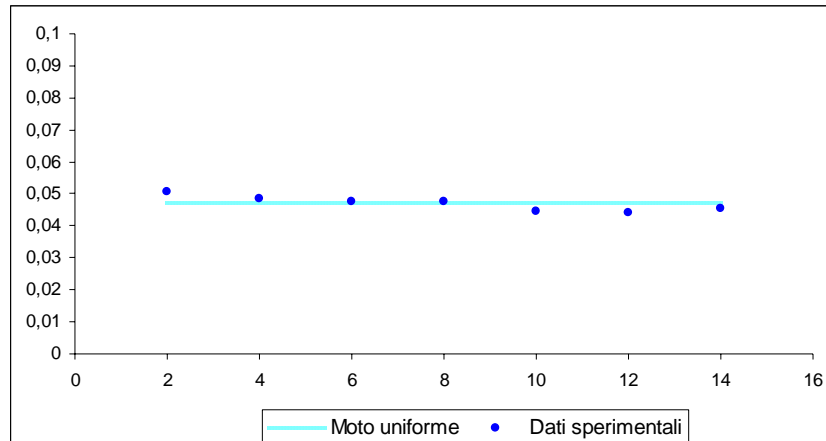
Prova 7– $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 2.5\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

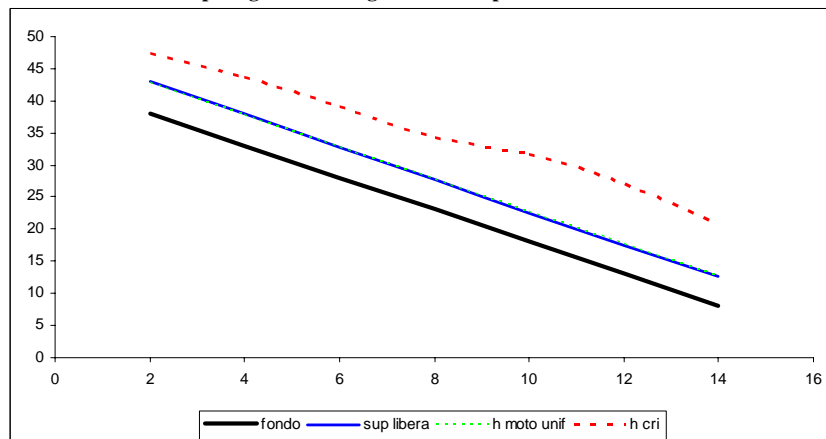
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.70	4.71	75	11.81

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.04	43.1	5.06	9.43	0.101	1.295	0.302	0.0104	0.324	0.0289	0.0345	0.962	1.653	0.0471
2	37.74	42.59	4.85	10.68	0.097	1.267	0.296	0.0098	0.317	0.0278	0.0330	1.023	1.484	0.0534
3	38.1	42.88	4.78	11.14	0.096	1.257	0.294	0.0096	0.314	0.0274	0.0325	1.045	1.527	0.0557
4	38.06	42.82	4.76	11.28	0.095	1.255	0.293	0.0095	0.314	0.0273	0.0324	1.052	1.539	0.0564
5	37.88	42.34	4.46	13.66	0.089	1.213	0.285	0.0086	0.303	0.0256	0.0303	1.158	1.750	0.0683
6	37.84	42.26	4.42	14.03	0.088	1.208	0.284	0.0085	0.302	0.0254	0.0300	1.173	1.781	0.0701
7	37.85	42.41	4.56	12.80	0.091	1.227	0.288	0.0089	0.307	0.0262	0.0310	1.120	1.675	0.0640

Tabella P. 7: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2.5\%$. $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P. 7: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2.5\%$. $Q=10$ l/s

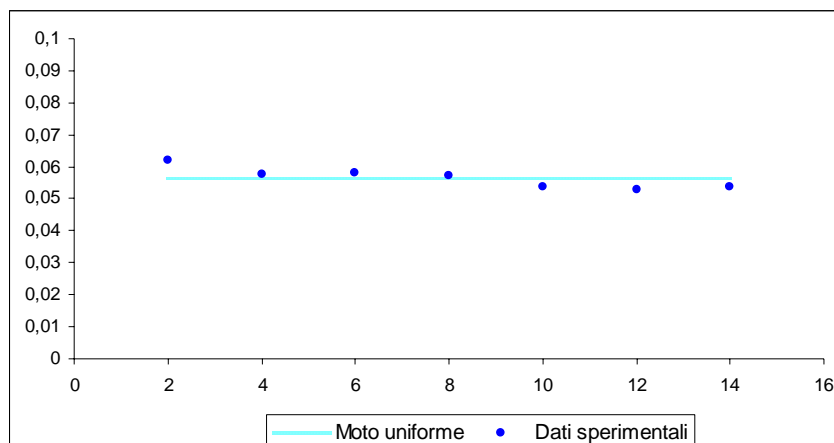
Prova 8– $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 2.5\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

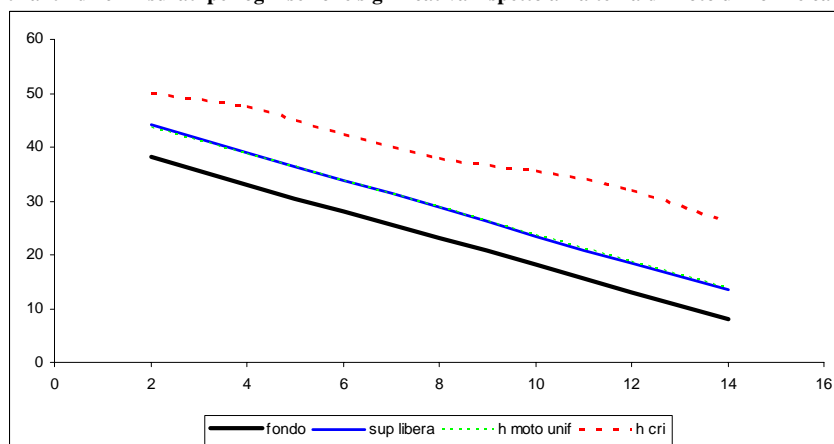
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.64	5.65	77	15.56

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.08	44.28	6.2	11.70	0.124	1.439	0.330	0.0140	0.360	0.0350	0.0425	1.071	1.660	0.0585
2	37.74	43.52	5.78	14.36	0.116	1.388	0.320	0.0126	0.347	0.0328	0.0395	1.187	1.576	0.0718
3	38.1	43.9	5.8	14.22	0.116	1.390	0.320	0.0127	0.348	0.0329	0.0397	1.181	1.566	0.0711
4	38.1	43.82	5.72	14.81	0.114	1.380	0.318	0.0124	0.345	0.0325	0.0391	1.205	1.609	0.0740
5	37.89	43.28	5.39	17.62	0.108	1.338	0.310	0.0114	0.335	0.0307	0.0368	1.315	1.808	0.0881
6	37.88	43.15	5.27	18.82	0.105	1.323	0.307	0.0110	0.331	0.0300	0.0359	1.359	1.890	0.0941
7	37.86	43.21	5.35	18.01	0.107	1.333	0.309	0.0113	0.333	0.0305	0.0365	1.329	1.835	0.0901

Tabella P. 8: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=2.5\%$. $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P. 8: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=2.5\%$. $Q=15$ l/s

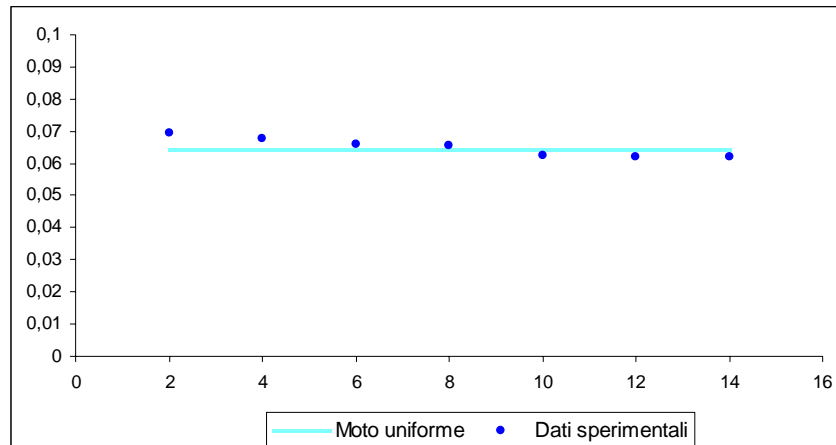
Prova 9– $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 2.5\% \\ Q = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

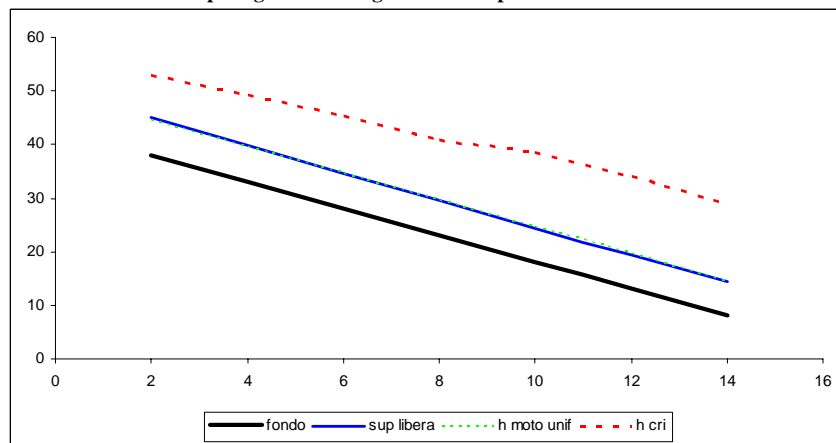
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
6.42	6.44	78	18.25

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.08	45.04	6.96	14.85	0.139	1.529	0.346	0.0166	0.382	0.0390	0.0479	1.207	1.761	0.0743
2	37.74	44.49	6.75	16.24	0.135	1.505	0.342	0.0158	0.376	0.0379	0.0464	1.262	1.551	0.0812
3	38.12	44.72	6.6	17.33	0.132	1.487	0.338	0.0153	0.372	0.0371	0.0453	1.304	1.621	0.0867
4	38.1	44.65	6.55	17.72	0.131	1.481	0.337	0.0152	0.370	0.0369	0.0450	1.319	1.645	0.0886
5	37.89	44.13	6.24	20.41	0.125	1.444	0.330	0.0141	0.361	0.0352	0.0428	1.415	1.809	0.1021
6	37.89	44.08	6.19	20.90	0.124	1.438	0.329	0.0140	0.360	0.0350	0.0424	1.432	1.837	0.1045
7	37.85	44.05	6.2	20.80	0.124	1.439	0.330	0.0140	0.360	0.0350	0.0425	1.428	1.832	0.1040

Tabella P. 9: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2.5\%$. $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P. 9: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2.5\%$. $Q=20$ l/s

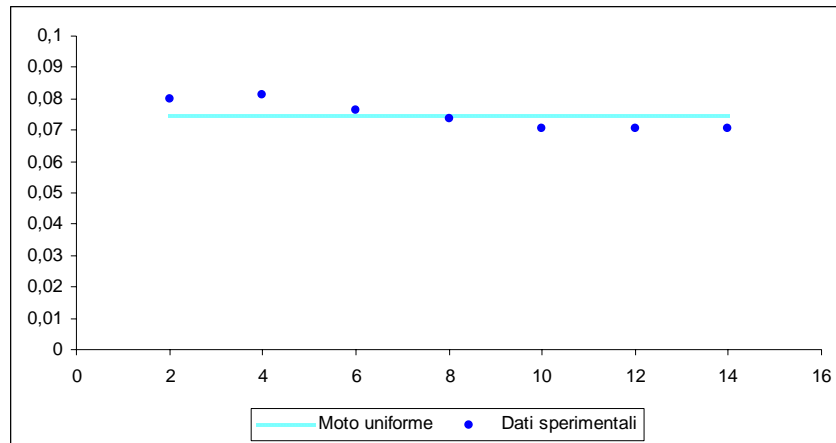
Prova 10 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 2.5\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

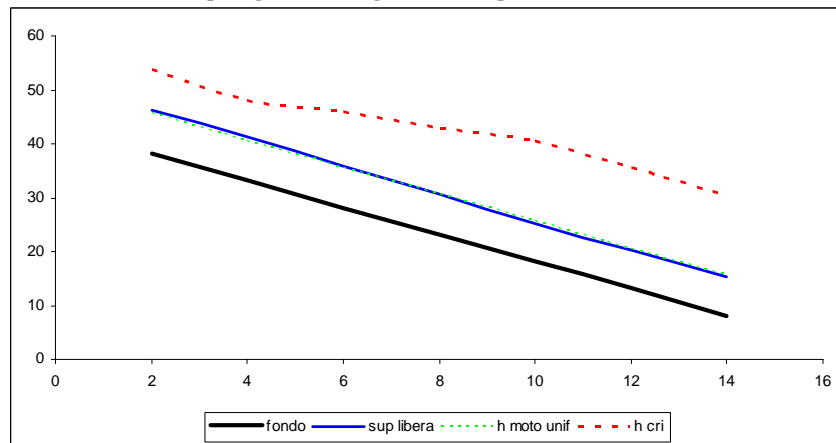
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
7.46	7.45	72	19.16

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.16	46.15	7.99	15.55	0.160	1.645	0.366	0.0202	0.411	0.0443	0.0552	1.235	1.678	0.0777
2	37.73	45.84	8.11	14.89	0.162	1.658	0.369	0.0207	0.415	0.0449	0.0561	1.209	1.355	0.0745
3	38.09	45.71	7.62	17.84	0.152	1.604	0.359	0.0189	0.401	0.0424	0.0526	1.323	1.530	0.0892
4	38.05	45.42	7.37	19.65	0.147	1.576	0.355	0.0180	0.394	0.0411	0.0508	1.388	1.633	0.0983
5	37.87	44.91	7.04	22.45	0.141	1.539	0.348	0.0168	0.385	0.0394	0.0484	1.484	1.786	0.1122
6	37.87	44.91	7.04	22.45	0.141	1.539	0.348	0.0168	0.385	0.0394	0.0484	1.484	1.786	0.1122
7	37.81	44.88	7.07	22.17	0.141	1.542	0.348	0.0170	0.386	0.0396	0.0487	1.475	1.771	0.1109

Tabella P. 10: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$, $i=2.5\%$, $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P. 10: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$, $i=2.5\%$, $Q=25$ l/s

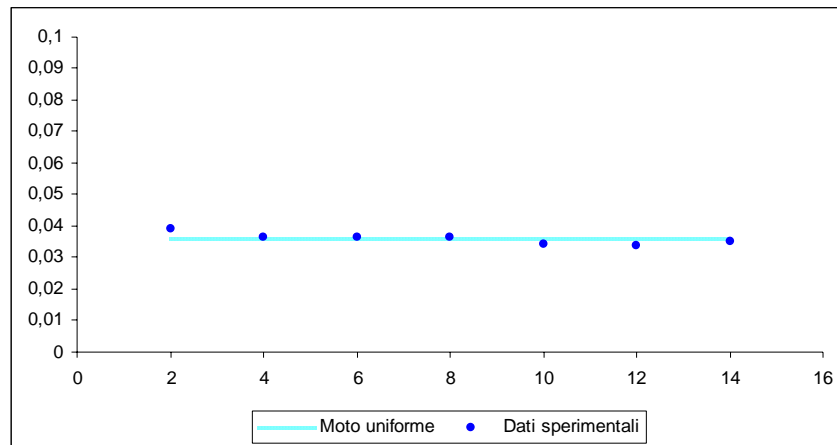
Prova 11 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25\text{mm} \\ i = 2.0\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

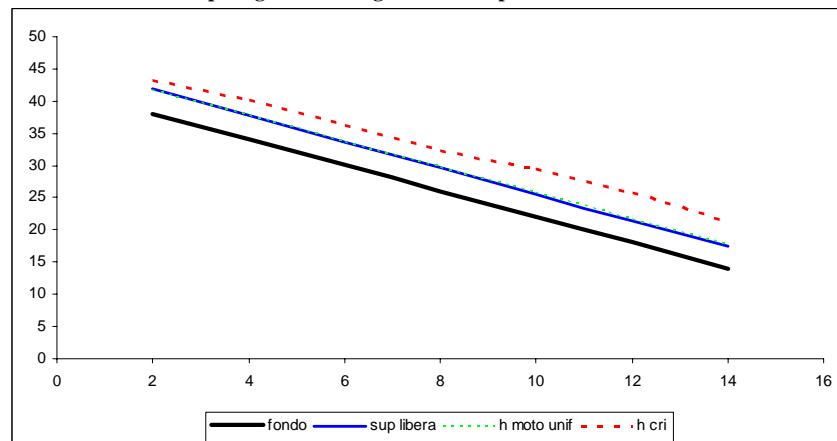
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
3.59	3.60	74	6.51

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.08	41.98	3.9	5.07	0.078	1.132	0.268	0.0071	0.283	0.0225	0.0264	0.705	1.385	0.0254
2	37.73	41.38	3.65	6.17	0.073	1.094	0.260	0.0064	0.274	0.0211	0.0247	0.778	1.300	0.0308
3	38.14	41.78	3.64	6.22	0.073	1.093	0.260	0.0064	0.273	0.0211	0.0246	0.781	1.307	0.0311
4	38.1	41.74	3.64	6.22	0.073	1.093	0.260	0.0064	0.273	0.0211	0.0246	0.781	1.307	0.0311
5	37.87	41.3	3.43	7.41	0.069	1.060	0.253	0.0059	0.265	0.0199	0.0232	0.853	1.470	0.0371
6	37.86	41.26	3.4	7.61	0.068	1.055	0.252	0.0058	0.264	0.0197	0.0230	0.864	1.496	0.0380
7	37.86	41.35	3.49	7.04	0.070	1.069	0.255	0.0060	0.267	0.0203	0.0236	0.831	1.420	0.0352

Tabella P. 11: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.11: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2\%$. $Q=5$ l/s

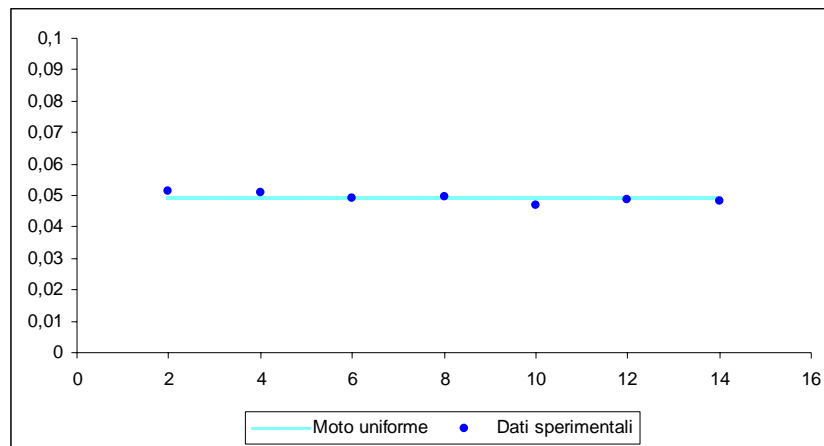
Prova 12 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 2.0\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

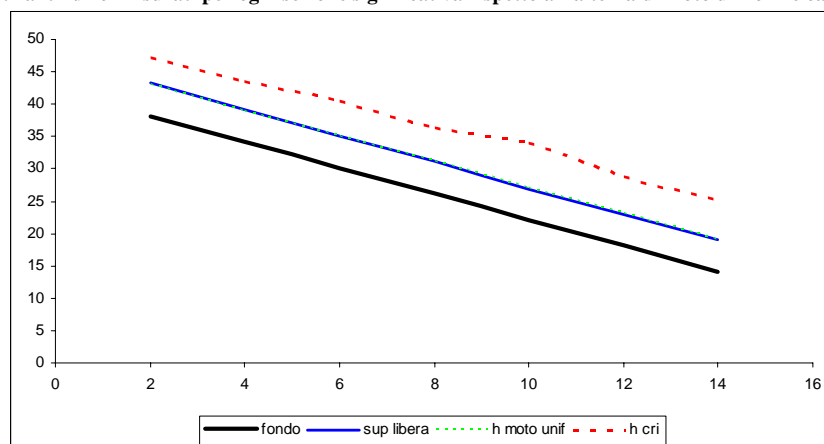
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.92	4.91	77	10.27

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.16	43.29	5.13	9.05	0.103	1.304	0.303	0.0106	0.326	0.0293	0.0350	0.942	1.609	0.0453
2	37.75	42.83	5.08	9.32	0.102	1.298	0.302	0.0105	0.324	0.0290	0.0346	0.956	1.354	0.0466
3	38.16	43.06	4.9	10.36	0.098	1.274	0.297	0.0099	0.318	0.0280	0.0334	1.008	1.454	0.0518
4	38.08	43.02	4.94	10.11	0.099	1.279	0.298	0.0100	0.320	0.0283	0.0336	0.996	1.431	0.0506
5	37.91	42.6	4.69	11.78	0.094	1.245	0.292	0.0093	0.311	0.0269	0.0319	1.075	1.585	0.0589
6	37.91	42.78	4.87	10.55	0.097	1.270	0.297	0.0098	0.317	0.0279	0.0332	1.017	1.472	0.0527
7	37.82	42.64	4.82	10.87	0.096	1.263	0.295	0.0097	0.316	0.0276	0.0328	1.033	1.502	0.0544

Tabella P. 12: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$, $i=2\%$, $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.12: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$, $i=2\%$, $Q=10$ l/s

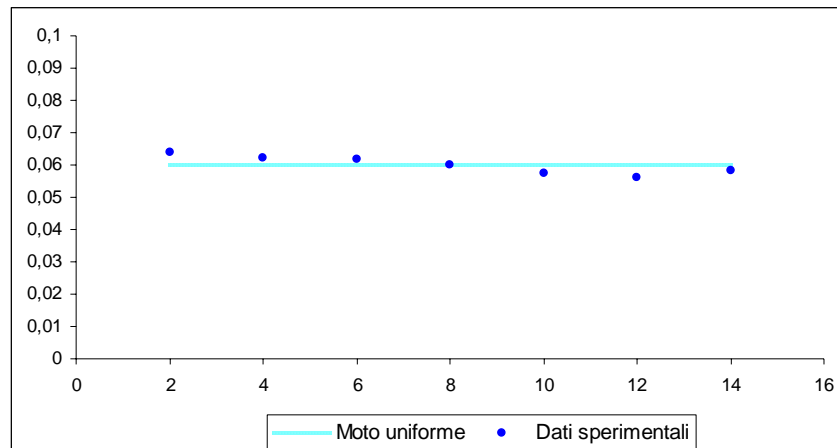
Prova 13 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 2.0\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

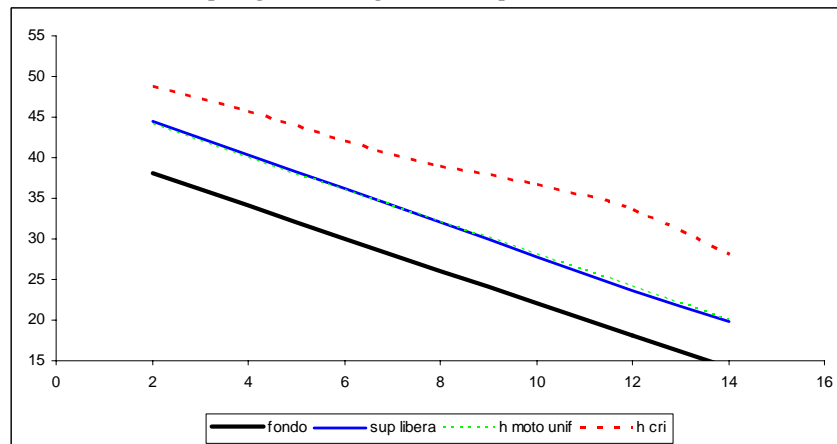
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
6.04	6.03	75	12.75

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.08	44.73	6.65	9.54	0.133	1.493	0.340	0.0155	0.373	0.0374	0.0457	0.967	1.445	0.0477
2	37.73	43.95	6.22	11.59	0.124	1.442	0.330	0.0141	0.360	0.0351	0.0426	1.066	1.365	0.0580
3	38.11	44.25	6.14	12.04	0.123	1.432	0.328	0.0138	0.358	0.0347	0.0421	1.087	1.400	0.0602
4	38.06	44.15	6.09	12.33	0.122	1.426	0.327	0.0136	0.357	0.0344	0.0417	1.100	1.423	0.0616
5	37.89	43.65	5.76	14.51	0.115	1.385	0.319	0.0126	0.346	0.0327	0.0394	1.193	1.587	0.0725
6	37.9	43.58	5.68	15.11	0.114	1.375	0.317	0.0123	0.344	0.0322	0.0388	1.218	1.631	0.0756
7	37.85	43.59	5.74	14.66	0.115	1.383	0.319	0.0125	0.346	0.0326	0.0392	1.199	1.598	0.0733

Tabella P. 13: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2\%$. $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P. 13: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2\%$. $Q=15$ l/s

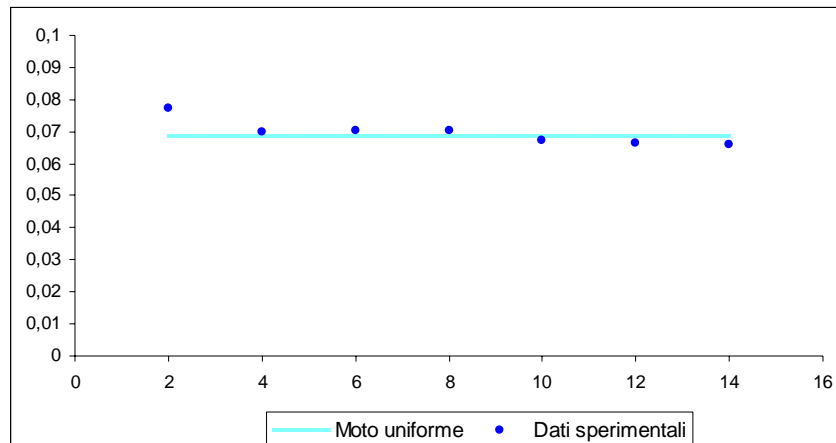
Prova 14 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 2.0\% \\ Q = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

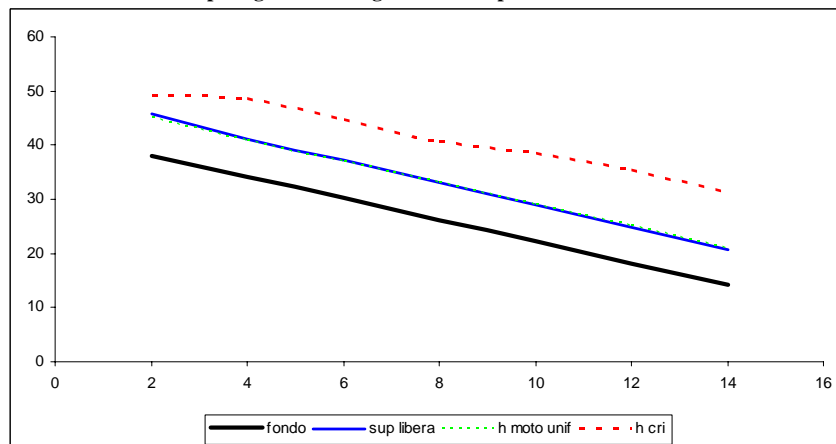
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.92	6.79	78	15.25

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.09	45.81	7.72	10.99	0.154	1.615	0.361	0.0193	0.404	0.0429	0.0533	1.038	1.436	0.0550
2	37.73	44.82	7.09	14.07	0.142	1.544	0.349	0.0170	0.386	0.0397	0.0488	1.175	1.409	0.0704
3	38.14	45.19	7.05	14.31	0.141	1.540	0.348	0.0169	0.385	0.0395	0.0485	1.185	1.425	0.0715
4	38.08	44.98	6.9	15.23	0.138	1.522	0.345	0.0164	0.381	0.0387	0.0474	1.222	1.486	0.0761
5	37.88	44.52	6.64	17.03	0.133	1.492	0.339	0.0155	0.373	0.0373	0.0456	1.293	1.602	0.0852
6	37.9	44.34	6.44	18.62	0.129	1.468	0.335	0.0148	0.367	0.0363	0.0442	1.351	1.700	0.0931
7	37.87	44.49	6.62	17.18	0.132	1.490	0.339	0.0154	0.372	0.0372	0.0455	1.298	1.611	0.0859

Tabella P. 14: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2\%$. $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.14: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2\%$. $Q=20$ l/s

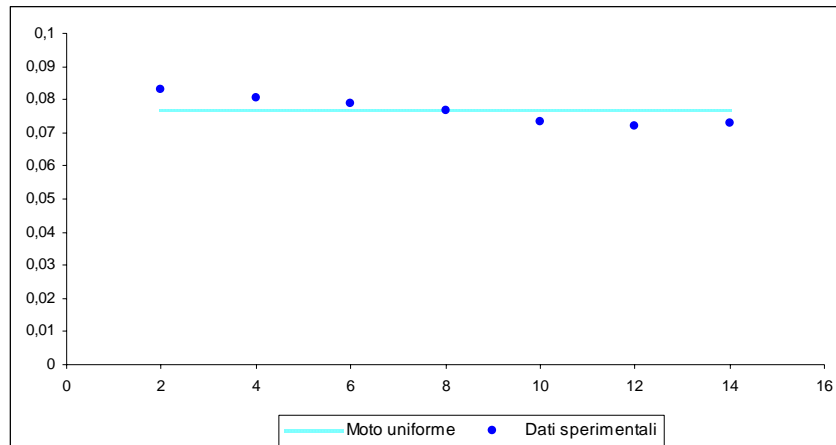
Prova 15 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 2.0\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

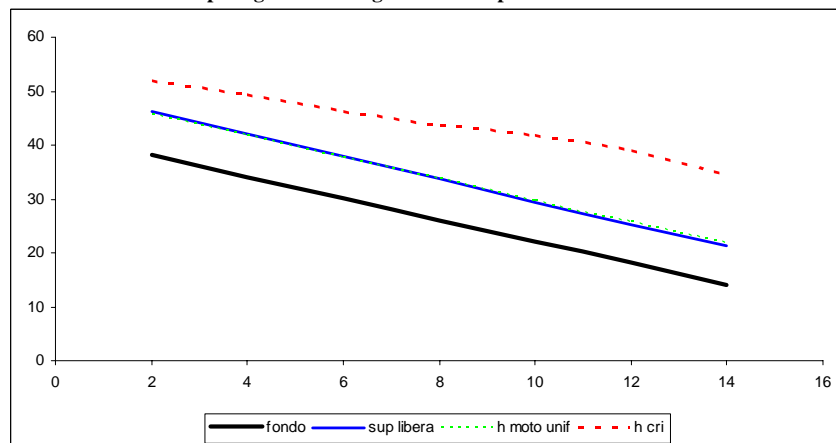
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
7.57	7.66	76	17.64

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.06	46.36	8.3	13.93	0.166	1.679	0.372	0.0214	0.420	0.0459	0.0575	1.169	1.557	0.0696
2	37.74	45.77	8.03	15.33	0.161	1.649	0.367	0.0204	0.412	0.0445	0.0555	1.226	1.382	0.0766
3	38.1	46	7.9	16.07	0.158	1.635	0.365	0.0199	0.409	0.0438	0.0546	1.255	1.426	0.0803
4	38.09	45.74	7.65	17.64	0.153	1.608	0.360	0.0190	0.402	0.0426	0.0528	1.315	1.518	0.0882
5	37.88	45.23	7.35	19.81	0.147	1.574	0.354	0.0179	0.393	0.0410	0.0506	1.394	1.642	0.0990
6	37.88	45.09	7.21	20.94	0.144	1.558	0.351	0.0174	0.390	0.0403	0.0496	1.433	1.704	0.1047
7	37.83	45.1	7.27	20.45	0.145	1.565	0.353	0.0177	0.391	0.0406	0.0501	1.416	1.677	0.1022

Tabella P. 15: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2\%$. $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.15: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=2\%$. $Q=25$ l/s

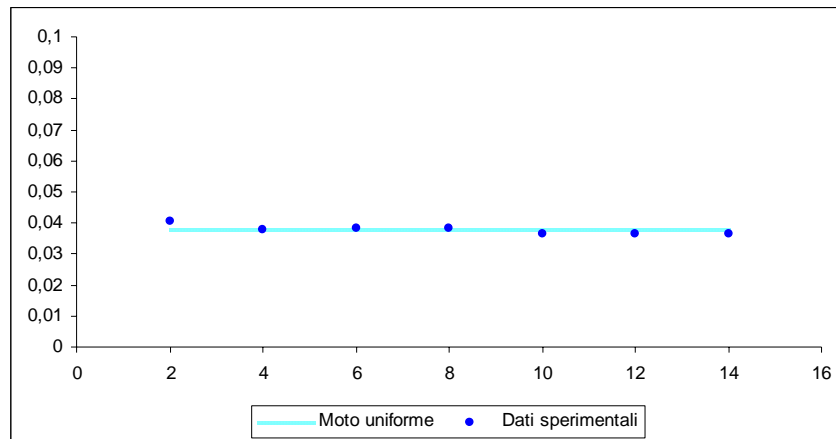
Prova 16 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 1.5\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

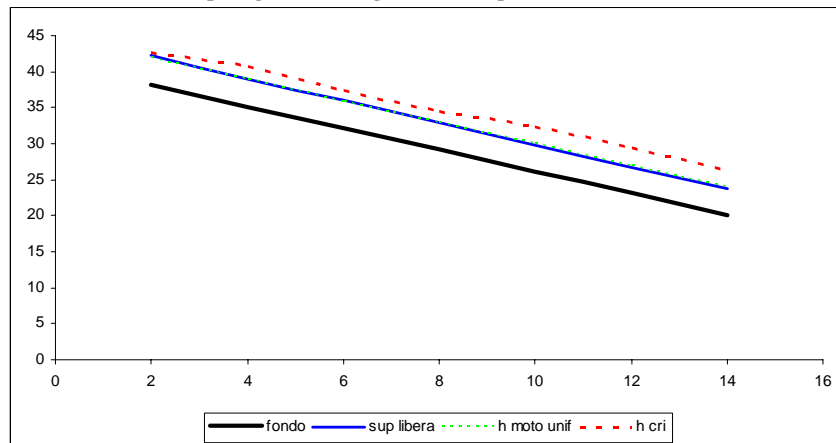
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
3.73	3.78	77	5.61

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.13	42.18	4.05	4.54	0.081	1.154	0.273	0.0075	0.289	0.0234	0.0275	0.667	1.285	0.0227
2	37.74	41.52	3.78	5.56	0.076	1.114	0.264	0.0068	0.279	0.0219	0.0256	0.739	1.213	0.0278
3	38.16	42	3.84	5.31	0.077	1.123	0.266	0.0069	0.281	0.0222	0.0260	0.722	1.176	0.0265
4	38.09	41.9	3.81	5.43	0.076	1.119	0.265	0.0068	0.280	0.0220	0.0258	0.730	1.194	0.0272
5	37.88	41.54	3.66	6.12	0.073	1.096	0.260	0.0065	0.274	0.0212	0.0248	0.775	1.293	0.0306
6	37.89	41.52	3.63	6.27	0.073	1.091	0.259	0.0064	0.273	0.0210	0.0246	0.784	1.314	0.0313
7	37.87	41.52	3.65	6.17	0.073	1.094	0.260	0.0064	0.274	0.0211	0.0247	0.778	1.300	0.0308

Tabella P. 16: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=1.5\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.16: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=1.5\%$. $Q=5$ l/s

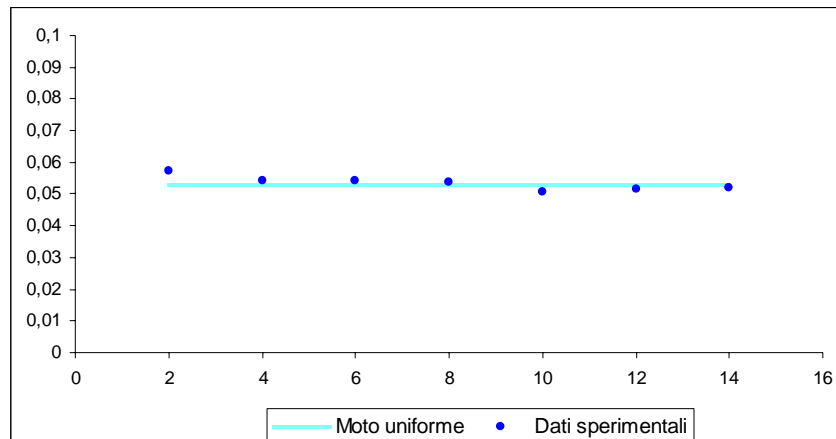
Prova 17 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 1.5\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

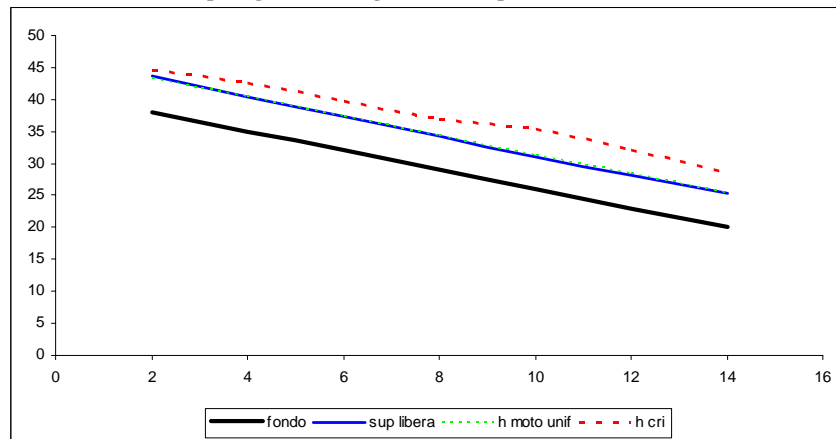
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
5.27	5.29	76	8.11

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.02	43.73	5.71	6.61	0.114	1.379	0.318	0.0124	0.345	0.0324	0.0390	0.806	1.302	0.0331
2	37.73	43.16	5.43	7.66	0.109	1.343	0.311	0.0115	0.336	0.0309	0.0371	0.867	1.188	0.0383
3	38.08	43.5	5.42	7.71	0.108	1.342	0.311	0.0115	0.336	0.0309	0.0370	0.869	1.192	0.0385
4	38.07	43.43	5.36	7.96	0.107	1.334	0.309	0.0113	0.334	0.0305	0.0366	0.884	1.219	0.0398
5	37.88	42.96	5.08	9.32	0.102	1.298	0.302	0.0105	0.324	0.0290	0.0346	0.956	1.354	0.0466
6	37.86	43	5.14	9.00	0.103	1.306	0.304	0.0106	0.326	0.0293	0.0350	0.940	1.323	0.0450
7	37.82	43.03	5.21	8.65	0.104	1.315	0.306	0.0109	0.329	0.0297	0.0355	0.921	1.289	0.0433

Tabella P. 17: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=1.5\%$. $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.17: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=1.5\%$. $Q=10$ l/s

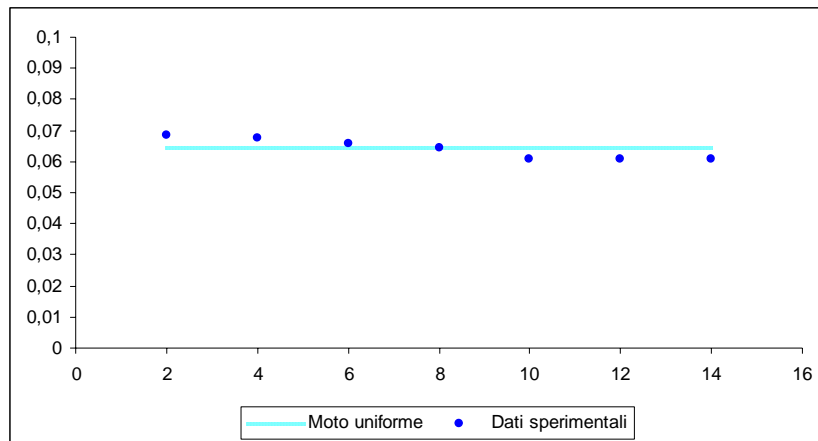
Prova 18 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 1.5\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

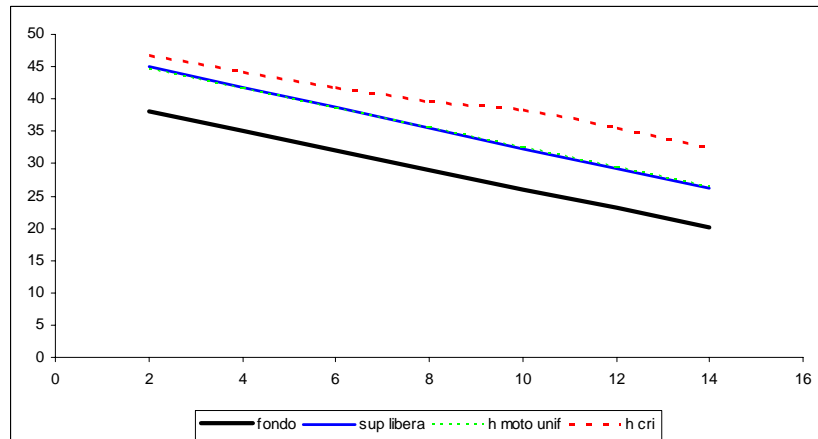
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.34	6.42	76	10.69

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.08	44.94	6.86	8.71	0.137	1.518	0.344	0.0162	0.379	0.0385	0.0472	0.925	1.359	0.0436
2	37.75	44.51	6.76	9.09	0.135	1.506	0.342	0.0159	0.377	0.0380	0.0464	0.944	1.160	0.0455
3	38.11	44.7	6.59	9.79	0.132	1.486	0.338	0.0153	0.372	0.0371	0.0452	0.980	1.219	0.0490
4	38.08	44.52	6.44	10.47	0.129	1.468	0.335	0.0148	0.367	0.0363	0.0442	1.014	1.275	0.0524
5	37.89	43.99	6.1	12.27	0.122	1.427	0.327	0.0137	0.357	0.0345	0.0418	1.097	1.418	0.0613
6	37.89	43.96	6.07	12.45	0.121	1.424	0.327	0.0136	0.356	0.0343	0.0416	1.105	1.432	0.0622
7	37.84	43.92	6.08	12.39	0.122	1.425	0.327	0.0136	0.356	0.0344	0.0416	1.102	1.427	0.0619

Tabella P. 18: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=1.5\%$. $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.18: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=1.5\%$. $Q=15$ l/s

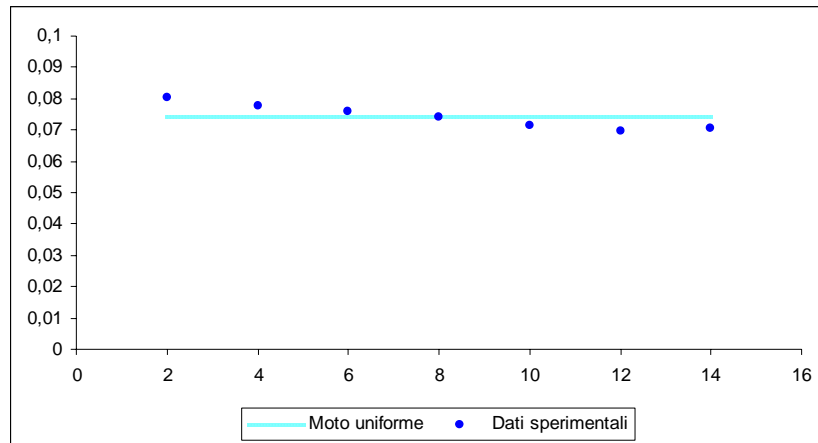
Prova 19 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 1.5\% \\ Q = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

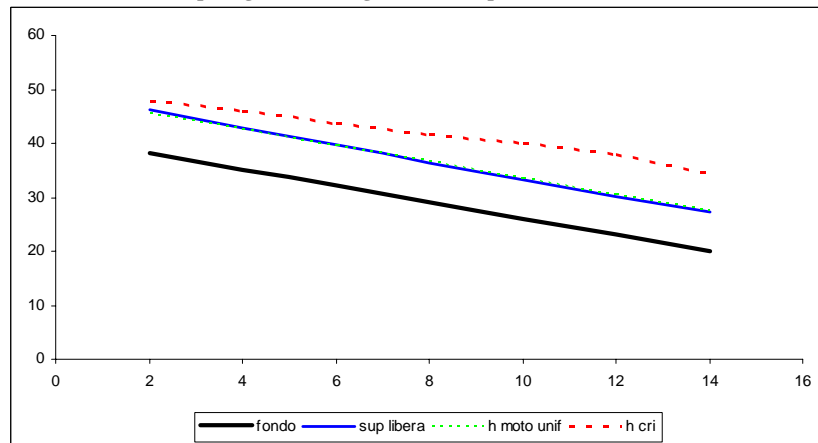
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
7.32	7.42	75	12.42

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.08	46.12	8.04	9.77	0.161	1.650	0.367	0.0204	0.413	0.0446	0.0556	0.979	1.326	0.0489
2	37.73	45.49	7.76	10.83	0.155	1.620	0.362	0.0194	0.405	0.0431	0.0536	1.031	1.181	0.0541
3	38.1	45.69	7.59	11.55	0.152	1.601	0.359	0.0188	0.400	0.0423	0.0524	1.064	1.233	0.0577
4	38.08	45.49	7.41	12.38	0.148	1.581	0.355	0.0181	0.395	0.0413	0.0511	1.102	1.293	0.0619
5	37.89	45.02	7.13	13.85	0.143	1.549	0.350	0.0172	0.387	0.0399	0.0491	1.165	1.393	0.0692
6	37.85	44.82	6.97	14.79	0.139	1.531	0.346	0.0166	0.383	0.0391	0.0479	1.205	1.457	0.0739
7	37.81	44.88	7.07	14.19	0.141	1.542	0.348	0.0170	0.386	0.0396	0.0487	1.180	1.417	0.0709

Tabella P. 19: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=1.5\%$. $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.19: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=1.5\%$. $Q=20$ l/s

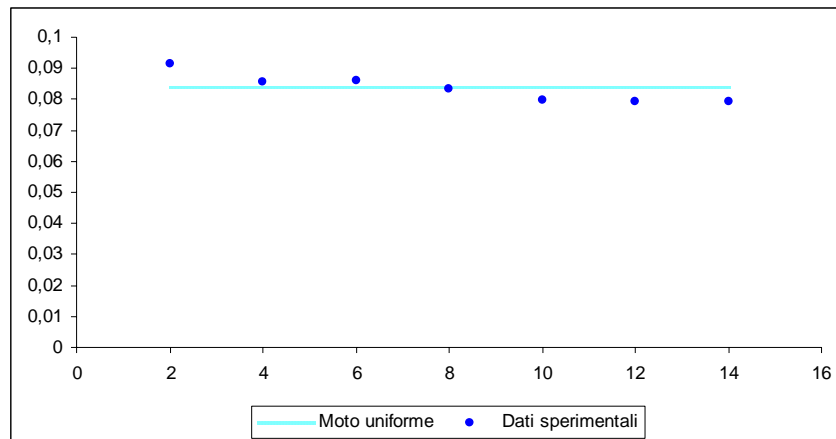
Prova 20 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 1.5\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

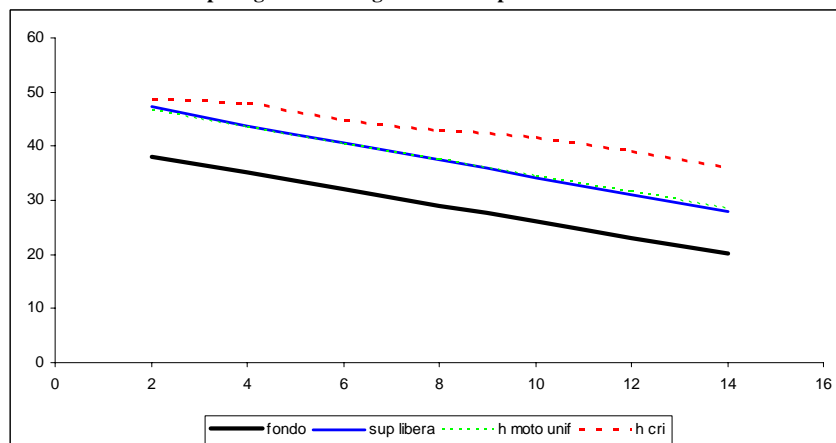
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
8.22	8.38	73	13.78

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.09	47.24	9.15	10.52	0.183	1.768	0.387	0.0246	0.442	0.0501	0.0637	1.016	1.285	0.0526
2	37.72	46.28	8.56	12.74	0.171	1.706	0.377	0.0224	0.427	0.0472	0.0594	1.118	1.220	0.0637
3	38.09	46.69	8.6	12.57	0.172	1.711	0.377	0.0225	0.428	0.0474	0.0596	1.111	1.209	0.0629
4	38.09	46.42	8.33	13.79	0.167	1.682	0.373	0.0215	0.420	0.0460	0.0577	1.163	1.286	0.0689
5	37.89	45.88	7.99	15.55	0.160	1.645	0.366	0.0202	0.411	0.0443	0.0552	1.235	1.395	0.0777
6	37.89	45.83	7.94	15.83	0.159	1.640	0.365	0.0201	0.410	0.0440	0.0549	1.246	1.412	0.0792
7	37.85	45.77	7.92	15.95	0.158	1.637	0.365	0.0200	0.409	0.0439	0.0547	1.251	1.419	0.0798

Tabella P. 20: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=1.5\%$. $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P. 20: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=1.5\%$. $Q=25$ l/s

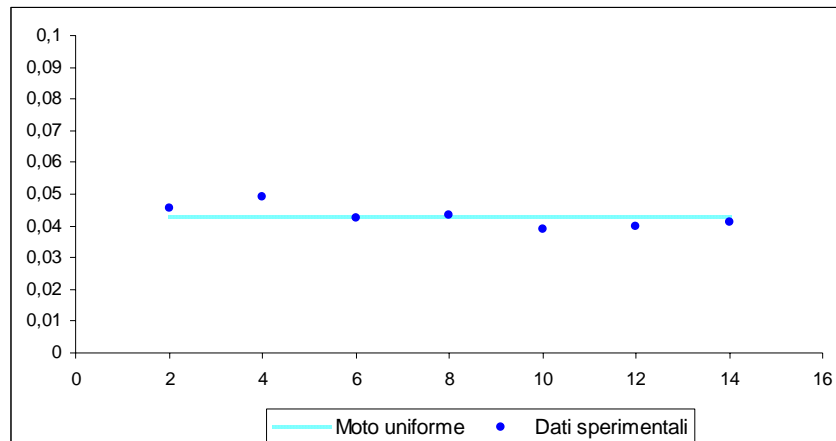
Prova 21 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 1.0\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

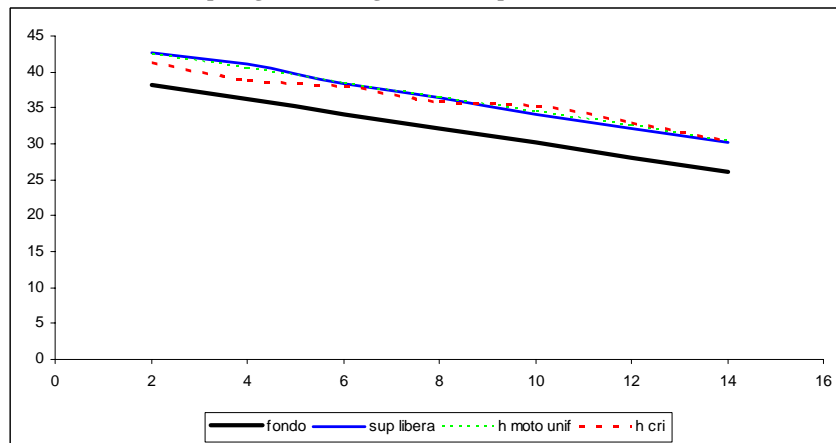
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.30	4.30	72	3.88

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.14	42.71	4.57	3.18	0.091	1.229	0.288	0.0090	0.307	0.0262	0.0311	0.558	1.011	0.0159
2	37.76	42.68	4.92	2.56	0.098	1.276	0.298	0.0100	0.319	0.0281	0.0335	0.501	0.721	0.0128
3	38.12	42.37	4.25	3.94	0.085	1.183	0.279	0.0080	0.296	0.0245	0.0289	0.621	0.962	0.0197
4	38.09	42.44	4.35	3.68	0.087	1.198	0.282	0.0083	0.299	0.0250	0.0295	0.600	0.919	0.0184
5	37.92	41.82	3.9	5.07	0.078	1.132	0.268	0.0071	0.283	0.0225	0.0264	0.705	1.140	0.0254
6	37.92	41.91	3.99	4.74	0.080	1.146	0.271	0.0073	0.286	0.0230	0.0271	0.682	1.090	0.0237
7	37.86	41.98	4.12	4.31	0.082	1.165	0.275	0.0077	0.291	0.0238	0.0280	0.650	1.023	0.0216

Tabella P. 21: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=1\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.21: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=1\%$. $Q=5$ l/s

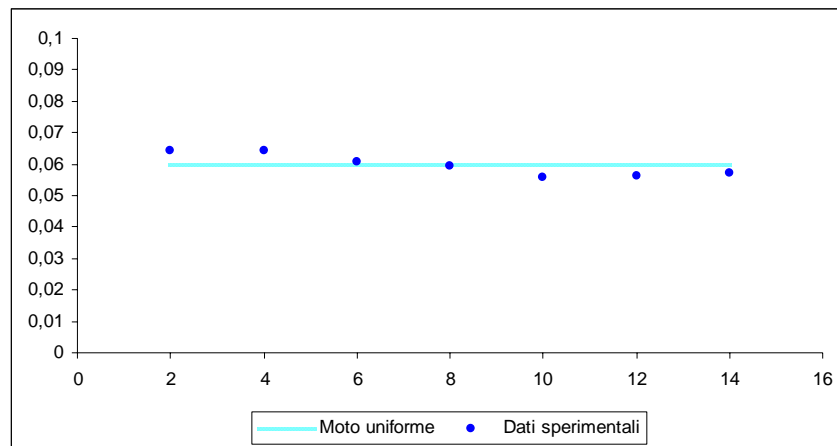
Prova 22 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 1.0\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

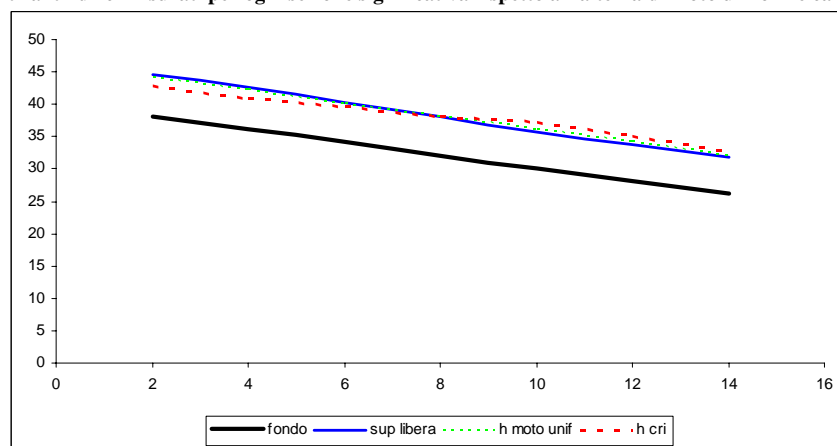
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.90	5.98	72	5.87

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.14	44.56	6.42	4.70	0.128	1.466	0.335	0.0147	0.366	0.0362	0.0440	0.679	1.033	0.0235
2	37.75	44.18	6.43	4.68	0.129	1.467	0.335	0.0148	0.367	0.0362	0.0441	0.677	0.853	0.0234
3	38.14	44.23	6.09	5.48	0.122	1.426	0.327	0.0136	0.357	0.0344	0.0417	0.733	0.949	0.0274
4	38.08	44.03	5.95	5.86	0.119	1.409	0.324	0.0132	0.352	0.0337	0.0407	0.758	0.993	0.0293
5	37.86	43.44	5.58	7.08	0.112	1.362	0.315	0.0120	0.341	0.0317	0.0381	0.833	1.126	0.0354
6	37.89	43.5	5.61	6.97	0.112	1.366	0.316	0.0121	0.342	0.0319	0.0383	0.827	1.114	0.0348
7	37.84	43.55	5.71	6.61	0.114	1.379	0.318	0.0124	0.345	0.0324	0.0390	0.806	1.076	0.0331

Tabella P. 22: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$, $i=1\%$, $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.22: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$, $i=1\%$, $Q=10$ l/s

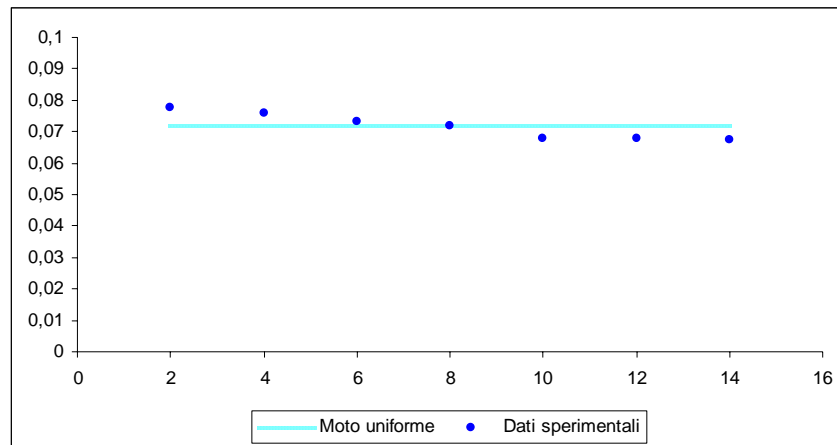
Prova 23 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 1.0\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

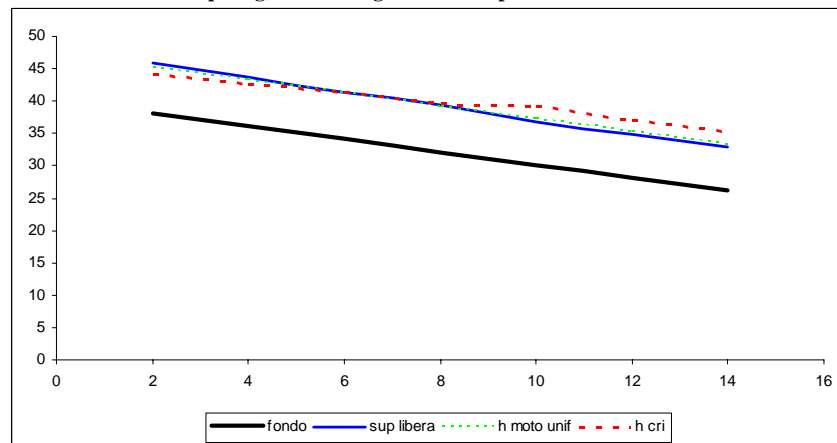
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
7.07	7.17	74	7.72

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.1	45.89	7.79	6.02	0.156	1.623	0.363	0.0195	0.406	0.0433	0.0538	0.769	1.058	0.0301
2	37.75	45.34	7.59	6.50	0.152	1.601	0.359	0.0188	0.400	0.0423	0.0524	0.798	0.925	0.0325
3	38.14	45.47	7.33	7.19	0.147	1.572	0.354	0.0179	0.393	0.0409	0.0505	0.840	0.990	0.0359
4	38.08	45.27	7.19	7.60	0.144	1.556	0.351	0.0174	0.389	0.0402	0.0495	0.863	1.028	0.0380
5	37.86	44.65	6.79	8.98	0.136	1.510	0.343	0.0160	0.377	0.0381	0.0467	0.938	1.150	0.0449
6	37.9	44.68	6.78	9.02	0.136	1.508	0.342	0.0159	0.377	0.0381	0.0466	0.940	1.153	0.0451
7	37.84	44.6	6.76	9.09	0.135	1.506	0.342	0.0159	0.377	0.0380	0.0464	0.944	1.160	0.0455

Tabella P. 23: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=1\%$. $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.23: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=1\%$. $Q=15$ l/s

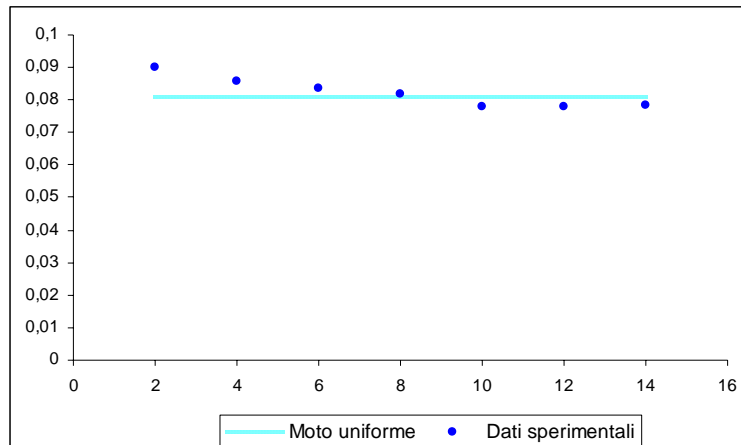
Prova 24 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 1.0\% \\ Q = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

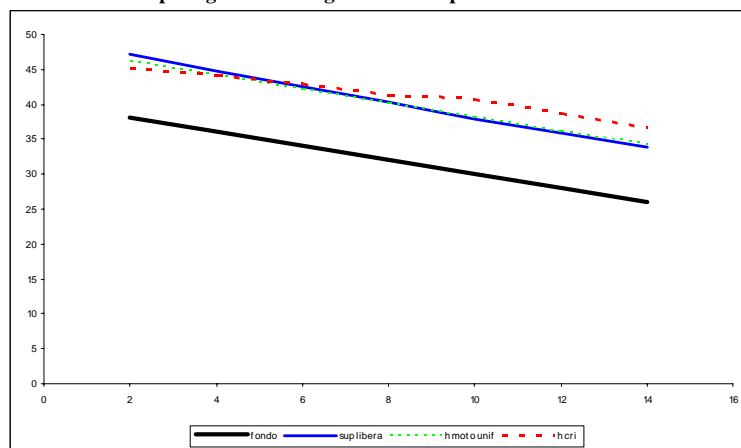
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
8.09	8.09	77	9.24

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.1	47.12	9.02	7.01	0.180	1.755	0.385	0.0241	0.439	0.0495	0.0627	0.830	1.058	0.0351
2	37.75	46.33	8.58	8.10	0.172	1.708	0.377	0.0224	0.427	0.0473	0.0595	0.891	0.972	0.0405
3	38.14	46.49	8.35	8.76	0.167	1.684	0.373	0.0216	0.421	0.0461	0.0578	0.927	1.024	0.0438
4	38.09	46.28	8.19	9.27	0.164	1.667	0.370	0.0210	0.417	0.0453	0.0567	0.953	1.064	0.0463
5	37.91	45.7	7.79	10.71	0.156	1.623	0.363	0.0195	0.406	0.0433	0.0538	1.025	1.173	0.0535
6	37.92	45.73	7.81	10.63	0.156	1.625	0.363	0.0196	0.406	0.0434	0.0539	1.021	1.167	0.0532
7	37.85	45.68	7.83	10.55	0.157	1.627	0.363	0.0197	0.407	0.0435	0.0541	1.017	1.161	0.0528

Tabella P. 24: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$, $i=1\%$, $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.24: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$, $i=1\%$, $Q=20$ l/s

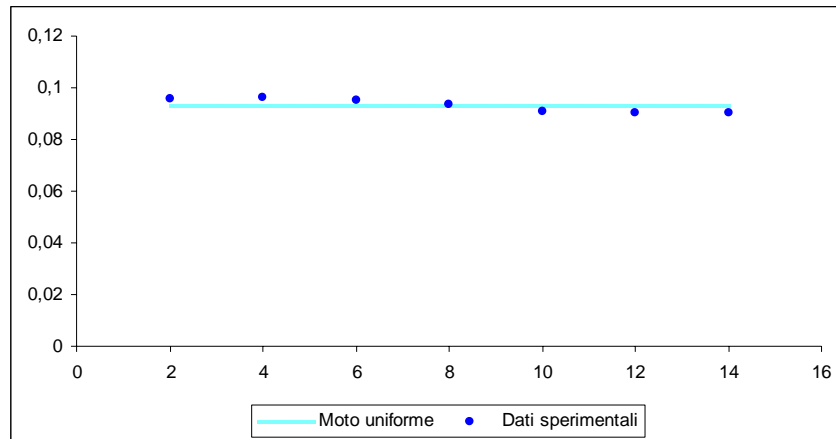
Prova 25 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 1.0\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

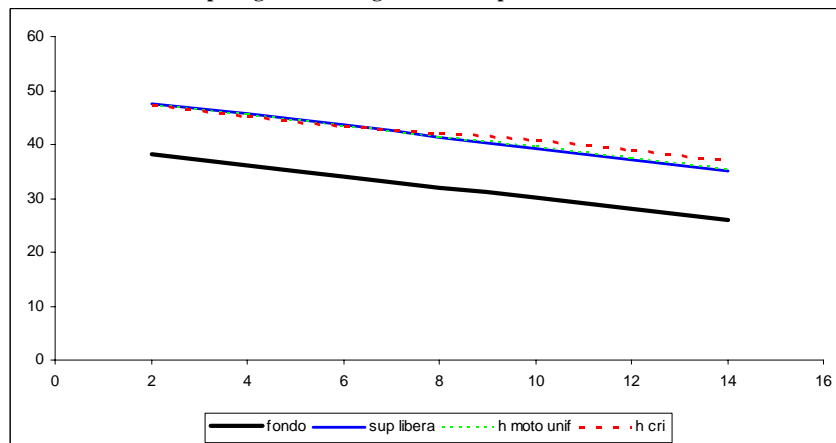
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
9.27	9.32	72	10.02

Rilievo	z_t	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.06	47.62	9.56	9.27	0.191	1.810	0.393	0.0262	0.453	0.0521	0.0667	0.954	1.180	0.0464
2	37.75	47.35	9.6	9.16	0.192	1.814	0.394	0.0264	0.454	0.0523	0.0669	0.948	0.977	0.0458
3	38.14	47.64	9.5	9.44	0.190	1.804	0.392	0.0260	0.451	0.0518	0.0662	0.962	0.997	0.0472
4	38.09	47.43	9.34	9.91	0.187	1.788	0.390	0.0253	0.447	0.0510	0.0650	0.986	1.030	0.0496
5	37.82	46.92	9.1	10.68	0.182	1.763	0.386	0.0244	0.441	0.0499	0.0633	1.024	1.084	0.0534
6	37.89	46.94	9.05	10.86	0.181	1.758	0.385	0.0242	0.439	0.0496	0.0629	1.032	1.095	0.0543
7	37.85	46.88	9.03	10.92	0.181	1.756	0.385	0.0241	0.439	0.0495	0.0628	1.035	1.100	0.0546

Tabella P. 25: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$, $i=1\%$, $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.25: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$, $i=1\%$, $Q=25$ l/s

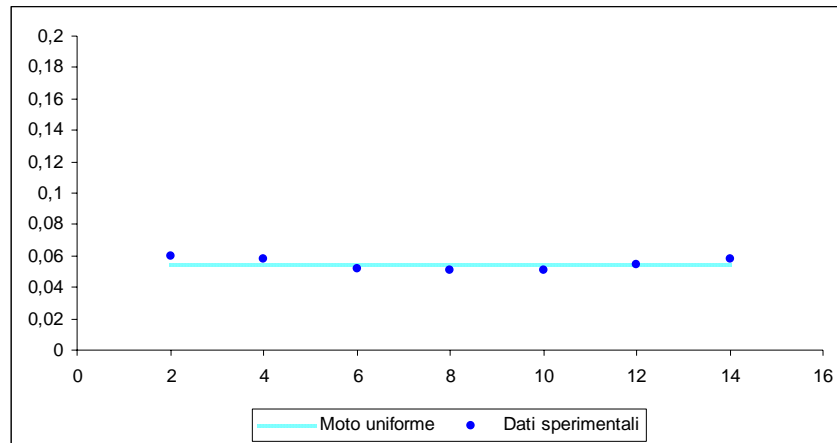
Prova 26 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 0.5\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

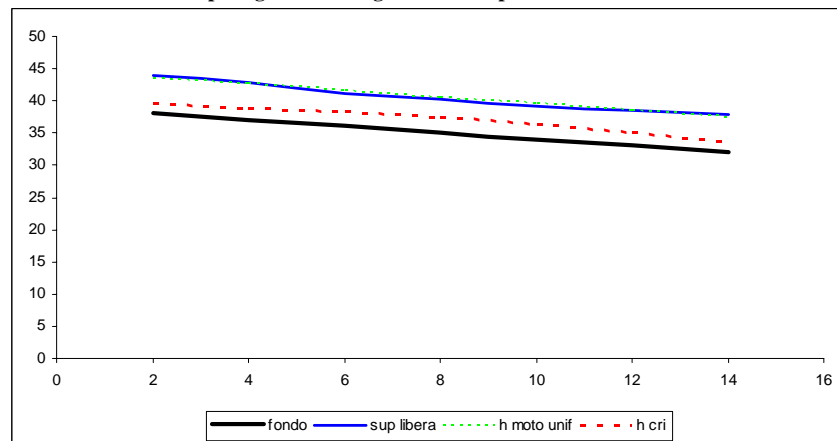
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
5.40	5.48	61	1.89

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.05	44	5.95	1.47	0.119	1.409	0.324	0.0132	0.352	0.0337	0.0407	0.379	0.600	0.0073
2	37.75	43.52	5.77	1.60	0.115	1.386	0.320	0.0126	0.347	0.0327	0.0395	0.397	0.527	0.0080
3	38.12	43.28	5.16	2.22	0.103	1.308	0.304	0.0107	0.327	0.0295	0.0352	0.467	0.657	0.0111
4	38.08	43.19	5.11	2.29	0.102	1.302	0.303	0.0106	0.325	0.0292	0.0348	0.474	0.669	0.0114
5	37.91	43.01	5.1	2.30	0.102	1.300	0.303	0.0105	0.325	0.0291	0.0348	0.475	0.672	0.0115
6	37.91	43.32	5.41	1.94	0.108	1.341	0.311	0.0115	0.335	0.0308	0.0369	0.436	0.598	0.0097
7	37.85	43.69	5.84	1.55	0.117	1.395	0.321	0.0128	0.349	0.0331	0.0399	0.390	0.515	0.0077

Tabella P. 26: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=0.5\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.26: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=0.5\%$. $Q=5$ l/s

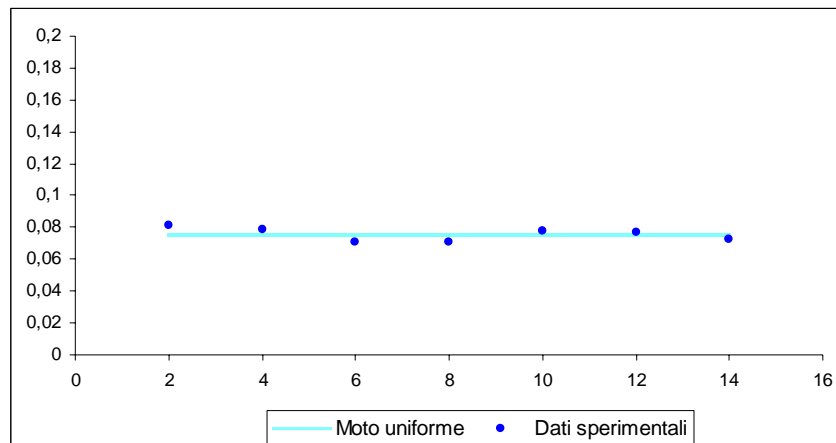
Prova 27 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 0.5\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

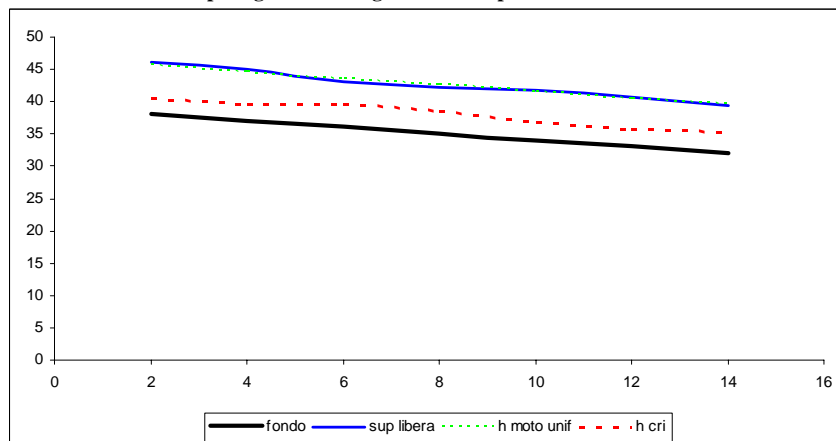
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
7.46	7.53	63	2.96

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.05	46.18	8.13	2.37	0.163	1.660	0.369	0.0208	0.415	0.0450	0.0562	0.482	0.649	0.0118
2	37.75	45.64	7.89	2.58	0.158	1.634	0.365	0.0199	0.409	0.0438	0.0545	0.503	0.572	0.0129
3	38.11	45.21	7.1	3.50	0.142	1.545	0.349	0.0171	0.386	0.0397	0.0489	0.586	0.703	0.0175
4	38.08	45.13	7.05	3.58	0.141	1.540	0.348	0.0169	0.385	0.0395	0.0485	0.592	0.712	0.0179
5	37.91	45.64	7.73	2.74	0.155	1.616	0.362	0.0193	0.404	0.0430	0.0534	0.518	0.595	0.0137
6	37.94	45.64	7.7	2.77	0.154	1.613	0.361	0.0192	0.403	0.0428	0.0532	0.521	0.600	0.0138
7	37.88	45.15	7.27	3.27	0.145	1.565	0.353	0.0177	0.391	0.0406	0.0501	0.566	0.671	0.0164

Tabella P. 27: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=0.5\%$. $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.27: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=0.5\%$. $Q=10$ l/s

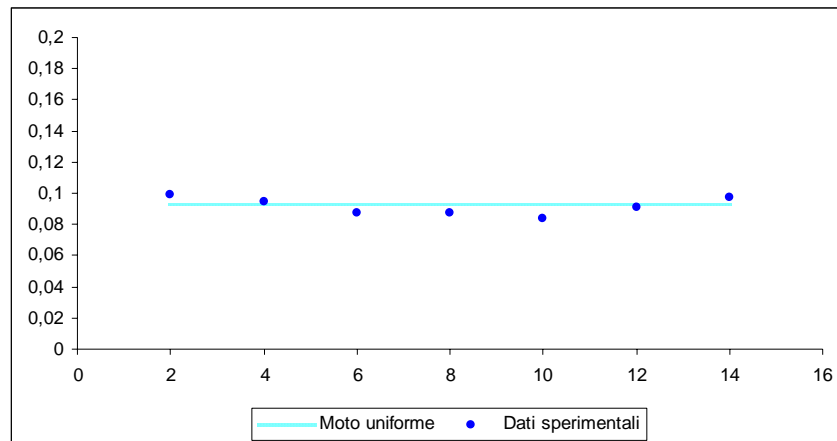
Prova 28 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 0.5\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

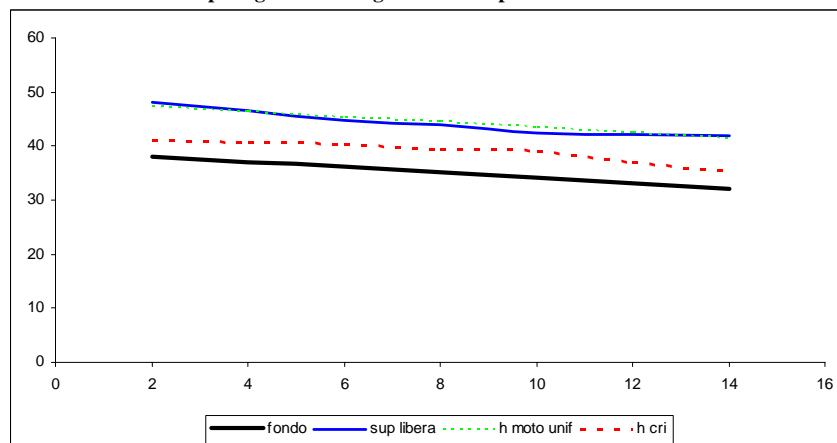
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
9.04	9.25	62	3.82

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.11	48	9.89	3.03	0.198	1.844	0.398	0.0275	0.461	0.0537	0.0691	0.545	0.662	0.0151
2	37.75	47.22	9.47	3.43	0.189	1.801	0.392	0.0259	0.450	0.0517	0.0660	0.580	0.602	0.0172
3	38.1	46.84	8.74	4.32	0.175	1.725	0.380	0.0230	0.431	0.0481	0.0607	0.651	0.703	0.0216
4	38.09	46.85	8.76	4.29	0.175	1.727	0.380	0.0231	0.432	0.0482	0.0608	0.649	0.700	0.0215
5	37.91	46.32	8.41	4.83	0.168	1.690	0.374	0.0218	0.423	0.0464	0.0583	0.688	0.758	0.0241
6	37.89	47	9.11	3.83	0.182	1.764	0.386	0.0245	0.441	0.0499	0.0634	0.613	0.649	0.0192
7	37.85	47.59	9.74	3.16	0.195	1.828	0.396	0.0269	0.457	0.0530	0.0680	0.557	0.570	0.0158

Tabella P. 28: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$, $i=0.5\%$, $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.28: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$, $i=0.5\%$, $Q=15$ l/s

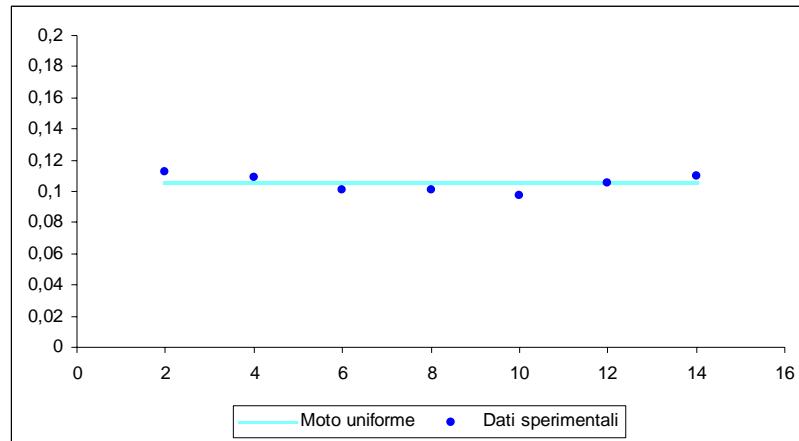
Prova 29 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 0.5\% \\ Q = 20 \frac{l}{s} \end{array} \right.$$

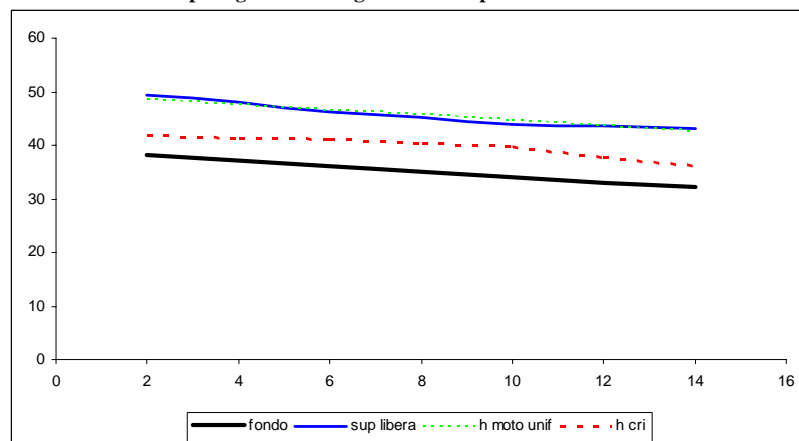
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
10.38	10.50	64	4.57

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.11	49.34	11.23	3.75	0.225	1.975	0.417	0.0330	0.494	0.0601	0.0790	0.606	0.689	0.0187
2	37.77	48.66	10.89	4.09	0.218	1.942	0.413	0.0316	0.486	0.0585	0.0765	0.633	0.613	0.0205
3	38.14	48.25	10.11	5.06	0.202	1.866	0.402	0.0284	0.466	0.0548	0.0707	0.704	0.707	0.0253
4	38.09	48.14	10.05	5.14	0.201	1.860	0.401	0.0282	0.465	0.0545	0.0703	0.710	0.715	0.0257
5	37.98	47.69	9.71	5.68	0.194	1.825	0.396	0.0268	0.456	0.0529	0.0678	0.746	0.765	0.0284
6	37.91	48.44	10.53	4.50	0.211	1.907	0.408	0.0301	0.477	0.0568	0.0738	0.665	0.654	0.0225
7	37.83	48.84	11.01	3.96	0.220	1.954	0.414	0.0321	0.488	0.0591	0.0774	0.624	0.600	0.0198

Tabella P. 29: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=0.5\%$. $Q=20l/s$



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.29: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=0.25$. $i=0.5\%$. $Q=20l/s$

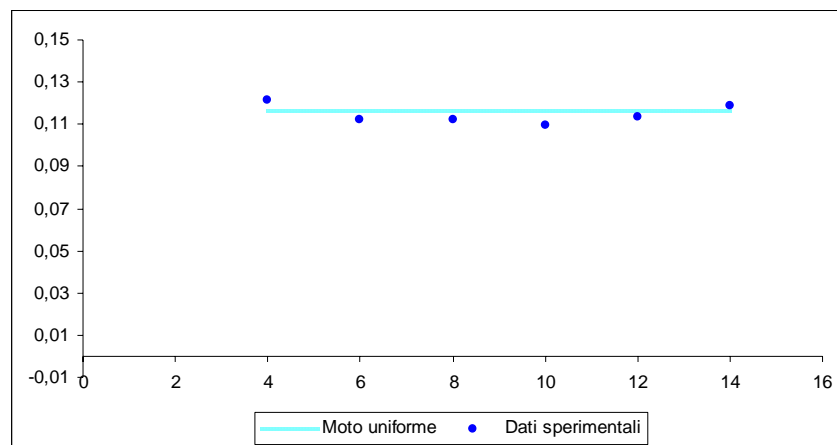
Prova 30 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 0.25 \text{ mm} \\ i = 0.5\% \\ Q = 25 \frac{l}{s} \end{array} \right.$$

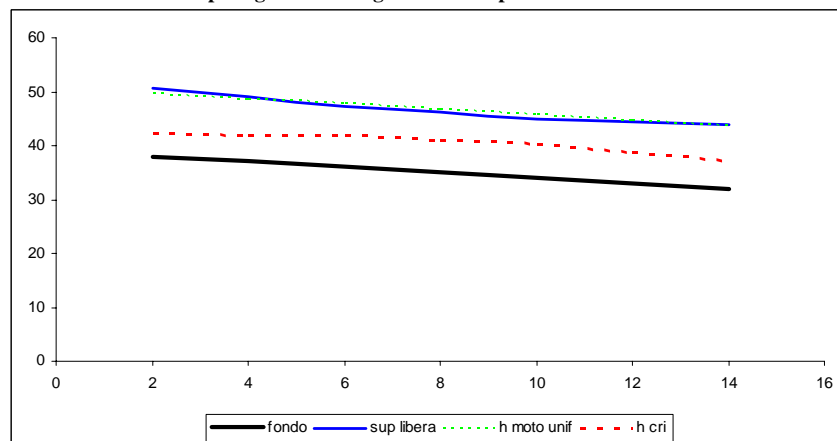
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
11.47	11.64	65	5.34

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.05	50.64	12.59	4.24	0.252	2.103	0.434	0.0388	0.526	0.0664	0.0893	0.645	0.689	0.0212
2	37.74	49.89	12.15	4.68	0.243	2.062	0.429	0.0369	0.515	0.0644	0.0860	0.678	0.621	0.0234
3	38.09	49.32	11.23	5.86	0.225	1.975	0.417	0.0330	0.494	0.0601	0.0790	0.758	0.722	0.0293
4	38.07	49.28	11.21	5.89	0.224	1.973	0.417	0.0329	0.493	0.0600	0.0789	0.760	0.725	0.0294
5	37.89	48.87	10.98	6.24	0.220	1.951	0.414	0.0319	0.488	0.0589	0.0772	0.783	0.754	0.0312
6	37.89	49.27	11.38	5.64	0.228	1.989	0.419	0.0336	0.497	0.0608	0.0802	0.744	0.704	0.0282
7	37.83	49.72	11.89	4.98	0.238	2.038	0.426	0.0358	0.509	0.0632	0.0840	0.699	0.647	0.0249

Tabella P. 30: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=0.5\%$. $Q=25l/s$



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P. 30: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=0.25$. $i=0.5\%$. $Q=25l/s$

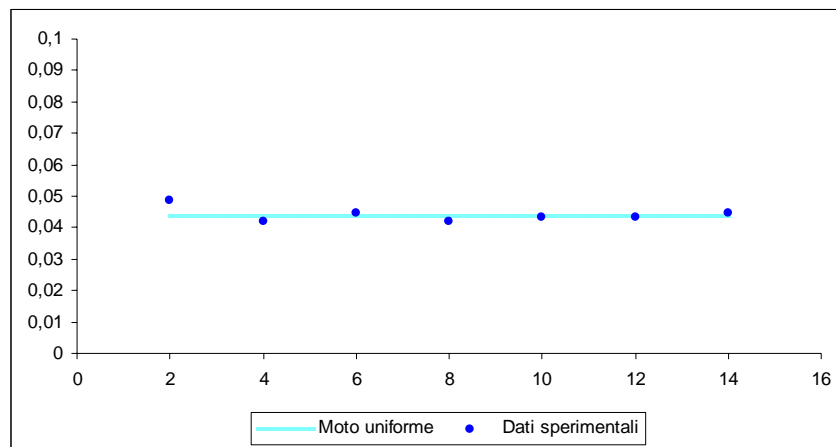
Prova 1 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{ mm} \\ i = 3.0\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

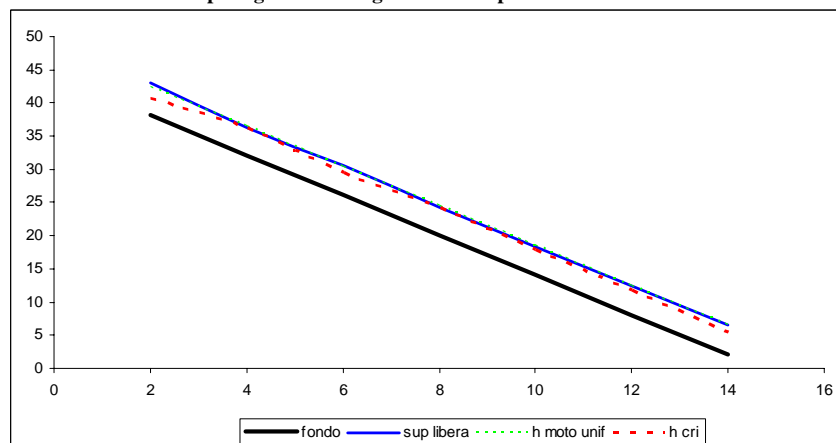
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.40	4.37	40	3.58

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.11	42.96	4.85	2.66	0.097	1.267	0.296	0.0098	0.317	0.0278	0.0330	0.511	0.898	0.0133
2	38.18	42.37	4.19	4.11	0.084	1.175	0.277	0.0079	0.294	0.0241	0.0284	0.635	0.991	0.0205
3	38.09	42.55	4.46	3.41	0.089	1.213	0.285	0.0086	0.303	0.0256	0.0303	0.579	0.875	0.0171
4	38.13	42.33	4.20	4.07	0.084	1.177	0.277	0.0079	0.294	0.0242	0.0285	0.632	0.983	0.0203
5	38.12	42.43	4.31	3.78	0.086	1.192	0.281	0.0082	0.298	0.0248	0.0293	0.609	0.936	0.0189
6	38.15	42.47	4.32	3.76	0.086	1.193	0.281	0.0082	0.298	0.0248	0.0293	0.607	0.933	0.0188
7	37.82	42.29	4.47	3.40	0.089	1.214	0.285	0.0087	0.304	0.0257	0.0304	0.577	0.872	0.0170

Tabella P. 31: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=3\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.1: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=3\%$. $Q=5$ l/s

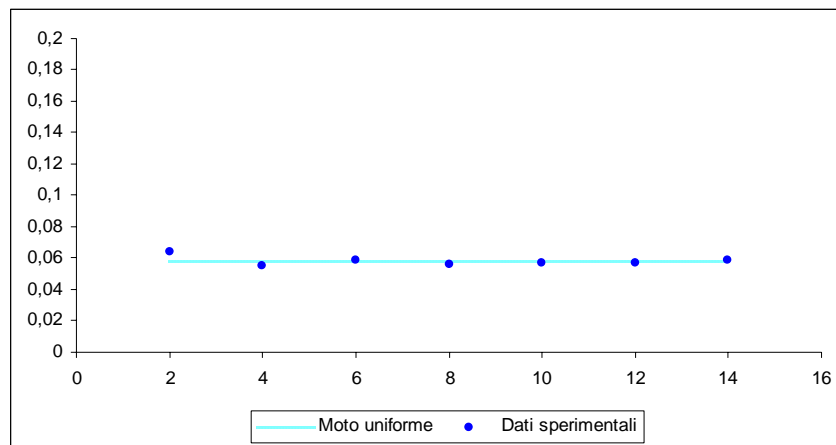
Prova 2 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 3.0\% \\ Q = 10 \frac{l}{s} \end{array} \right.$$

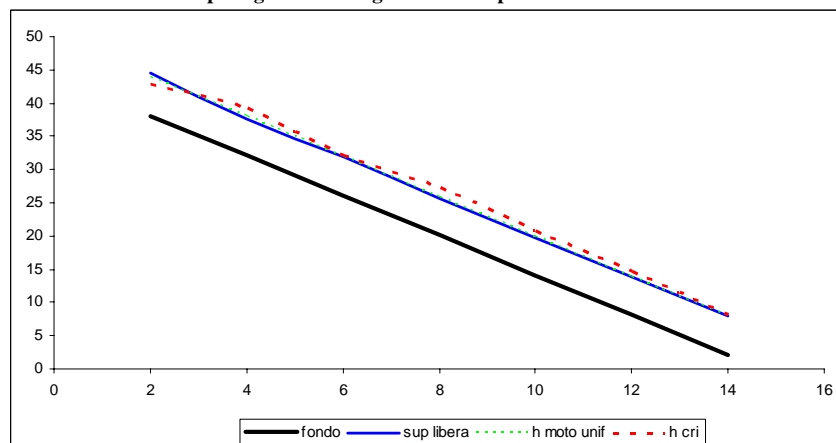
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.82	5.82	44	6.31

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.11	44.53	6.42	4.70	0.128	1.466	0.335	0.0147	0.366	0.0362	0.0440	0.679	1.033	0.0235
2	38.18	43.72	5.54	7.23	0.111	1.357	0.314	0.0119	0.339	0.0315	0.0378	0.842	1.142	0.0361
3	38.09	43.99	5.9	6.01	0.118	1.403	0.323	0.0130	0.351	0.0334	0.0404	0.768	1.009	0.0301
4	38.13	43.69	5.56	7.15	0.111	1.360	0.314	0.0119	0.340	0.0316	0.0380	0.838	1.134	0.0358
5	38.12	43.82	5.7	6.65	0.114	1.378	0.318	0.0124	0.344	0.0324	0.0390	0.808	1.080	0.0332
6	38.15	43.86	5.71	6.61	0.114	1.379	0.318	0.0124	0.345	0.0324	0.0390	0.806	1.076	0.0331
7	37.82	43.73	5.91	5.98	0.118	1.404	0.323	0.0131	0.351	0.0335	0.0404	0.766	1.006	0.0299

Tabella P. 2: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=3\%$. $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.2: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=3\%$. $Q=10$ l/s

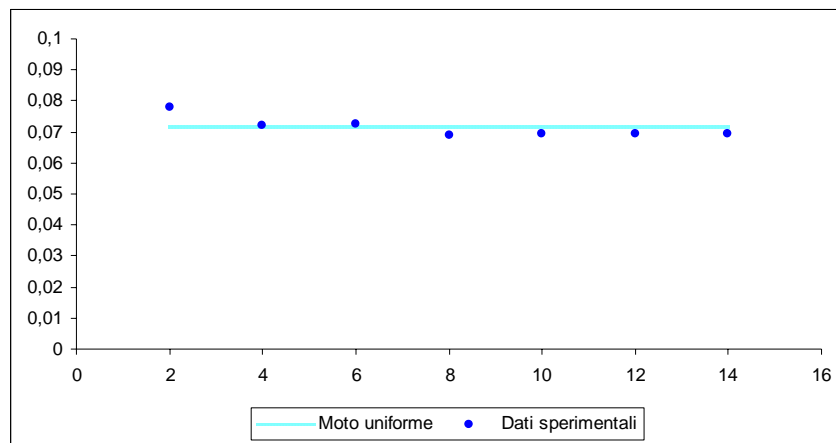
Prova 3 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 3.0\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

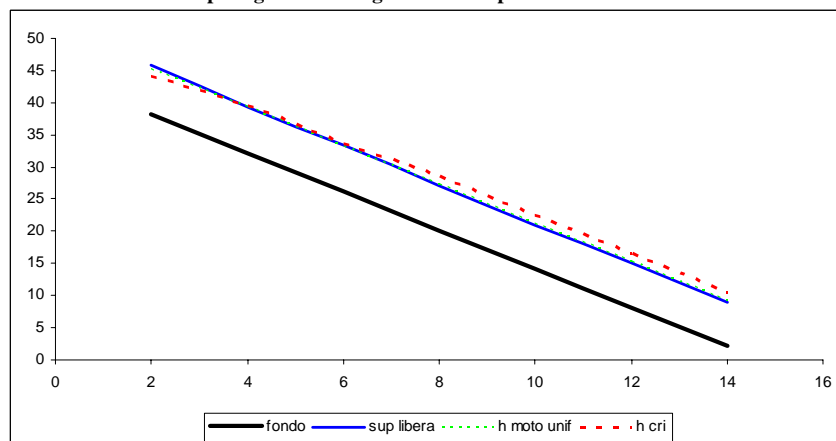
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
7.14	7.15	43	7.82

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.11	45.9	7.79	6.02	0.156	1.623	0.363	0.0195	0.406	0.0433	0.0538	0.769	1.058	0.0301
2	37.77	44.99	7.22	7.51	0.144	1.559	0.351	0.0175	0.390	0.0404	0.0497	0.858	1.020	0.0375
3	38.09	45.32	7.23	7.48	0.145	1.560	0.352	0.0175	0.390	0.0404	0.0498	0.857	1.017	0.0374
4	38.11	45.01	6.9	8.57	0.138	1.522	0.345	0.0164	0.381	0.0387	0.0474	0.917	1.114	0.0428
5	37.88	44.82	6.94	8.42	0.139	1.527	0.346	0.0165	0.382	0.0389	0.0477	0.909	1.102	0.0421
6	37.91	44.84	6.93	8.46	0.139	1.526	0.346	0.0165	0.381	0.0388	0.0477	0.911	1.105	0.0423
7	37.82	44.76	6.94	8.42	0.139	1.527	0.346	0.0165	0.382	0.0389	0.0477	0.909	1.102	0.0421

Tabella P. 3: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$. $i=3\%$. $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.3: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$. $i=3\%$. $Q=15$ l/s

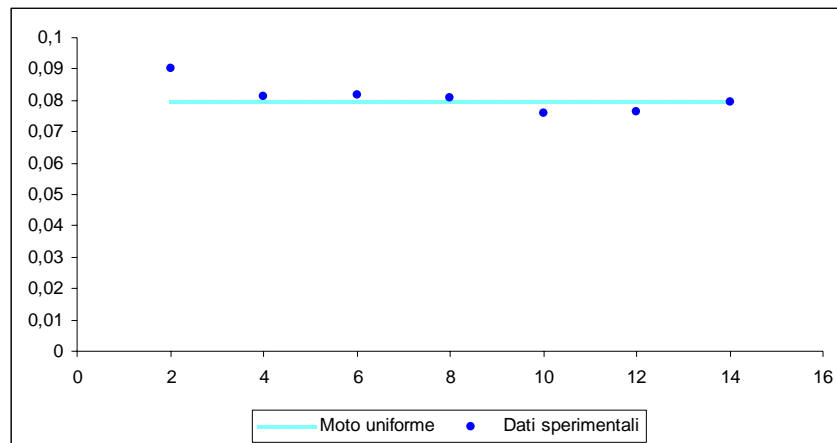
Prova 4 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 3.0\% \\ Q = 20 \frac{l}{s} \end{array} \right.$$

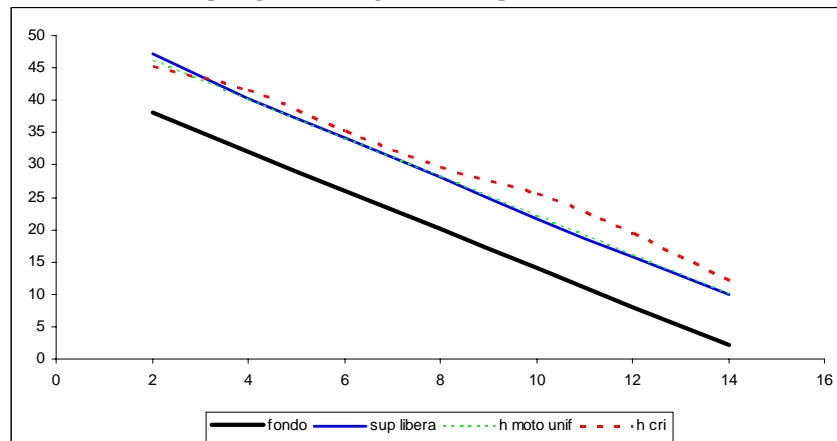
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
7.93	7.95	46	9.72

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.08	47.08	9	7.06	0.180	1.753	0.384	0.0240	0.438	0.0494	0.0626	0.832	1.062	0.0353
2	37.72	45.84	8.12	9.50	0.162	1.659	0.369	0.0207	0.415	0.0450	0.0562	0.965	1.082	0.0475
3	38.09	46.28	8.19	9.27	0.164	1.667	0.370	0.0210	0.417	0.0453	0.0567	0.953	1.064	0.0463
4	38.11	46.18	8.07	9.67	0.161	1.654	0.368	0.0205	0.413	0.0447	0.0558	0.974	1.095	0.0483
5	38.08	45.69	7.61	11.46	0.152	1.603	0.359	0.0189	0.401	0.0424	0.0525	1.060	1.227	0.0573
6	37.86	45.5	7.64	11.33	0.153	1.606	0.360	0.0190	0.402	0.0425	0.0527	1.054	1.218	0.0567
7	37.82	45.77	7.95	10.10	0.159	1.641	0.366	0.0201	0.410	0.0441	0.0550	0.995	1.127	0.0505

Tabella P. 4: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=3\%$. $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.4: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=3\%$. $Q=20$ l/s

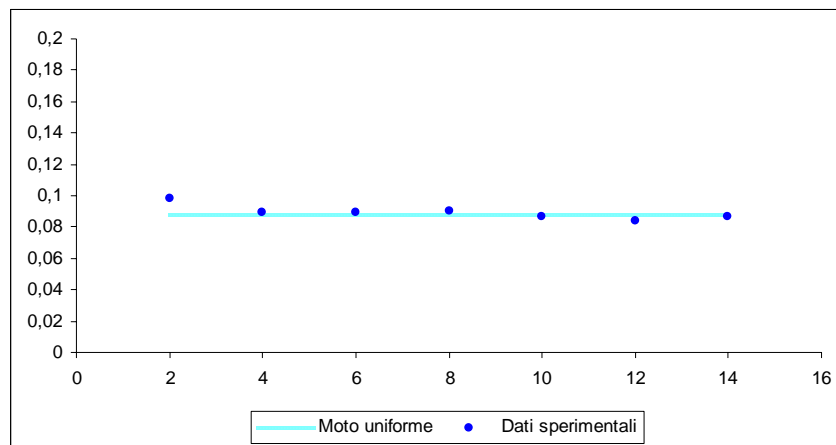
Prova 5 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 3.0\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

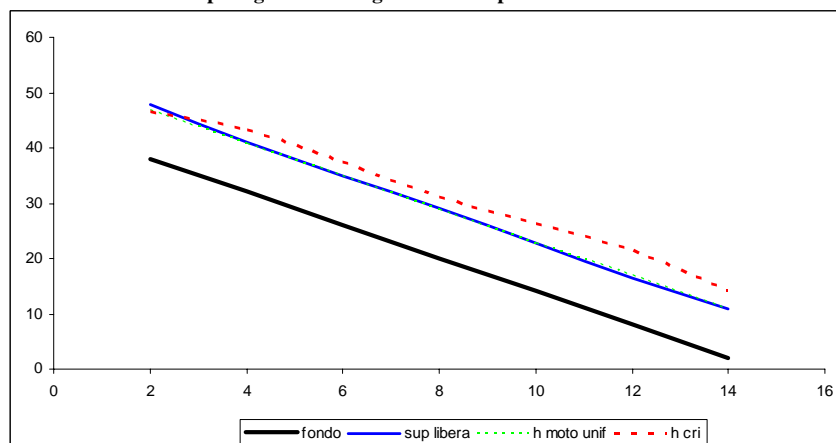
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
8.91	8.77	47	11.44

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.09	47.91	9.82	8.59	0.196	1.837	0.397	0.0272	0.459	0.0534	0.0686	0.918	1.119	0.0429
2	37.77	46.71	8.94	11.24	0.179	1.746	0.383	0.0238	0.437	0.0491	0.0621	1.050	1.121	0.0562
3	38.09	47	8.91	11.35	0.178	1.743	0.383	0.0237	0.436	0.0489	0.0619	1.055	1.129	0.0568
4	38.11	47.09	8.98	11.10	0.180	1.751	0.384	0.0240	0.438	0.0493	0.0624	1.044	1.112	0.0555
5	37.89	46.54	8.65	12.36	0.173	1.716	0.378	0.0227	0.429	0.0476	0.0600	1.101	1.196	0.0618
6	37.9	46.28	8.38	13.55	0.168	1.687	0.374	0.0217	0.422	0.0463	0.0581	1.153	1.272	0.0677
7	37.83	46.52	8.69	12.20	0.174	1.720	0.379	0.0229	0.430	0.0478	0.0603	1.094	1.185	0.0610

Tabella P. 5: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=3\%$. $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.5: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=3\%$. $Q=25$ l/s

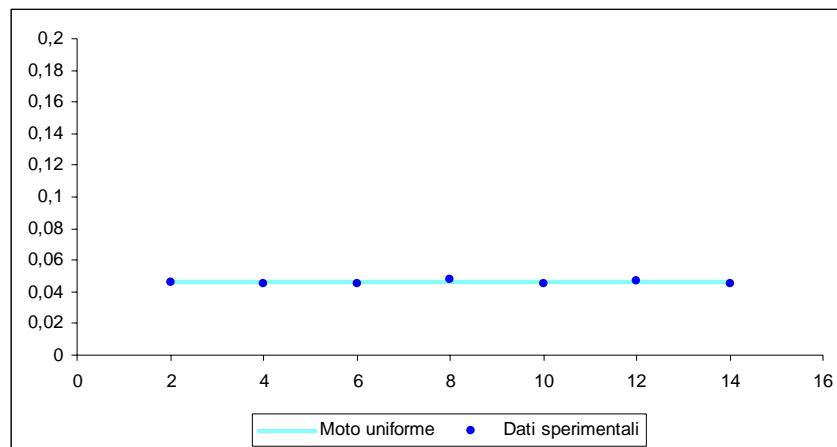
Prova 6 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 2.5\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

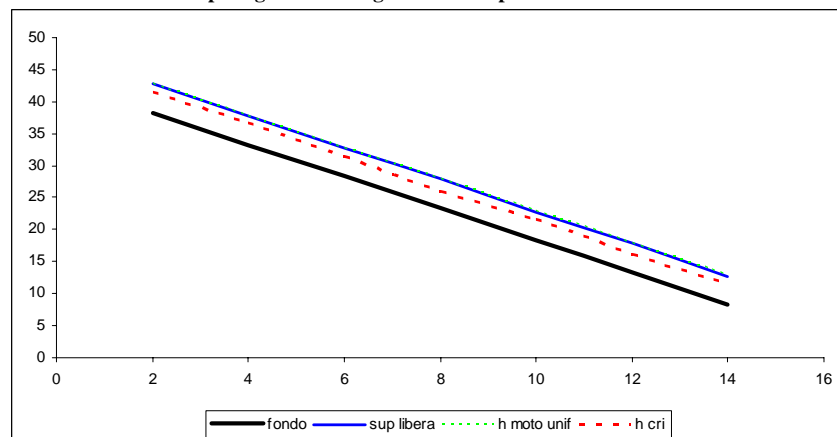
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
4.58	4.57	40	3.16

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.28	42.89	4.61	3.10	0.092	1.234	0.289	0.0091	0.309	0.0265	0.0313	0.551	0.994	0.0155
2	38.21	42.68	4.47	3.39	0.089	1.215	0.285	0.0087	0.304	0.0257	0.0304	0.577	0.871	0.0170
3	38.12	42.67	4.55	3.22	0.091	1.226	0.288	0.0089	0.306	0.0261	0.0309	0.562	0.841	0.0161
4	38.11	42.88	4.77	2.80	0.095	1.256	0.294	0.0095	0.314	0.0273	0.0325	0.524	0.767	0.0140
5	37.88	42.37	4.49	3.35	0.090	1.217	0.286	0.0087	0.304	0.0258	0.0305	0.573	0.864	0.0167
6	37.91	42.62	4.71	2.91	0.094	1.248	0.292	0.0094	0.312	0.0270	0.0320	0.534	0.786	0.0145
7	37.84	42.32	4.48	3.37	0.090	1.216	0.286	0.0087	0.304	0.0257	0.0304	0.575	0.867	0.0169

Tabella P. 6: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2.5\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero, altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.6: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2.5\%$. $Q=5$ l/s

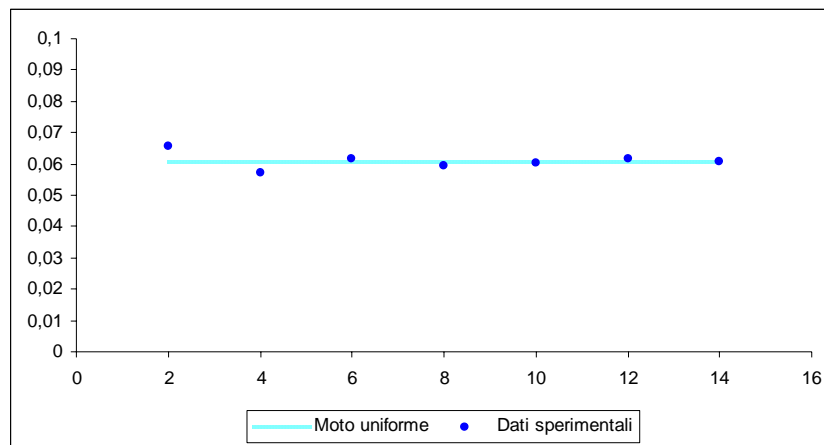
Prova 7 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 2.5\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

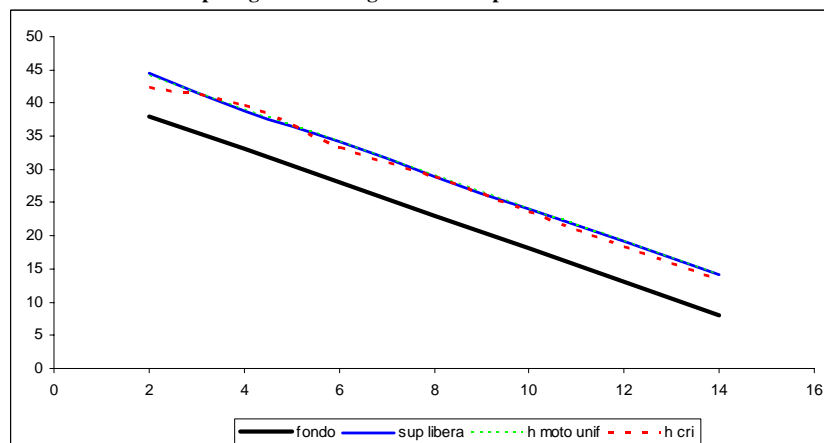
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.09	6.08	44	5.50

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.04	44.59	6.55	4.43	0.131	1.481	0.337	0.0152	0.370	0.0369	0.0450	0.659	0.993	0.0222
2	38.14	43.86	5.72	6.58	0.114	1.380	0.318	0.0124	0.345	0.0325	0.0391	0.803	1.073	0.0329
3	38.08	44.25	6.17	5.27	0.123	1.436	0.329	0.0139	0.359	0.0349	0.0423	0.719	0.925	0.0264
4	38.11	44.03	5.92	5.95	0.118	1.405	0.323	0.0131	0.351	0.0335	0.0405	0.764	1.003	0.0298
5	37.89	43.93	6.04	5.61	0.121	1.420	0.326	0.0135	0.355	0.0342	0.0414	0.742	0.964	0.0281
6	37.89	44.07	6.18	5.25	0.124	1.437	0.329	0.0139	0.359	0.0349	0.0423	0.718	0.922	0.0262
7	37.84	43.92	6.08	5.51	0.122	1.425	0.327	0.0136	0.356	0.0344	0.0416	0.735	0.952	0.0275

Tabella P. 7: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2.5\%$. $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.7: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2.5\%$. $Q=10$ l/s

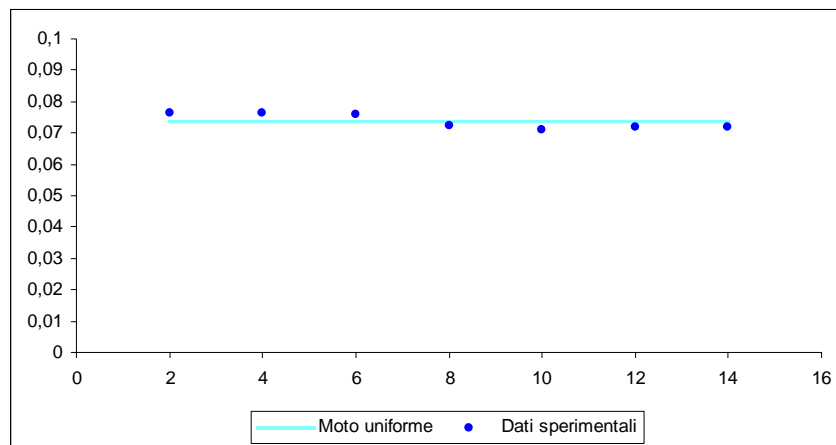
Prova 8 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 2.5\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

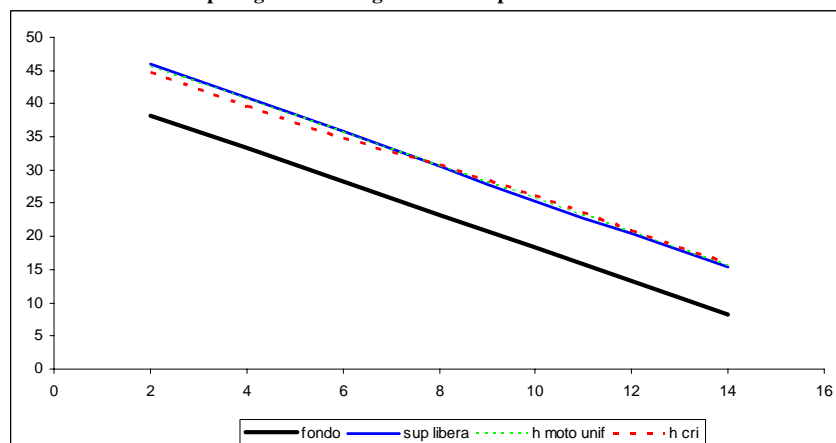
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
7.36	7.39	44	7.13

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.28	45.9	7.62	6.42	0.152	1.604	0.359	0.0189	0.401	0.0424	0.0526	0.794	1.105	0.0321
2	38.21	45.84	7.63	6.40	0.153	1.605	0.360	0.0189	0.401	0.0425	0.0527	0.792	0.916	0.0320
3	38.12	45.69	7.57	6.55	0.151	1.599	0.358	0.0187	0.400	0.0422	0.0522	0.801	0.930	0.0327
4	38.11	45.35	7.24	7.45	0.145	1.561	0.352	0.0175	0.390	0.0405	0.0499	0.855	1.014	0.0372
5	37.88	44.98	7.1	7.88	0.142	1.545	0.349	0.0171	0.386	0.0397	0.0489	0.879	1.054	0.0394
6	37.91	45.09	7.18	7.63	0.144	1.555	0.351	0.0173	0.389	0.0401	0.0494	0.865	1.031	0.0382
7	37.84	45.01	7.17	7.66	0.143	1.553	0.350	0.0173	0.388	0.0401	0.0494	0.867	1.034	0.0383

Tabella P. 8: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2.5\%$. $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.8: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2.5\%$. $Q=15$ l/s

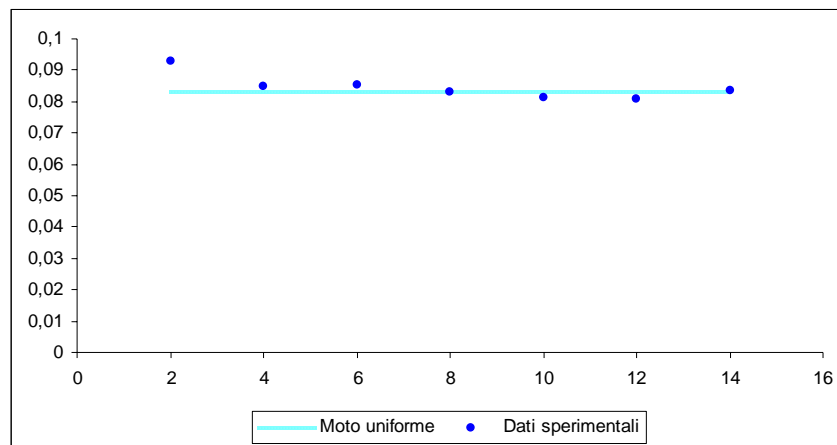
Prova 9 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{ mm} \\ i = 2.5\% \\ Q = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

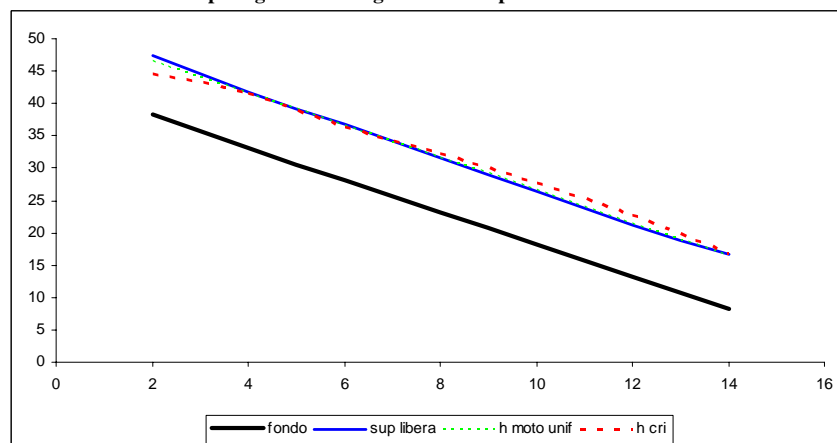
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
8.32	8.31	46	8.51

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.22	47.5	9.28	6.46	0.186	1.782	0.389	0.0251	0.445	0.0508	0.0646	0.796	1.000	0.0323
2	37.75	46.22	8.47	8.41	0.169	1.697	0.375	0.0220	0.424	0.0467	0.0587	0.908	0.996	0.0420
3	38.11	46.65	8.54	8.21	0.171	1.704	0.376	0.0223	0.426	0.0471	0.0592	0.897	0.981	0.0411
4	38.09	46.38	8.29	8.95	0.166	1.677	0.372	0.0213	0.419	0.0458	0.0574	0.937	1.039	0.0447
5	37.87	46	8.13	9.46	0.163	1.660	0.369	0.0208	0.415	0.0450	0.0562	0.964	1.079	0.0473
6	37.91	46.01	8.1	9.57	0.162	1.657	0.368	0.0206	0.414	0.0449	0.0560	0.969	1.087	0.0478
7	37.83	46.2	8.37	8.70	0.167	1.686	0.373	0.0216	0.422	0.0462	0.0580	0.924	1.020	0.0435

Tabella P. 9: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$, $i=2.5\%$, $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero, altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.9: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$, $i=2.5\%$, $Q=20$ l/s

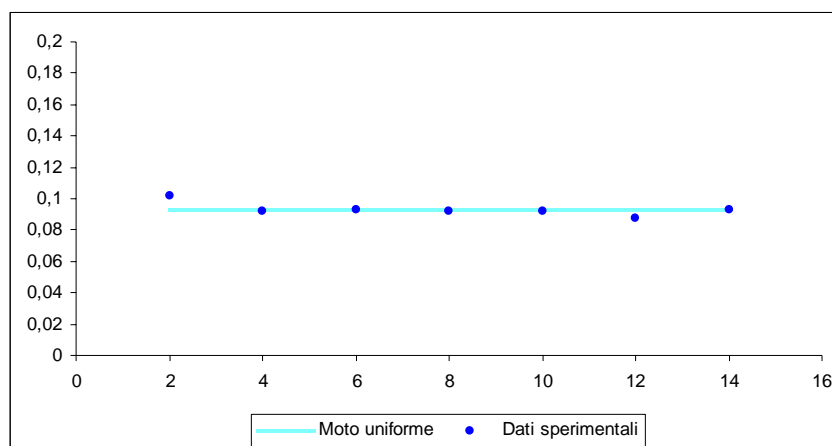
Prova 10 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 2.5\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

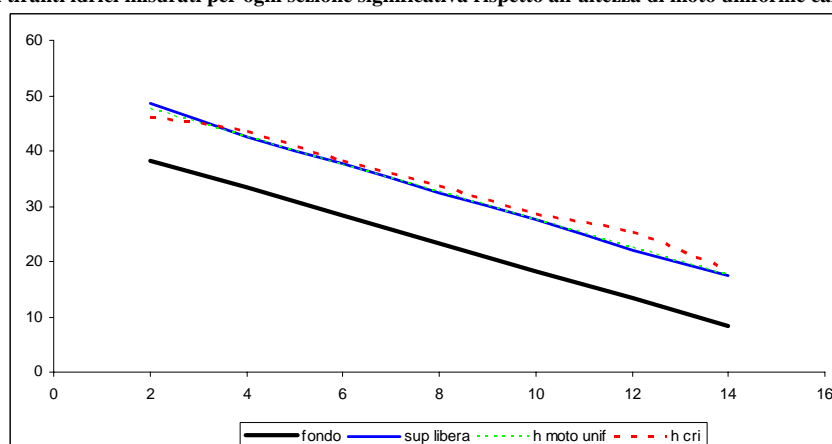
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
9.31	9.27	46	10.07

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.31	48.51	10.2	7.70	0.204	1.875	0.403	0.0288	0.469	0.0552	0.0714	0.869	1.039	0.0385
2	37.72	46.95	9.23	10.26	0.185	1.776	0.388	0.0249	0.444	0.0505	0.0642	1.003	1.054	0.0513
3	38.11	47.42	9.31	10.01	0.186	1.785	0.389	0.0252	0.446	0.0509	0.0648	0.991	1.037	0.0500
4	38.09	47.31	9.22	10.29	0.184	1.775	0.388	0.0249	0.444	0.0505	0.0642	1.005	1.056	0.0514
5	37.83	47.01	9.18	10.42	0.184	1.771	0.387	0.0247	0.443	0.0503	0.0639	1.011	1.065	0.0521
6	37.88	46.64	8.76	11.92	0.175	1.727	0.380	0.0231	0.432	0.0482	0.0608	1.081	1.167	0.0596
7	37.82	47.08	9.26	10.16	0.185	1.780	0.388	0.0250	0.445	0.0507	0.0645	0.998	1.048	0.0508

Tabella P. 10: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$. $i=2.5\%$. $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero, altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.10: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$. $i=2.5\%$. $Q=25$ l/s

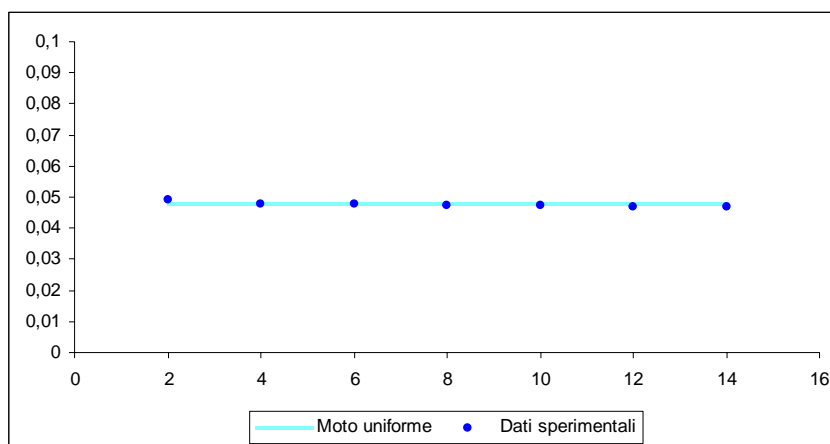
Prova 11 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 2.0\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

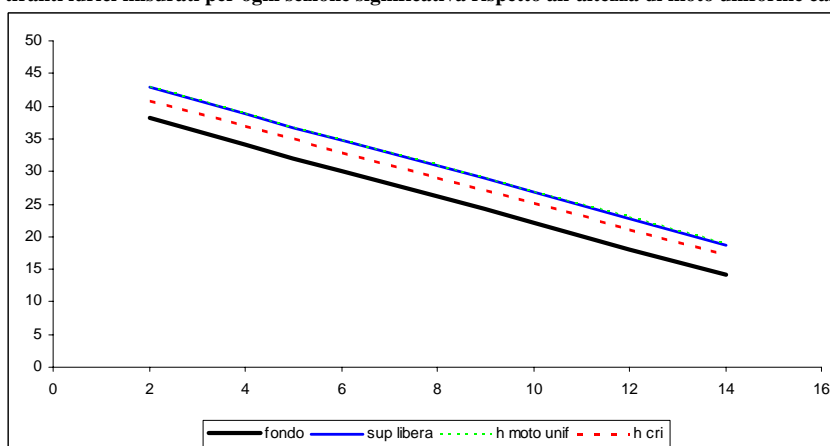
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.75	4.76	41	2.84

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.1	43	4.9	2.59	0.098	1.274	0.297	0.0099	0.318	0.0280	0.0334	0.504	0.881	0.0129
2	37.75	42.54	4.79	2.77	0.096	1.259	0.294	0.0096	0.315	0.0274	0.0326	0.521	0.760	0.0138
3	38.14	42.9	4.76	2.82	0.095	1.255	0.293	0.0095	0.314	0.0273	0.0324	0.526	0.770	0.0141
4	38.09	42.82	4.73	2.87	0.095	1.251	0.293	0.0094	0.313	0.0271	0.0322	0.531	0.779	0.0144
5	37.87	42.58	4.71	2.91	0.094	1.248	0.292	0.0094	0.312	0.0270	0.0320	0.534	0.786	0.0145
6	37.9	42.59	4.69	2.95	0.094	1.245	0.292	0.0093	0.311	0.0269	0.0319	0.538	0.792	0.0147
7	37.85	42.52	4.67	2.98	0.093	1.242	0.291	0.0092	0.311	0.0268	0.0318	0.541	0.799	0.0149

Tabella P. 11: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$. $i=2\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.11: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$. $i=2\%$. $Q=5$ l/s

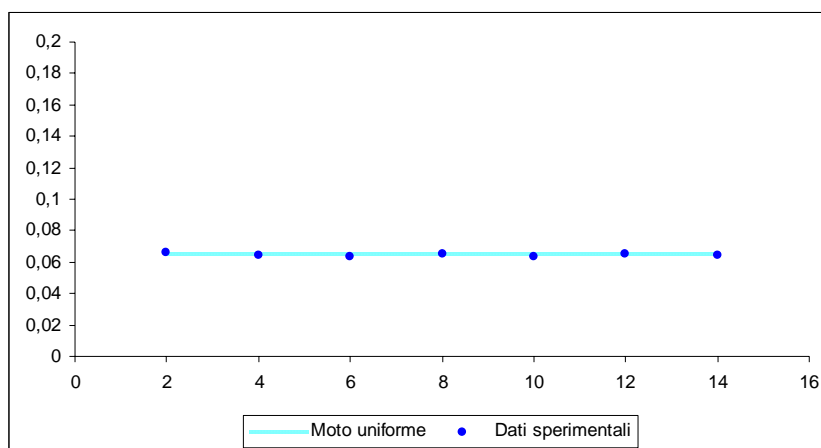
Prova 12 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 2.0\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

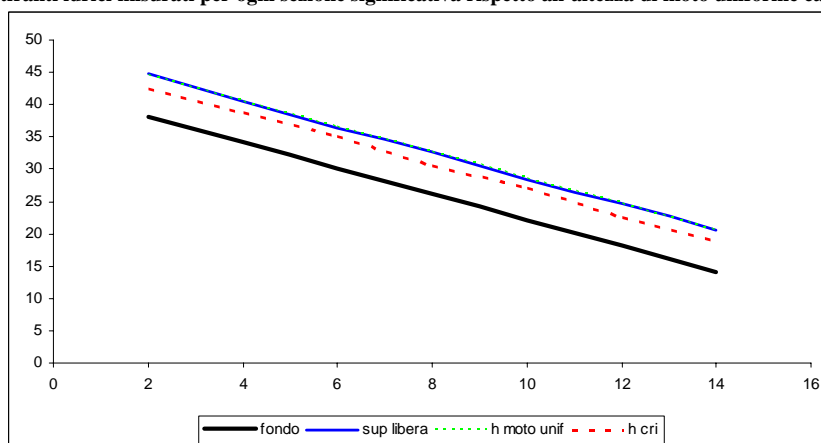
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.46	6.48	43	4.61

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.1	44.75	6.65	4.24	0.133	1.493	0.340	0.0155	0.373	0.0374	0.0457	0.645	0.964	0.0212
2	37.75	44.16	6.41	4.72	0.128	1.465	0.334	0.0147	0.366	0.0361	0.0440	0.680	0.858	0.0236
3	38.14	44.46	6.32	4.92	0.126	1.454	0.332	0.0144	0.363	0.0357	0.0433	0.695	0.882	0.0246
4	38.09	44.65	6.56	4.41	0.131	1.483	0.338	0.0152	0.371	0.0369	0.0450	0.658	0.820	0.0221
5	37.87	44.21	6.34	4.87	0.127	1.456	0.333	0.0145	0.364	0.0358	0.0435	0.691	0.877	0.0244
6	37.9	44.42	6.52	4.49	0.130	1.478	0.337	0.0151	0.369	0.0367	0.0447	0.664	0.830	0.0225
7	37.85	44.29	6.44	4.65	0.129	1.468	0.335	0.0148	0.367	0.0363	0.0442	0.676	0.850	0.0233

Tabella P. 12: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2\%$. $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.12: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2\%$. $Q=10$ l/s

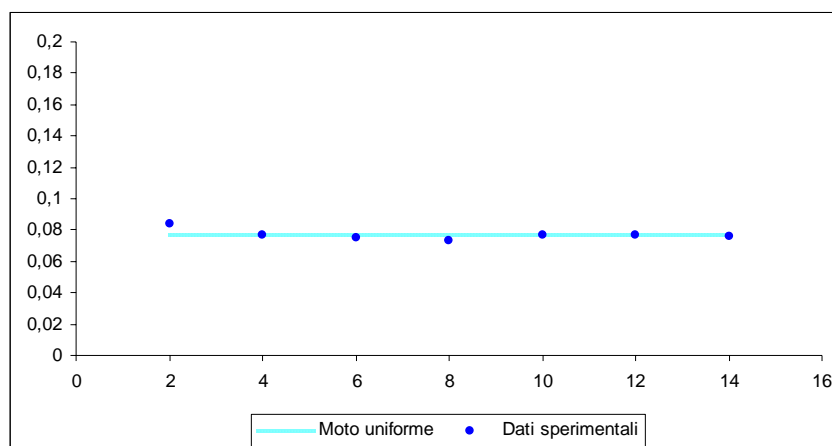
Prova 13 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 2.0\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

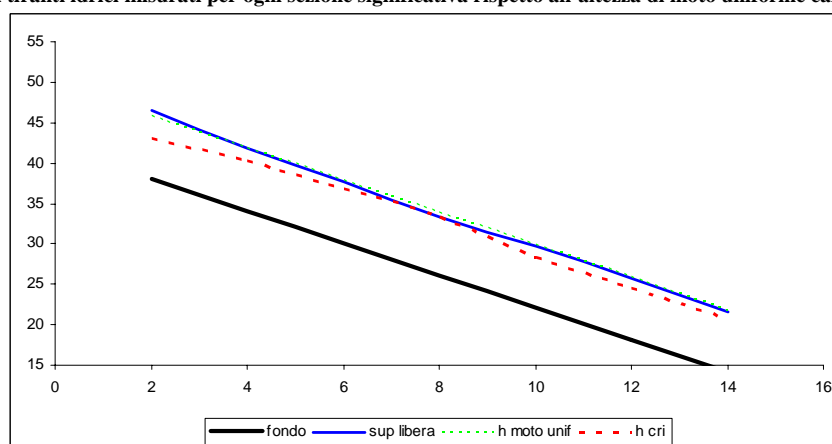
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
7.69	7.71	45	6.29

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.11	46.49	8.38	4.88	0.168	1.687	0.374	0.0217	0.422	0.0463	0.0581	0.692	0.917	0.0244
2	37.78	45.5	7.72	6.18	0.154	1.615	0.361	0.0193	0.404	0.0429	0.0533	0.779	0.895	0.0309
3	38.11	45.63	7.52	6.67	0.150	1.593	0.357	0.0185	0.398	0.0419	0.0519	0.809	0.942	0.0334
4	38.13	45.46	7.33	7.19	0.147	1.572	0.354	0.0179	0.393	0.0409	0.0505	0.840	0.990	0.0359
5	37.88	45.55	7.67	6.30	0.153	1.610	0.360	0.0191	0.402	0.0427	0.0529	0.786	0.906	0.0315
6	37.72	45.37	7.65	6.35	0.153	1.608	0.360	0.0190	0.402	0.0426	0.0528	0.789	0.911	0.0317
7	37.64	45.19	7.55	6.60	0.151	1.596	0.358	0.0186	0.399	0.0421	0.0521	0.804	0.935	0.0330

Tabella P. 13: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2\%$. $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.13: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2\%$. $Q=15$ l/s

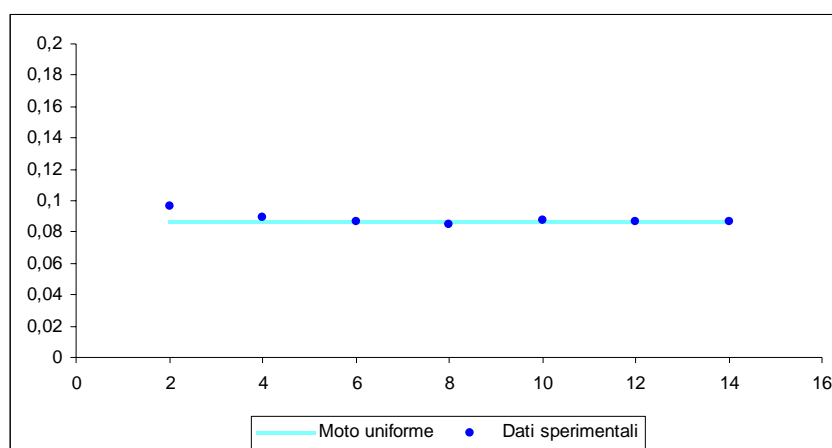
Prova 14 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 2.0\% \\ Q = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

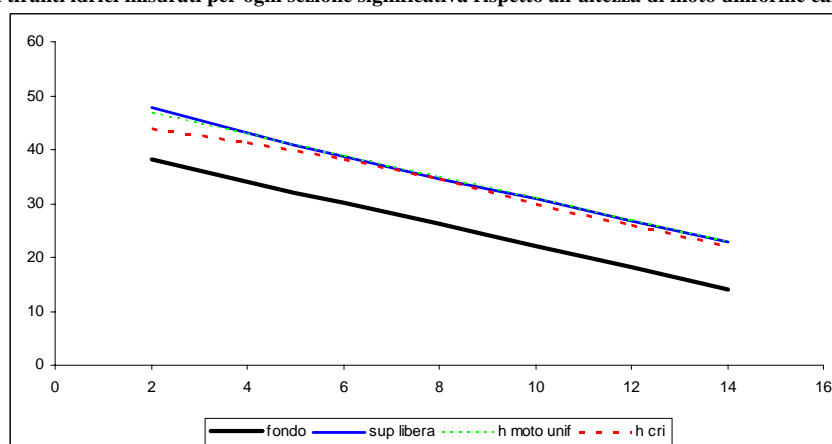
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
8.83	8.69	47	7.51

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.14	47.82	9.68	5.73	0.194	1.822	0.395	0.0267	0.456	0.0527	0.0675	0.750	0.921	0.0286
2	37.76	46.73	8.97	7.13	0.179	1.749	0.384	0.0239	0.437	0.0492	0.0623	0.836	0.891	0.0356
3	37.96	46.59	8.63	7.97	0.173	1.714	0.378	0.0226	0.428	0.0475	0.0599	0.884	0.961	0.0398
4	38.09	46.55	8.46	8.44	0.169	1.696	0.375	0.0220	0.424	0.0467	0.0586	0.910	0.999	0.0422
5	37.89	46.6	8.71	7.76	0.174	1.722	0.379	0.0229	0.431	0.0479	0.0604	0.872	0.944	0.0388
6	37.9	46.57	8.67	7.86	0.173	1.718	0.379	0.0228	0.429	0.0477	0.0602	0.878	0.952	0.0393
7	37.64	46.32	8.68	7.83	0.174	1.719	0.379	0.0228	0.430	0.0478	0.0602	0.877	0.950	0.0392

Tabella P. 14: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2\%$. $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.14: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2\%$. $Q=20$ l/s

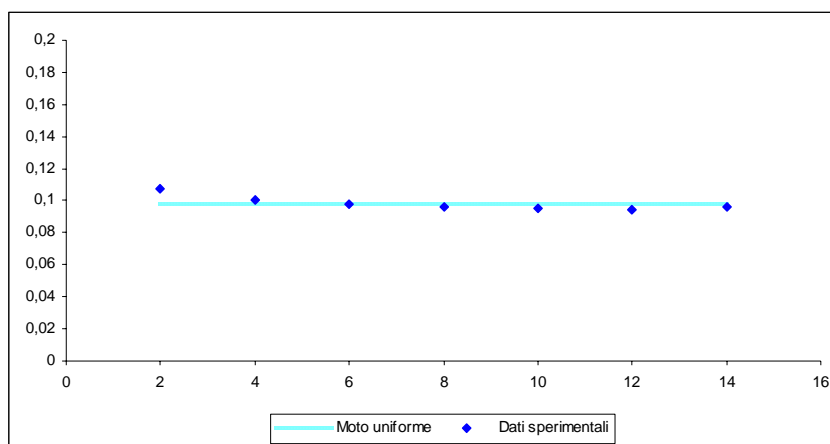
Prova 15 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 2.0\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

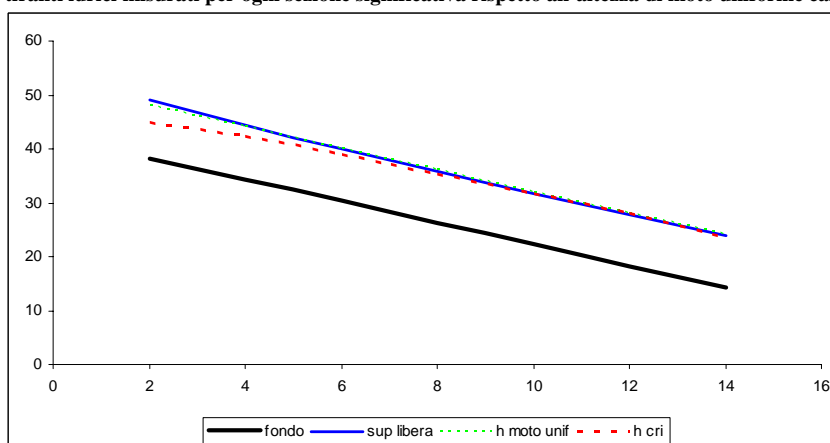
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
9.65	9.80	46	8.67

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.28	49.05	10.77	6.60	0.215	1.931	0.411	0.0311	0.483	0.0580	0.0756	0.804	0.934	0.0330
2	37.75	47.81	10.06	8.01	0.201	1.861	0.401	0.0282	0.465	0.0546	0.0703	0.887	0.893	0.0401
3	37.95	47.69	9.74	8.79	0.195	1.828	0.396	0.0269	0.457	0.0530	0.0680	0.929	0.950	0.0440
4	38.08	47.72	9.64	9.05	0.193	1.818	0.394	0.0265	0.455	0.0525	0.0672	0.942	0.969	0.0453
5	37.89	47.37	9.48	9.50	0.190	1.802	0.392	0.0259	0.451	0.0517	0.0661	0.965	1.001	0.0475
6	37.88	47.29	9.41	9.70	0.188	1.795	0.391	0.0256	0.449	0.0514	0.0656	0.976	1.016	0.0485
7	37.88	47.45	9.57	9.25	0.191	1.811	0.393	0.0263	0.453	0.0522	0.0667	0.952	0.983	0.0462

Tabella P. 15: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2\%$. $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.15: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=2\%$. $Q=25$ l/s

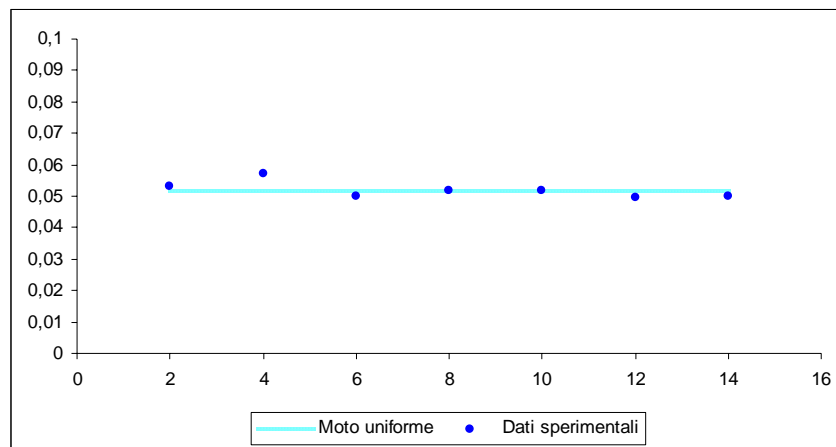
Prova 16 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 1.5\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

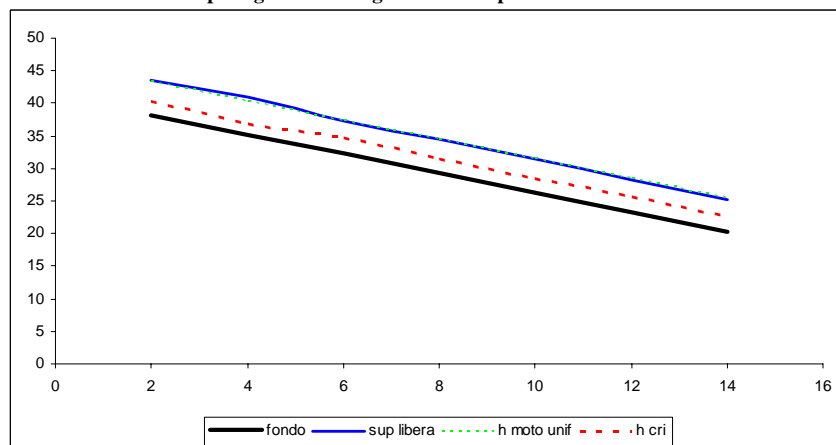
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.16	5.16	40	2.21

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.23	43.53	5.3	2.06	0.106	1.326	0.308	0.0111	0.332	0.0302	0.0362	0.449	0.754	0.0103
2	37.74	43.44	5.7	1.66	0.114	1.378	0.318	0.0124	0.344	0.0324	0.0390	0.404	0.540	0.0083
3	38.11	43.09	4.98	2.47	0.100	1.284	0.299	0.0102	0.321	0.0285	0.0339	0.492	0.704	0.0123
4	38.09	43.25	5.16	2.22	0.103	1.308	0.304	0.0107	0.327	0.0295	0.0352	0.467	0.657	0.0111
5	37.87	43.05	5.18	2.20	0.104	1.311	0.305	0.0108	0.328	0.0296	0.0353	0.465	0.652	0.0110
6	37.89	42.86	4.97	2.48	0.099	1.283	0.299	0.0101	0.321	0.0284	0.0339	0.494	0.707	0.0124
7	37.83	42.82	4.99	2.45	0.100	1.286	0.300	0.0102	0.321	0.0285	0.0340	0.491	0.701	0.0123

Tabella P. 16: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=1.5\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.16: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=1.5\%$. $Q=5$ l/s

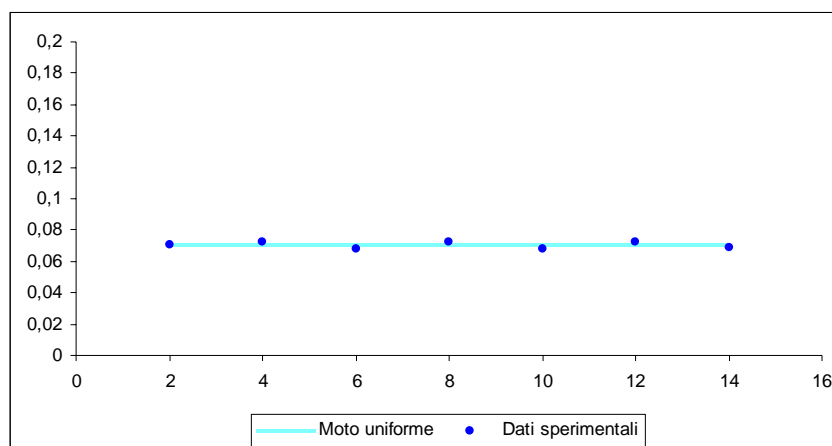
Prova 17 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 1.5\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

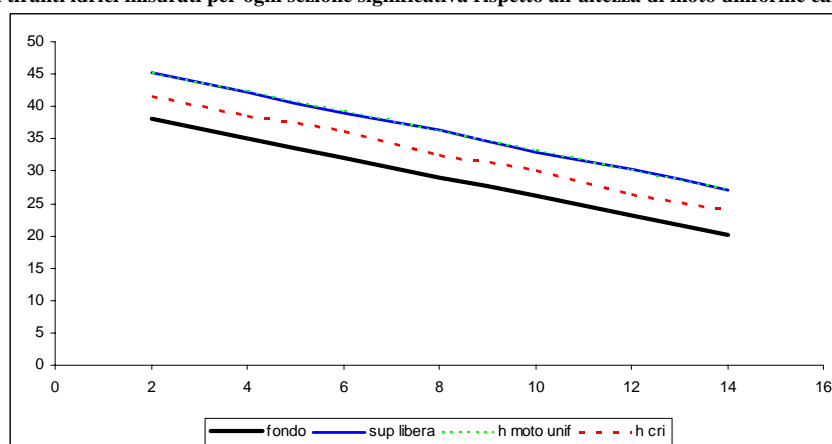
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
7.03	7.03	42	3.61

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.09	45.15	7.06	3.56	0.141	1.541	0.348	0.0169	0.385	0.0395	0.0486	0.591	0.856	0.0178
2	37.79	45	7.21	3.35	0.144	1.558	0.351	0.0174	0.390	0.0403	0.0496	0.573	0.682	0.0168
3	38.11	44.91	6.8	3.97	0.136	1.511	0.343	0.0160	0.378	0.0382	0.0467	0.624	0.764	0.0199
4	38.09	45.32	7.23	3.32	0.145	1.560	0.352	0.0175	0.390	0.0404	0.0498	0.571	0.678	0.0166
5	37.89	44.72	6.83	3.92	0.137	1.514	0.343	0.0161	0.379	0.0383	0.0469	0.620	0.758	0.0196
6	37.91	45.11	7.2	3.36	0.144	1.557	0.351	0.0174	0.389	0.0402	0.0496	0.575	0.684	0.0168
7	37.84	44.72	6.88	3.84	0.138	1.520	0.344	0.0163	0.380	0.0386	0.0473	0.614	0.747	0.0192

Tabella P. 17: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$, $i=1.5\%$, $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero, altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.17: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$, $i=1.5\%$, $Q=10$ l/s

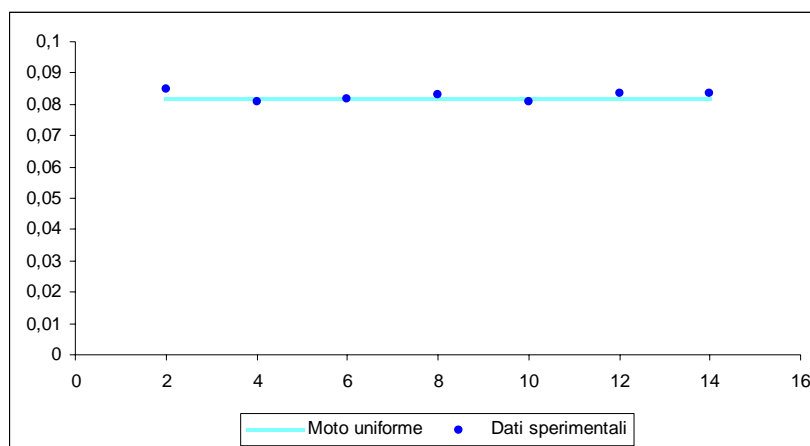
Prova 18 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 1.5\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

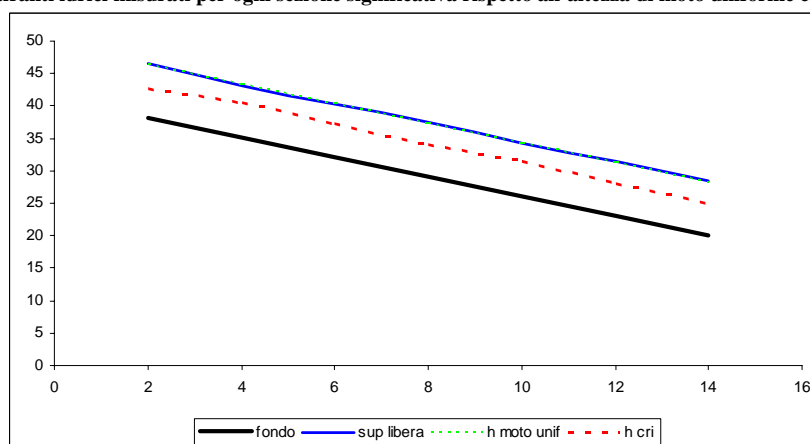
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
8.22	8.18	46	5.09

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.09	46.59	8.5	4.68	0.170	1.700	0.376	0.0221	0.425	0.0469	0.0589	0.678	0.891	0.0234
2	37.75	45.82	8.07	5.44	0.161	1.654	0.368	0.0205	0.413	0.0447	0.0558	0.730	0.821	0.0272
3	38.11	46.28	8.17	5.25	0.163	1.665	0.370	0.0209	0.416	0.0452	0.0565	0.718	0.802	0.0262
4	38.09	46.41	8.32	4.98	0.166	1.681	0.372	0.0215	0.420	0.0460	0.0576	0.699	0.774	0.0249
5	37.88	45.98	8.1	5.38	0.162	1.657	0.368	0.0206	0.414	0.0449	0.0560	0.727	0.815	0.0269
6	37.89	46.23	8.34	4.95	0.167	1.683	0.373	0.0215	0.421	0.0461	0.0578	0.697	0.770	0.0247
7	37.82	46.15	8.33	4.96	0.167	1.682	0.373	0.0215	0.420	0.0460	0.0577	0.698	0.772	0.0248

Tabella P. 18: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$, $i=1.5\%$, $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.18: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$, $i=1.5\%$, $Q=15$ l/s

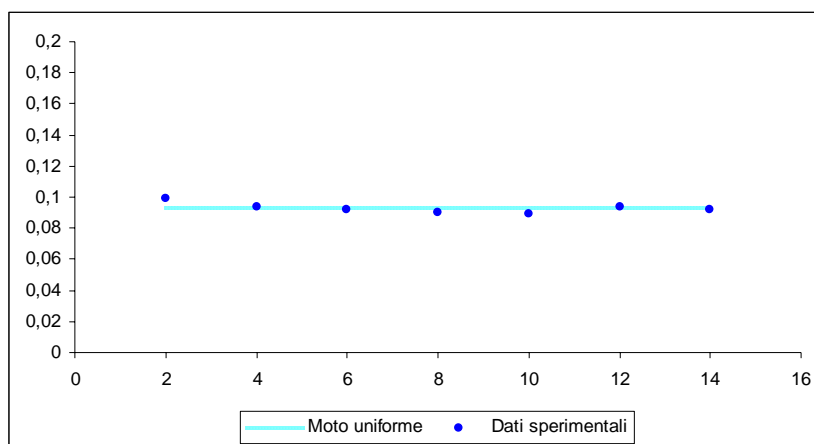
Prova 19 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 1.5\% \\ Q = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

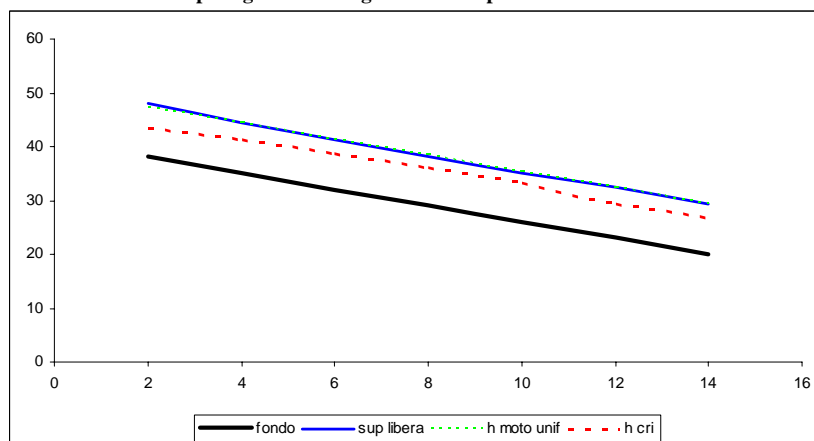
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
9.20	9.32	47	6.45

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.07	48	9.93	5.32	0.199	1.848	0.399	0.0277	0.462	0.0539	0.0694	0.723	0.876	0.0266
2	37.74	47.14	9.4	6.23	0.188	1.794	0.391	0.0256	0.448	0.0513	0.0655	0.782	0.814	0.0311
3	38.14	47.33	9.19	6.65	0.184	1.772	0.387	0.0248	0.443	0.0503	0.0639	0.808	0.850	0.0332
4	38.13	47.15	9.02	7.01	0.180	1.755	0.385	0.0241	0.439	0.0495	0.0627	0.830	0.882	0.0351
5	38.15	47.11	8.96	7.15	0.179	1.748	0.384	0.0239	0.437	0.0492	0.0623	0.838	0.893	0.0358
6	37.91	47.32	9.41	6.21	0.188	1.795	0.391	0.0256	0.449	0.0514	0.0656	0.781	0.812	0.0311
7	37.97	47.16	9.19	6.65	0.184	1.772	0.387	0.0248	0.443	0.0503	0.0639	0.808	0.850	0.0332

Tabella P. 19: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$, $i=1.5\%$, $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.19: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$, $i=1.5\%$, $Q=20$ l/s

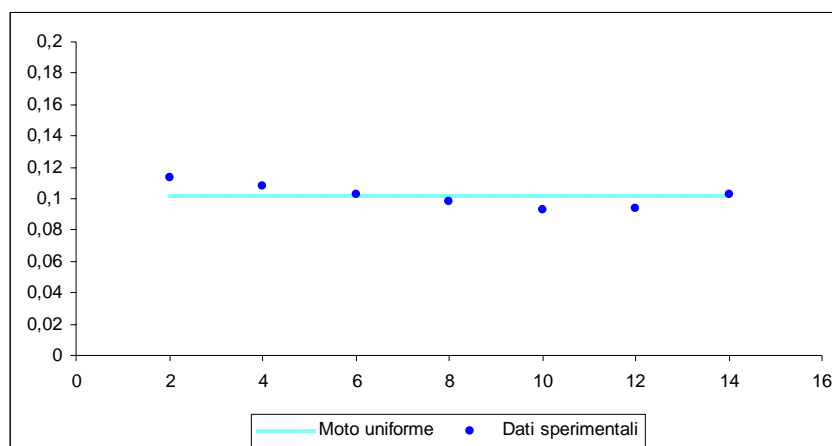
Prova 20 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 1.5\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

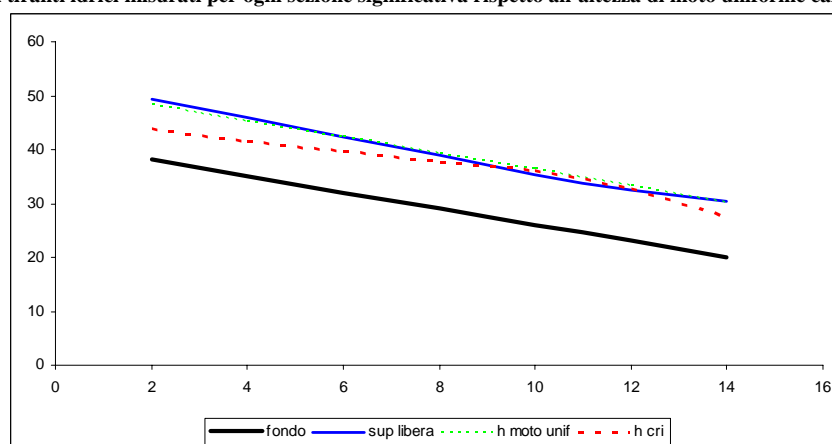
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
9.98	10.19	49	7.89

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.06	49.38	11.32	5.72	0.226	1.984	0.419	0.0334	0.496	0.0605	0.0797	0.749	0.847	0.0286
2	37.75	48.56	10.81	6.53	0.216	1.934	0.412	0.0312	0.484	0.0581	0.0759	0.800	0.777	0.0326
3	38.12	48.39	10.27	7.55	0.205	1.881	0.404	0.0290	0.470	0.0556	0.0719	0.861	0.858	0.0378
4	38.23	48.09	9.86	8.49	0.197	1.841	0.398	0.0274	0.460	0.0536	0.0689	0.912	0.928	0.0424
5	38.87	48.13	9.26	10.16	0.185	1.780	0.388	0.0250	0.445	0.0507	0.0645	0.998	1.048	0.0508
6	38.88	48.26	9.38	9.79	0.188	1.792	0.390	0.0255	0.448	0.0512	0.0653	0.980	1.022	0.0490
7	37.84	48.15	10.31	7.47	0.206	1.885	0.405	0.0292	0.471	0.0558	0.0722	0.856	0.851	0.0374

Tabella P. 20: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$, $i=1.5\%$, $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.20: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$, $i=1.5\%$, $Q=25$ l/s

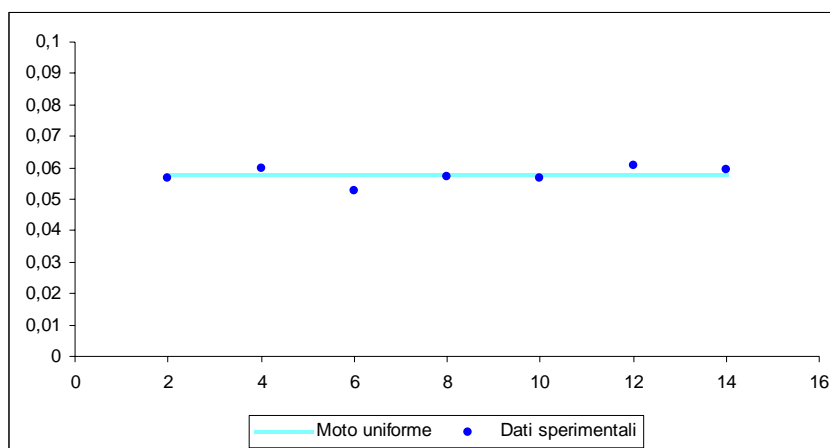
Prova 21 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 1.0\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

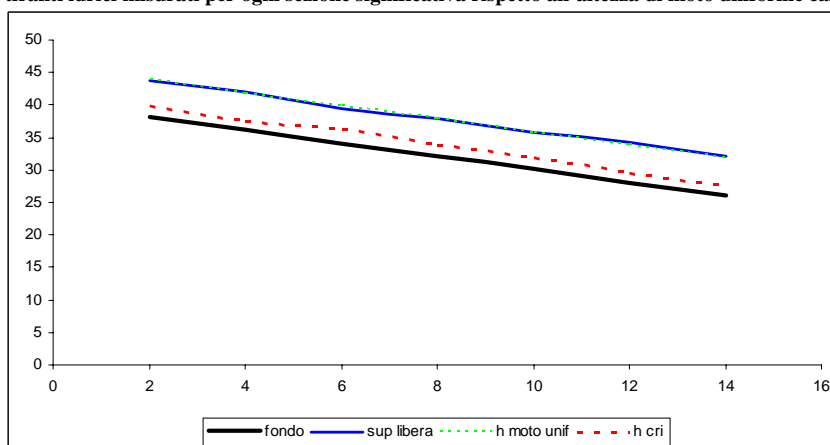
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.75	5.75	39	1.63

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.12	43.79	5.67	1.69	0.113	1.374	0.317	0.0123	0.343	0.0322	0.0388	0.407	0.660	0.0084
2	37.78	43.74	5.96	1.46	0.119	1.410	0.324	0.0132	0.353	0.0337	0.0408	0.378	0.495	0.0073
3	38.16	43.43	5.27	2.09	0.105	1.323	0.307	0.0110	0.331	0.0300	0.0359	0.453	0.630	0.0105
4	38.08	43.81	5.73	1.64	0.115	1.381	0.319	0.0125	0.345	0.0325	0.0392	0.401	0.534	0.0082
5	37.89	43.55	5.66	1.70	0.113	1.373	0.317	0.0123	0.343	0.0321	0.0387	0.408	0.548	0.0085
6	37.91	43.96	6.05	1.40	0.121	1.421	0.326	0.0135	0.355	0.0342	0.0414	0.370	0.480	0.0070
7	37.88	43.82	5.94	1.47	0.119	1.408	0.324	0.0132	0.352	0.0336	0.0406	0.380	0.498	0.0074

Tabella P. 21: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=1\%$. $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.21: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=1\%$. $Q=5$ l/s

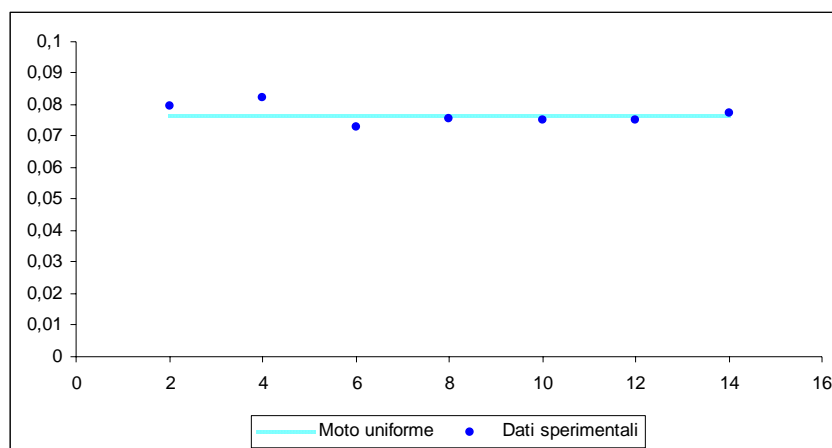
Prova 22 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 1.0\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

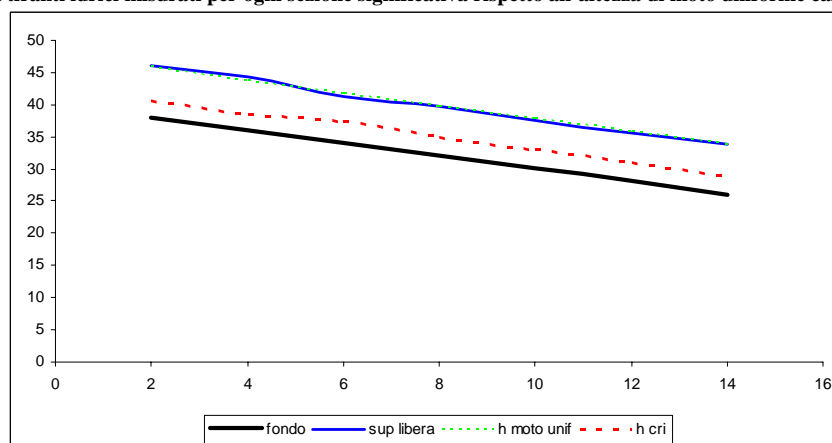
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$	cm
7.63	7.66	43	2.81

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.09	46.04	7.95	2.52	0.159	1.641	0.366	0.0201	0.410	0.0441	0.0550	0.498	0.678	0.0126
2	37.77	46	8.23	2.28	0.165	1.671	0.371	0.0211	0.418	0.0455	0.0570	0.473	0.527	0.0114
3	38.11	45.39	7.28	3.26	0.146	1.566	0.353	0.0177	0.392	0.0407	0.0501	0.565	0.669	0.0163
4	38.1	45.64	7.54	2.94	0.151	1.595	0.358	0.0186	0.399	0.0420	0.0520	0.537	0.625	0.0147
5	38.1	45.6	7.5	2.99	0.150	1.591	0.357	0.0185	0.398	0.0418	0.0517	0.541	0.631	0.0149
6	37.92	45.43	7.51	2.98	0.150	1.592	0.357	0.0185	0.398	0.0418	0.0518	0.540	0.630	0.0149
7	37.86	45.59	7.73	2.74	0.155	1.616	0.362	0.0193	0.404	0.0430	0.0534	0.518	0.595	0.0137

Tabella P. 22: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=1\%$. $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero, altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.22: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=1\%$. $Q=10$ l/s

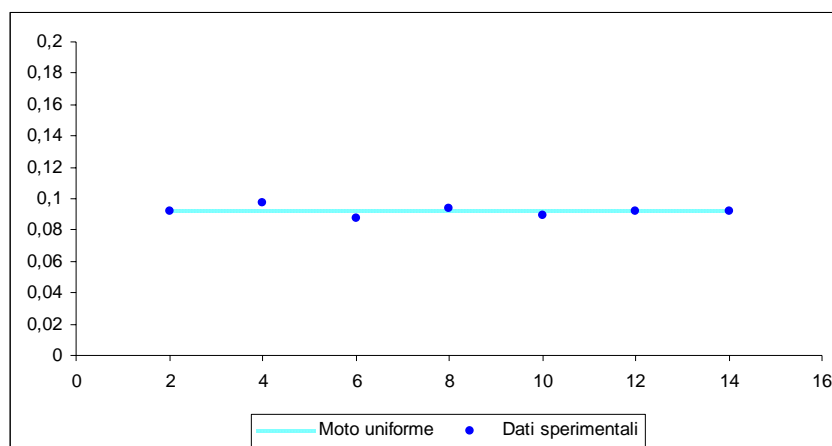
Prova 23 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 1.0\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

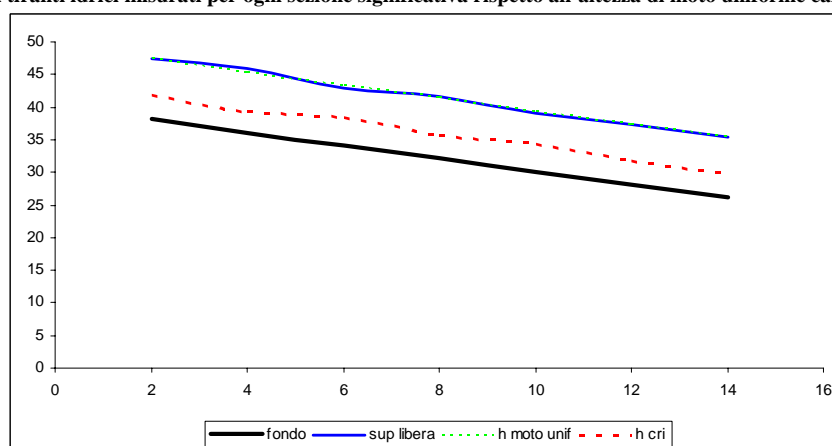
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
9.20	9.24	44	3.73

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.14	47.38	9.24	3.68	0.185	1.777	0.388	0.0250	0.444	0.0506	0.0643	0.601	0.757	0.0184
2	37.75	47.49	9.74	3.16	0.195	1.828	0.396	0.0269	0.457	0.0530	0.0680	0.557	0.570	0.0158
3	38.12	46.88	8.76	4.29	0.175	1.727	0.380	0.0231	0.432	0.0482	0.0608	0.649	0.700	0.0215
4	38.11	47.51	9.4	3.50	0.188	1.794	0.391	0.0256	0.448	0.0513	0.0655	0.586	0.611	0.0175
5	37.86	46.75	8.89	4.11	0.178	1.741	0.382	0.0236	0.435	0.0488	0.0618	0.635	0.680	0.0206
6	37.89	47.12	9.23	3.69	0.185	1.776	0.388	0.0249	0.444	0.0505	0.0642	0.602	0.633	0.0185
7	37.84	47.03	9.19	3.74	0.184	1.772	0.387	0.0248	0.443	0.0503	0.0639	0.606	0.638	0.0187

Tabella P. 23: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$. $i=1\%$. $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.23: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$. $i=1\%$. $Q=15$ l/s

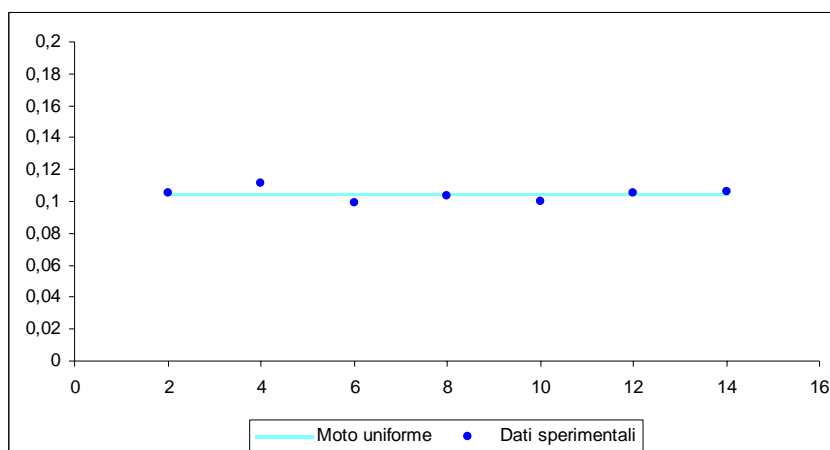
Prova 24 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 1.0\% \\ Q = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

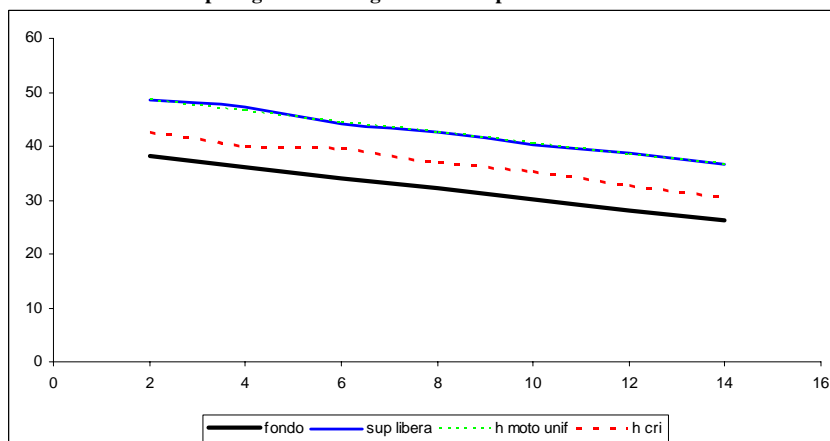
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
10.44	10.41	46	4.62

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.11	48.62	10.51	4.53	0.210	1.905	0.407	0.0300	0.476	0.0567	0.0737	0.666	0.784	0.0226
2	37.76	48.9	11.14	3.83	0.223	1.966	0.416	0.0326	0.492	0.0597	0.0784	0.613	0.587	0.0192
3	38.11	48.06	9.95	5.29	0.199	1.850	0.399	0.0278	0.462	0.0540	0.0695	0.721	0.729	0.0265
4	38.09	48.48	10.39	4.68	0.208	1.893	0.406	0.0295	0.473	0.0561	0.0728	0.677	0.671	0.0234
5	37.87	47.91	10.04	5.16	0.201	1.859	0.401	0.0281	0.465	0.0545	0.0702	0.711	0.717	0.0258
6	37.89	48.41	10.52	4.51	0.210	1.906	0.408	0.0301	0.477	0.0568	0.0737	0.665	0.655	0.0226
7	37.82	48.43	10.61	4.41	0.212	1.915	0.409	0.0304	0.479	0.0572	0.0744	0.657	0.644	0.0220

Tabella P. 24: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=1\%$. $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.24: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=1\%$. $Q=20$ l/s

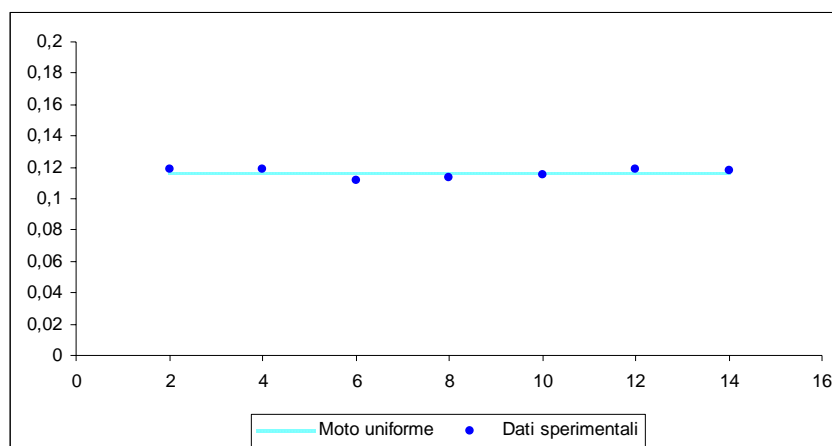
Prova 25 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 1.0\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

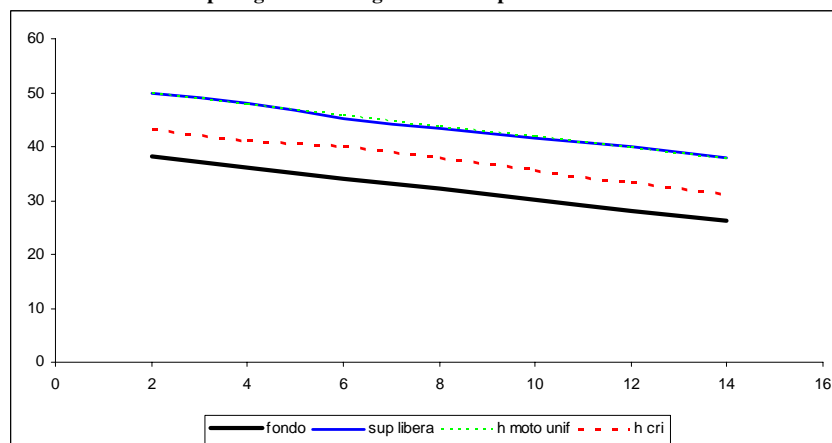
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
11.59	11.64	46	5.32

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.11	48.62	10.51	4.53	0.210	1.905	0.407	0.0300	0.476	0.0567	0.0737	0.666	0.784	0.0226
2	37.76	48.9	11.14	3.83	0.223	1.966	0.416	0.0326	0.492	0.0597	0.0784	0.613	0.587	0.0192
3	38.11	48.06	9.95	5.29	0.199	1.850	0.399	0.0278	0.462	0.0540	0.0695	0.721	0.729	0.0265
4	38.09	48.48	10.39	4.68	0.208	1.893	0.406	0.0295	0.473	0.0561	0.0728	0.677	0.671	0.0234
5	37.87	47.91	10.04	5.16	0.201	1.859	0.401	0.0281	0.465	0.0545	0.0702	0.711	0.717	0.0258
6	37.89	48.41	10.52	4.51	0.210	1.906	0.408	0.0301	0.477	0.0568	0.0737	0.665	0.655	0.0226
7	37.82	48.43	10.61	4.41	0.212	1.915	0.409	0.0304	0.479	0.0572	0.0744	0.657	0.644	0.0220

Tabella P. 25: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$. $i=1\%$. $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero, altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.25: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$. $i=1\%$. $Q=25$ l/s

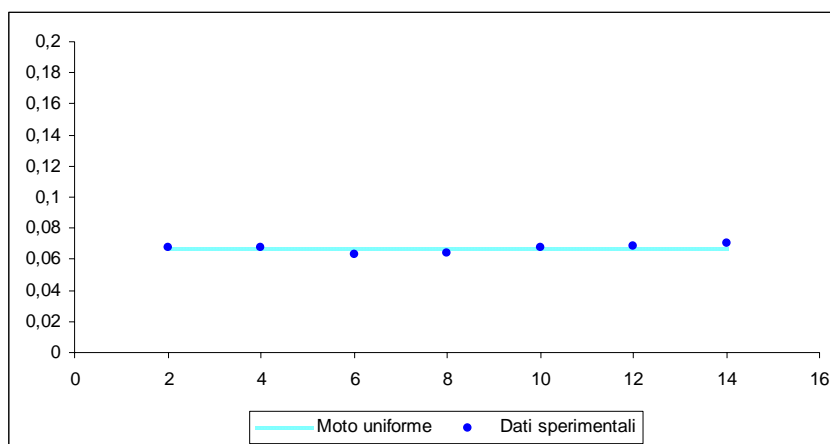
Prova 26 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 0.5\% \\ Q = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

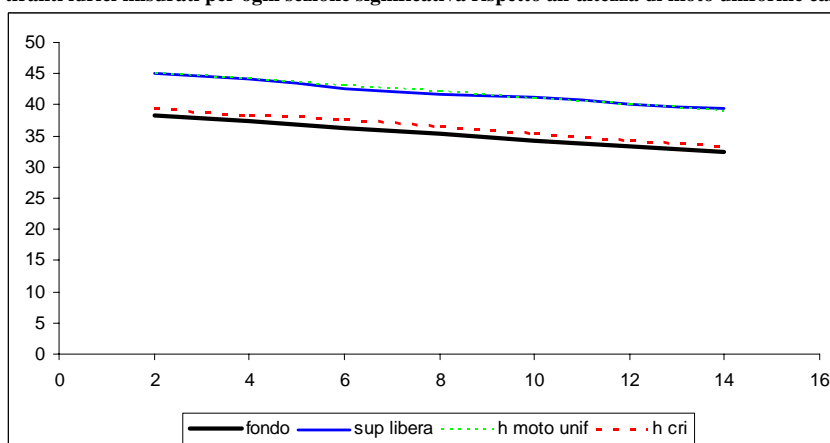
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.69	6.71	40	1.04

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.33	45.12	6.79	1.00	0.136	1.510	0.343	0.0160	0.377	0.0381	0.0467	0.313	0.462	0.0050
2	37.82	44.62	6.8	0.99	0.136	1.511	0.343	0.0160	0.378	0.0382	0.0467	0.312	0.382	0.0050
3	38.14	44.43	6.29	1.25	0.126	1.450	0.332	0.0143	0.363	0.0355	0.0431	0.350	0.445	0.0062
4	38.19	44.55	6.36	1.21	0.127	1.459	0.333	0.0145	0.365	0.0359	0.0436	0.344	0.436	0.0060
5	37.88	44.68	6.8	0.99	0.136	1.511	0.343	0.0160	0.378	0.0382	0.0467	0.312	0.382	0.0050
6	37.91	44.74	6.83	0.98	0.137	1.514	0.343	0.0161	0.379	0.0383	0.0469	0.310	0.379	0.0049
7	37.86	44.89	7.03	0.90	0.141	1.537	0.348	0.0168	0.384	0.0394	0.0484	0.297	0.358	0.0045

Tabella P. 26: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$, $i=0.5\%$, $Q=5$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.26: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$, $i=0.5\%$, $Q=5$ l/s

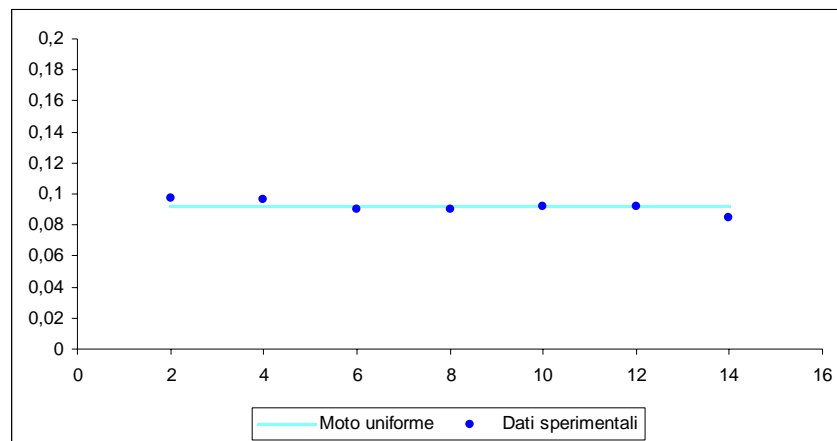
Prova 27 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 0.5\% \\ Q = 10 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

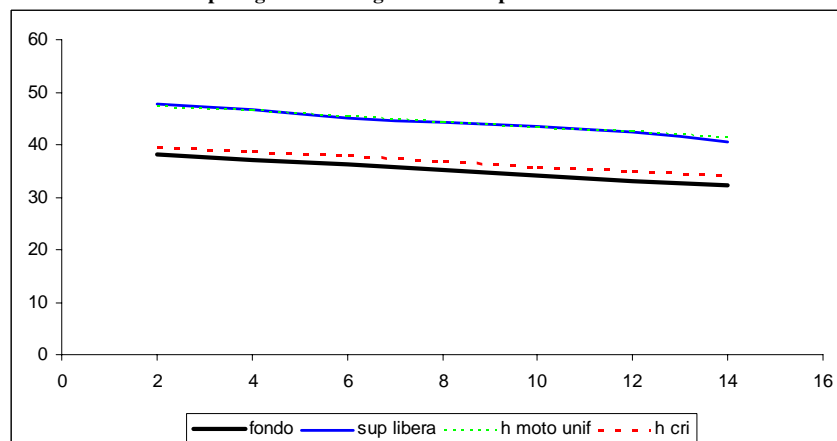
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
9.08	9.18	42	1.68

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.14	47.84	9.7	1.42	0.194	1.824	0.395	0.0268	0.456	0.0528	0.0677	0.374	0.459	0.0071
2	37.75	47.38	9.63	1.45	0.193	1.817	0.394	0.0265	0.454	0.0525	0.0672	0.378	0.388	0.0073
3	38.15	47.16	9.01	1.76	0.180	1.754	0.384	0.0241	0.438	0.0494	0.0626	0.415	0.442	0.0088
4	38.16	47.18	9.02	1.75	0.180	1.755	0.385	0.0241	0.439	0.0495	0.0627	0.415	0.441	0.0088
5	37.87	47.07	9.2	1.66	0.184	1.773	0.387	0.0248	0.443	0.0504	0.0640	0.403	0.424	0.0083
6	37.92	47.08	9.16	1.68	0.183	1.769	0.387	0.0247	0.442	0.0502	0.0637	0.406	0.428	0.0084
7	38.18	46.64	8.46	2.11	0.169	1.696	0.375	0.0220	0.424	0.0467	0.0586	0.455	0.499	0.0105

Tabella P. 27: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$, $i=0.5\%$, $Q=10$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.27: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$, $i=0.5\%$, $Q=10$ l/s

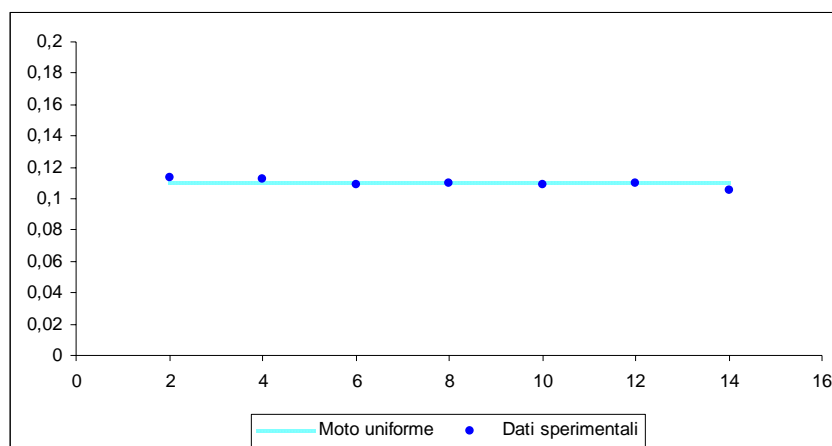
Prova 28 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 0.5\% \\ Q = 15 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

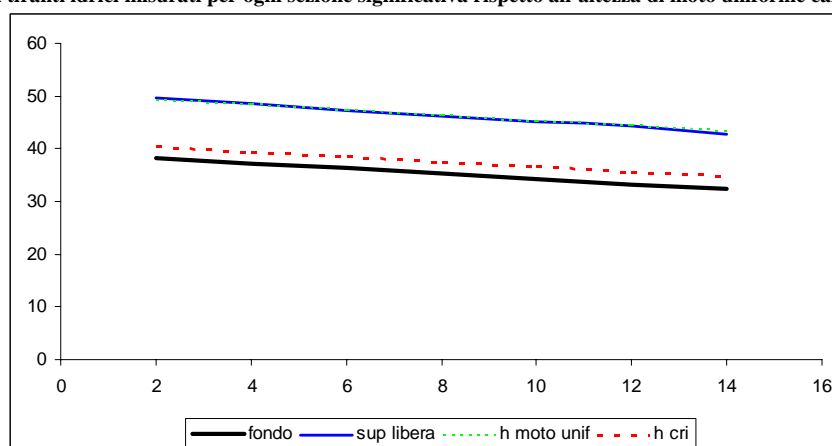
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
10.93	10.96	44	2.24

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.14	47.84	9.7	1.42	0.194	1.824	0.395	0.0268	0.456	0.0528	0.0677	0.374	0.459	0.0071
2	37.75	47.38	9.63	1.45	0.193	1.817	0.394	0.0265	0.454	0.0525	0.0672	0.378	0.388	0.0073
3	38.15	47.16	9.01	1.76	0.180	1.754	0.384	0.0241	0.438	0.0494	0.0626	0.415	0.442	0.0088
4	38.16	47.18	9.02	1.75	0.180	1.755	0.385	0.0241	0.439	0.0495	0.0627	0.415	0.441	0.0088
5	37.87	47.07	9.2	1.66	0.184	1.773	0.387	0.0248	0.443	0.0504	0.0640	0.403	0.424	0.0083
6	37.92	47.08	9.16	1.68	0.183	1.769	0.387	0.0247	0.442	0.0502	0.0637	0.406	0.428	0.0084
7	38.18	46.64	8.46	2.11	0.169	1.696	0.375	0.0220	0.424	0.0467	0.0586	0.455	0.499	0.0105

Tabella P. 28: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$, $i=0.5\%$, $Q=15$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.28: Caratteristiche idrauliche per $\epsilon=3$, $i=0.5\%$, $Q=15$ l/s

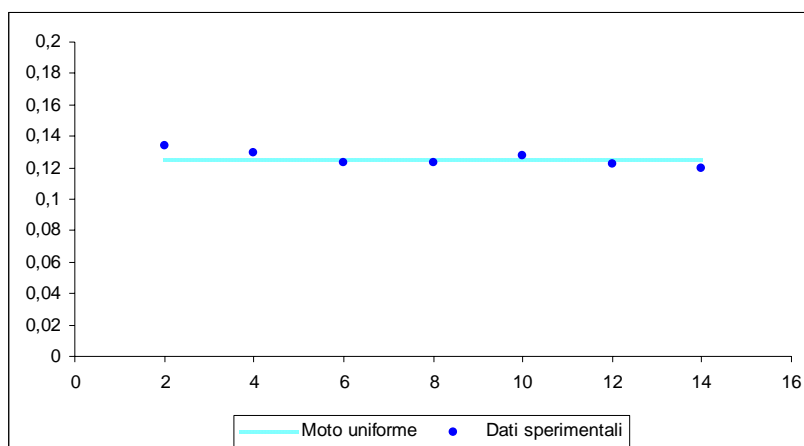
Prova 29 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 0.5\% \\ Q = 20 \frac{l}{s} \end{array} \right.$$

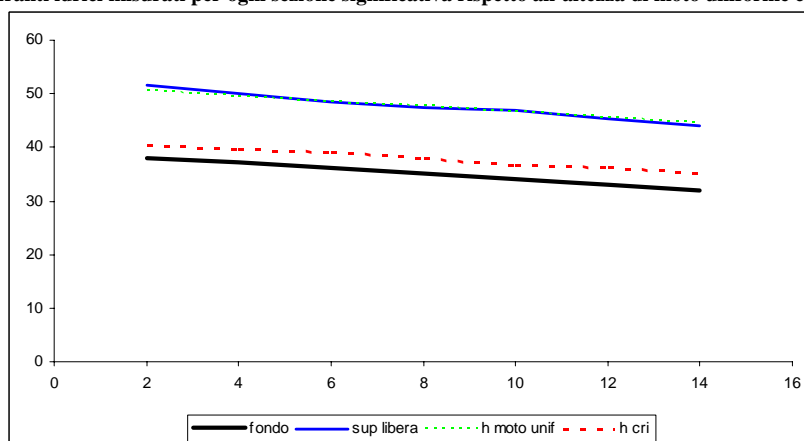
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
12.42	12.52	45	2.74

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.08	51.51	13.43	2.26	0.269	2.179	0.443	0.0425	0.545	0.0701	0.0958	0.471	0.486	0.0113
2	37.79	50.72	12.93	2.52	0.259	2.134	0.438	0.0403	0.533	0.0679	0.0919	0.497	0.441	0.0126
3	38.09	50.42	12.33	2.88	0.247	2.079	0.431	0.0377	0.520	0.0652	0.0874	0.531	0.483	0.0144
4	38.1	50.42	12.32	2.88	0.246	2.078	0.431	0.0376	0.519	0.0652	0.0873	0.532	0.484	0.0144
5	37.86	50.65	12.79	2.59	0.256	2.121	0.436	0.0396	0.530	0.0673	0.0909	0.504	0.450	0.0130
6	37.93	50.12	12.19	2.97	0.244	2.066	0.429	0.0370	0.516	0.0646	0.0863	0.540	0.494	0.0149
7	37.83	49.78	11.95	3.14	0.239	2.043	0.426	0.0360	0.511	0.0635	0.0845	0.555	0.513	0.0157

Tabella P. 29: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$, $i=0.5\%$, $Q=20$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

Figura P.29: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$, $i=0.5\%$, $Q=20$ l/s

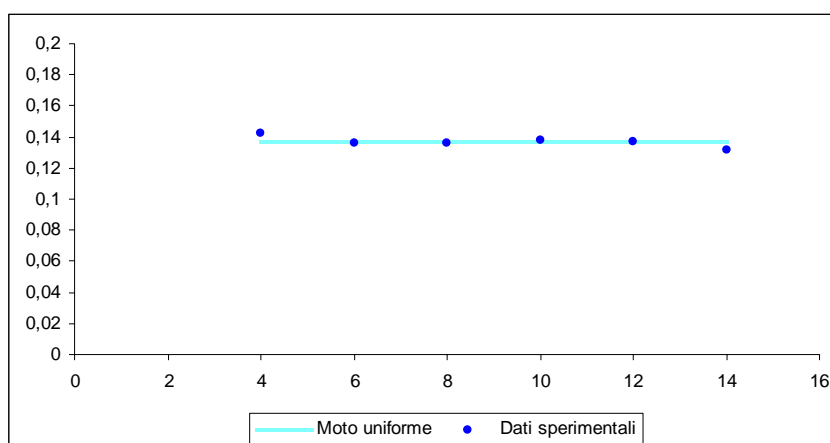
Prova 30 – $d_{50}=3$ – SEZIONE CIRCOLARE

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{50} = 3\text{mm} \\ i = 0.5\% \\ Q = 25 \frac{\text{l}}{\text{s}} \end{array} \right.$$

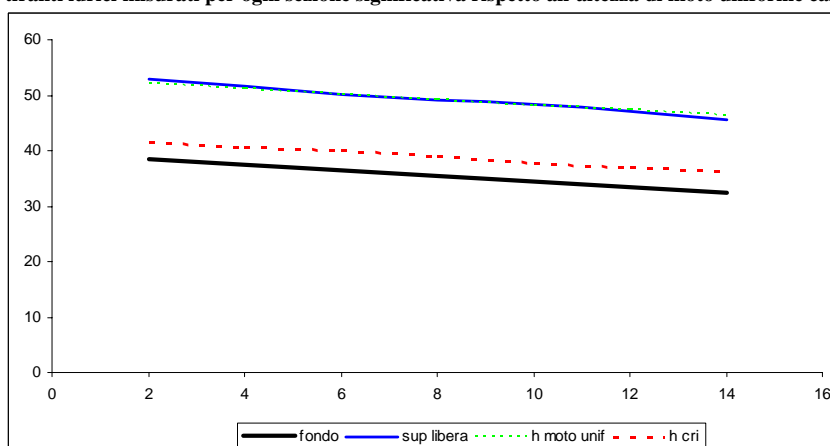
h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
13.68	13.71	47	3.31

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	h/D	β	B	A	P	R_{Hf}	h_m	u	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm		rad	m	m^2	m	m	m	m/s		
1	38.51	52.8	14.29	2.97	0.286	2.256	0.452	0.0463	0.564	0.0739	0.1025	0.540	0.538	0.0149
2	37.79	52.04	14.25	2.99	0.285	2.253	0.451	0.0461	0.563	0.0737	0.1022	0.542	0.458	0.0150
3	38.14	51.72	13.58	3.43	0.272	2.193	0.445	0.0431	0.548	0.0708	0.0970	0.580	0.502	0.0171
4	38.09	51.72	13.63	3.39	0.273	2.197	0.445	0.0434	0.549	0.0710	0.0974	0.577	0.499	0.0170
5	37.88	51.68	13.8	3.27	0.276	2.213	0.447	0.0441	0.553	0.0718	0.0987	0.567	0.487	0.0164
6	37.91	51.6	13.69	3.35	0.274	2.203	0.446	0.0436	0.551	0.0713	0.0978	0.573	0.495	0.0167
7	37.82	50.93	13.11	3.78	0.262	2.150	0.440	0.0410	0.538	0.0687	0.0933	0.609	0.537	0.0189

Tabella P. 30: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$; $i=0.5\%$; $Q=25$ l/s



Andamento dei tiranti idrici misurati per ogni sezione significativa rispetto all'altezza di moto uniforme calcolata.



Andamento di quote del fondo, del pelo libero altezza di moto uniforme e altezza critica lungo lo sviluppo del canale da monte verso valle.

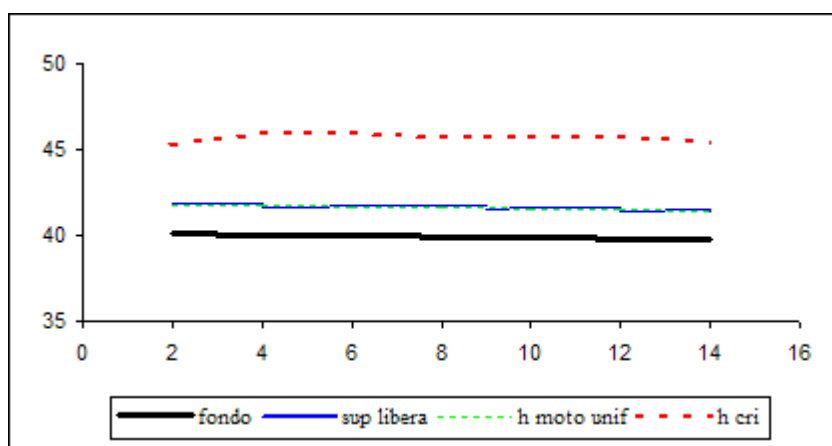
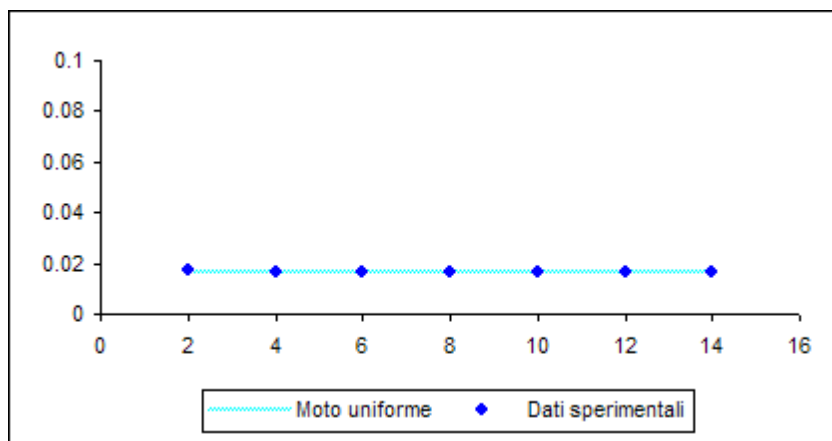
Figura P.30: Caratteristiche idrauliche per $\varepsilon=3$. $i=0.5\%$. $Q=25$ l/s

Prova 1 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	3.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
1.65	1.66	82	5.72

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.11	41.88	1.77	5.10	0.435	0.0130	1.698	0.0255
2	39.95	41.59	1.64	5.92	0.433	0.0121	1.900	0.0296
3	40.37	42.01	1.64	5.92	0.433	0.0121	1.900	0.0296
4	40.24	41.90	1.66	5.78	0.433	0.0123	1.866	0.0289
5	40.14	41.79	1.65	5.85	0.433	0.0122	1.883	0.0293
6	40.07	41.72	1.65	5.85	0.433	0.0122	1.883	0.0293
7	40.00	41.68	1.68	5.64	0.434	0.0124	1.833	0.0282

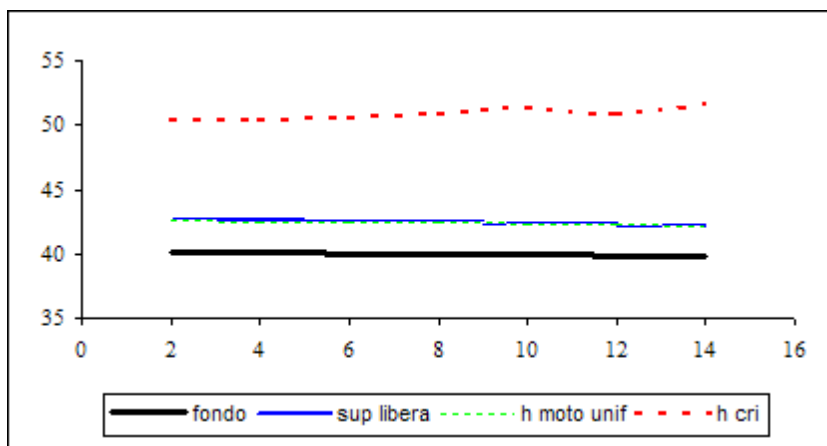
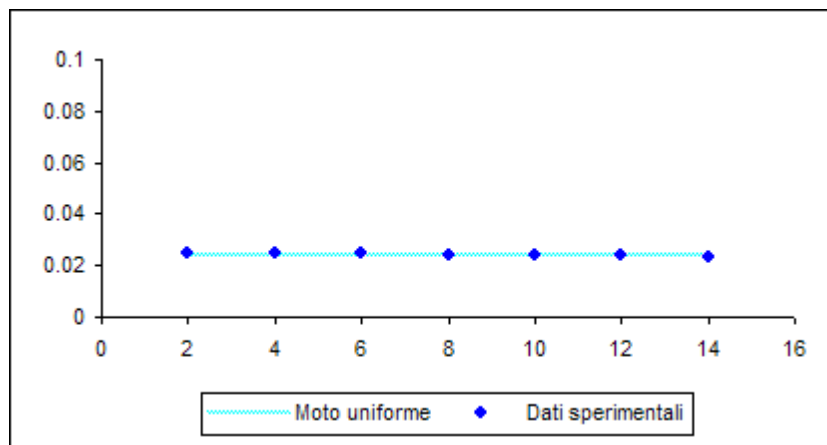


Prova 2 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	3.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
2.41	2.41	90	10.85

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.14	42.63	2.49	10.27	0.450	0.0177	2.031	0.0514
2	39.89	42.39	2.50	10.19	0.450	0.0178	2.019	0.0510
3	40.36	42.82	2.46	10.53	0.449	0.0175	2.069	0.0526
4	40.22	42.64	2.42	10.88	0.448	0.0173	2.120	0.0544
5	40.15	42.52	2.37	11.34	0.447	0.0170	2.188	0.0567
6	40.08	42.49	2.41	10.97	0.448	0.0172	2.133	0.0548
7	40.00	42.32	2.32	11.84	0.446	0.0166	2.259	0.0592

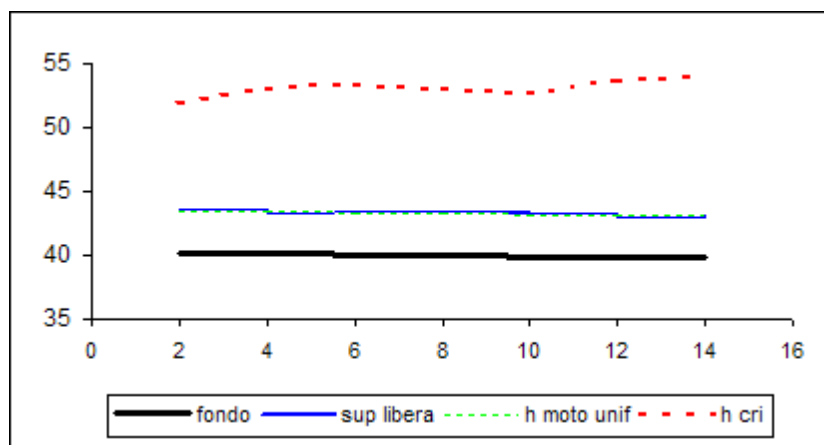
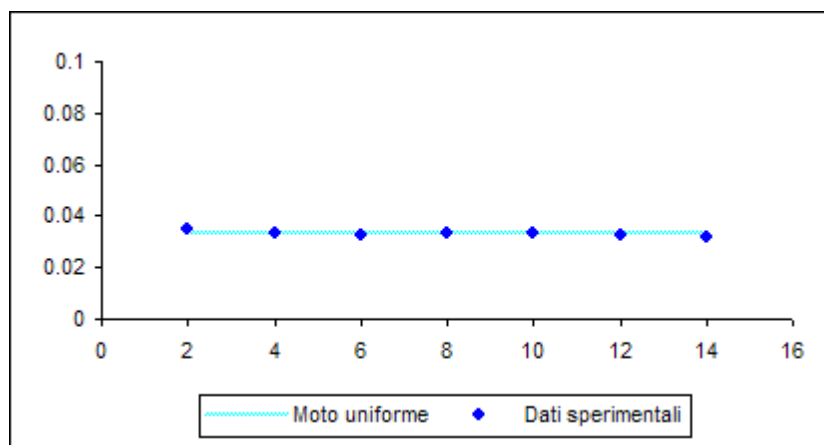


Prova 3 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	3.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.28	3.30	82	13.10

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.14	43.63	3.49	11.77	0.470	0.0238	1.836	0.0588
2	39.87	43.21	3.34	12.85	0.467	0.0229	1.961	0.0642
3	40.34	43.62	3.28	13.32	0.466	0.0225	2.015	0.0666
4	40.14	43.45	3.31	13.08	0.466	0.0227	1.988	0.0654
5	40.14	43.49	3.35	12.77	0.467	0.0230	1.953	0.0639
6	40.07	43.29	3.22	13.82	0.464	0.0222	2.072	0.0691
7	40.00	43.18	3.18	14.17	0.464	0.0219	2.111	0.0709

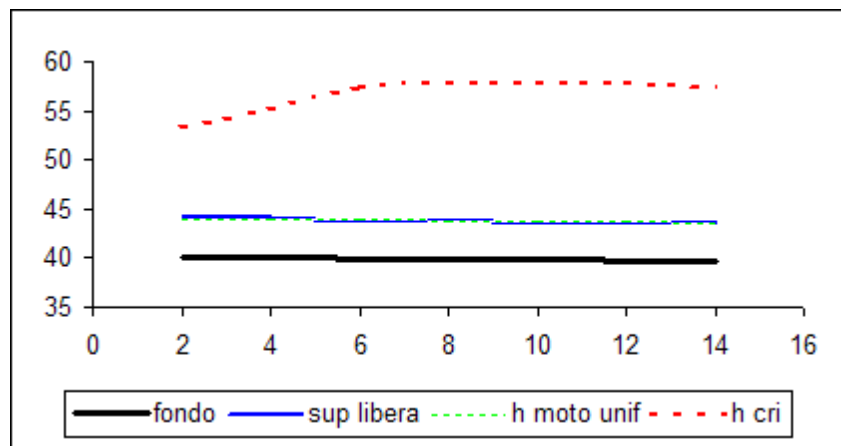
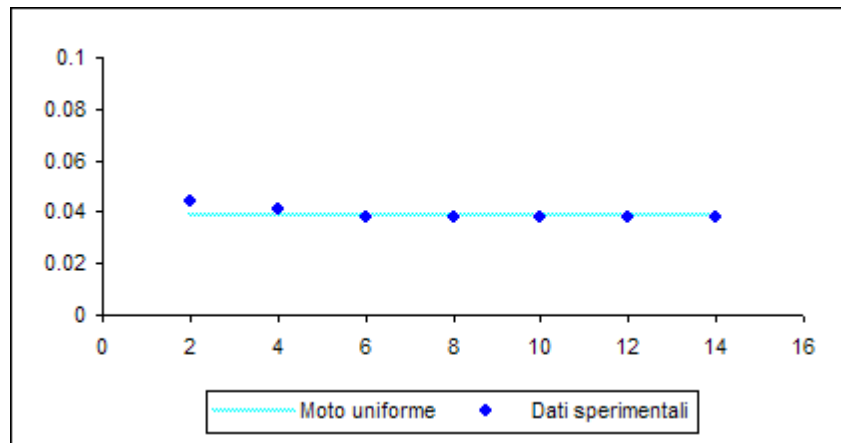


Prova 4 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	3.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.84	3.90	84	16.73

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.07	44.45	4.38	13.28	0.488	0.0287	1.741	0.0664
2	39.82	43.92	4.10	15.16	0.482	0.0272	1.923	0.0758
3	40.39	44.22	3.83	17.37	0.477	0.0257	2.130	0.0868
4	40.18	43.95	3.77	17.93	0.475	0.0254	2.181	0.0896
5	40.10	43.86	3.76	18.02	0.475	0.0253	2.189	0.0901
6	40.01	43.78	3.77	17.93	0.475	0.0254	2.181	0.0896
7	39.99	43.78	3.79	17.74	0.476	0.0255	2.163	0.0887

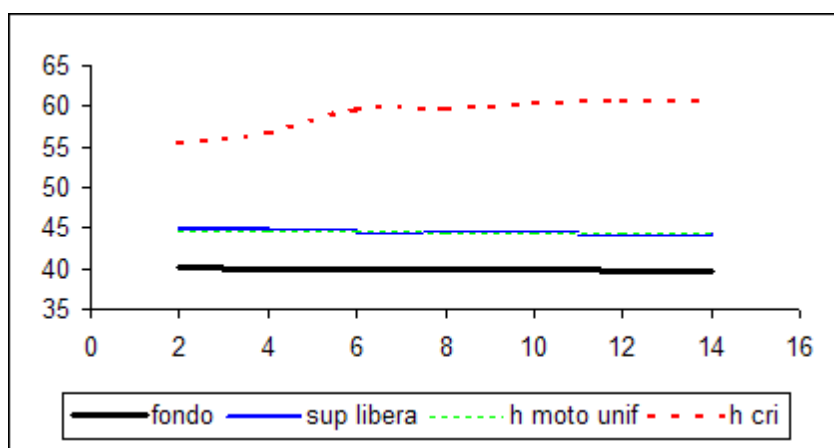
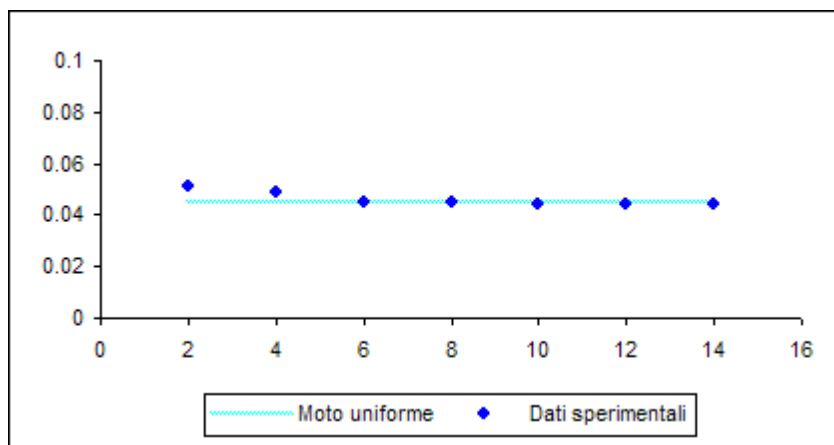


Prova 5 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	3.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.51	4.51	84	18.98

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	45.19	5.10	15.31	0.502	0.0325	1.733	0.0765
2	39.83	44.71	4.88	16.72	0.498	0.0314	1.851	0.0836
3	40.31	44.82	4.51	19.58	0.490	0.0294	2.083	0.0979
4	40.11	44.61	4.50	19.66	0.490	0.0294	2.090	0.0983
5	40.09	44.49	4.40	20.57	0.488	0.0289	2.162	0.1028
6	40.05	44.44	4.39	20.66	0.488	0.0288	2.169	0.1033
7	39.95	44.33	4.38	20.76	0.488	0.0287	2.177	0.1038

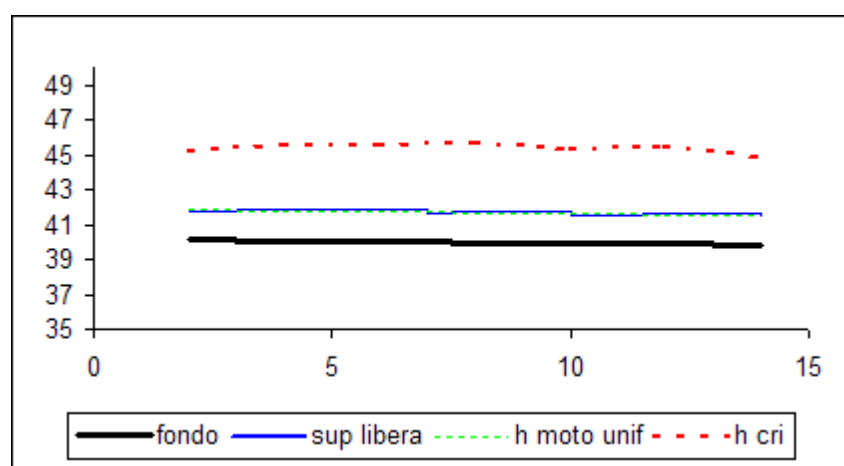
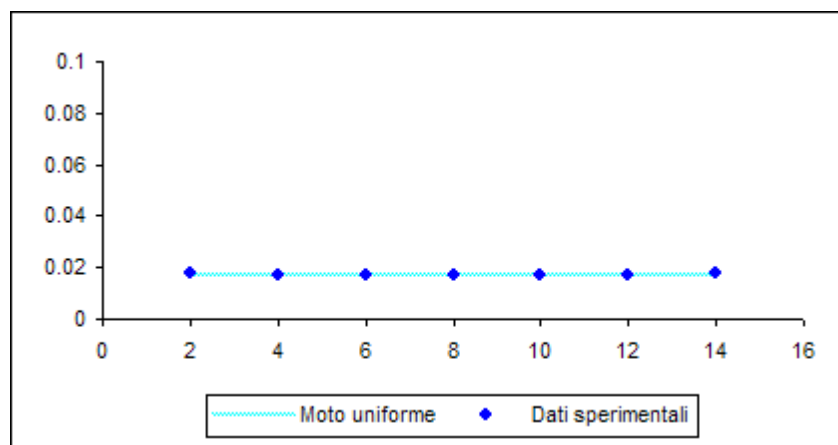


Prova 6 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	2.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
1.71	1.70	86	5.41

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.12	41.89	1.77	5.08	0.435	0.0130	1.694	0.0254
2	39.88	41.59	1.71	5.44	0.434	0.0126	1.784	0.0272
3	40.37	42.06	1.69	5.57	0.434	0.0125	1.816	0.0279
4	40.25	41.92	1.67	5.70	0.433	0.0123	1.848	0.0285
5	40.14	41.85	1.71	5.44	0.434	0.0126	1.784	0.0272
6	40.06	41.75	1.69	5.57	0.434	0.0125	1.816	0.0279
7	40.00	41.77	1.77	5.08	0.435	0.0130	1.694	0.0254

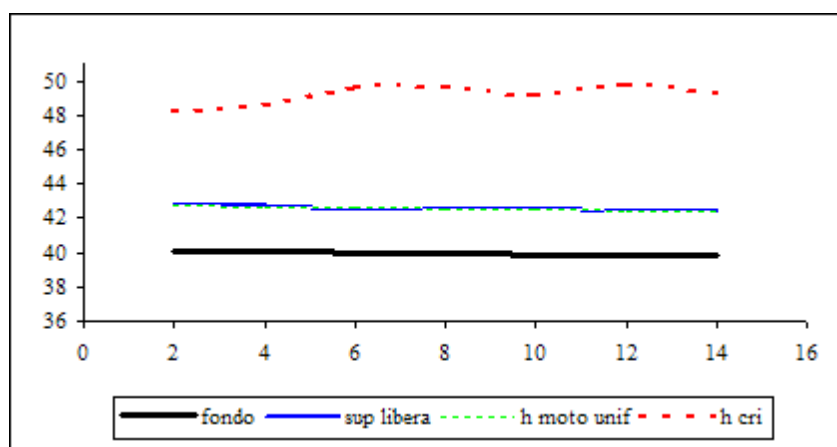
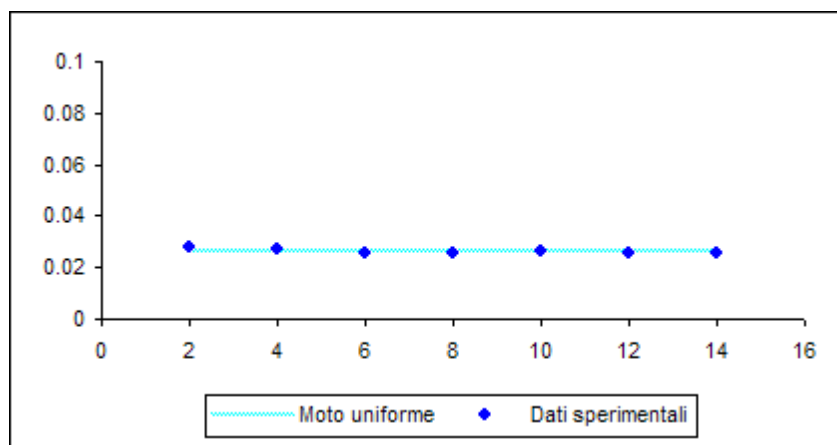


Prova 7 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	2.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
2.60	2.60	87	9.22

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	42.89	2.80	8.13	0.456	0.0196	1.703	0.0406
2	39.89	42.62	2.73	8.55	0.455	0.0192	1.769	0.0427
3	40.34	42.91	2.57	9.64	0.451	0.0182	1.937	0.0482
4	40.22	42.78	2.56	9.72	0.451	0.0182	1.949	0.0486
5	40.14	42.77	2.63	9.21	0.453	0.0186	1.871	0.0460
6	40.05	42.59	2.54	9.87	0.451	0.0180	1.972	0.0494
7	40.00	42.59	2.59	9.50	0.452	0.0183	1.915	0.0475

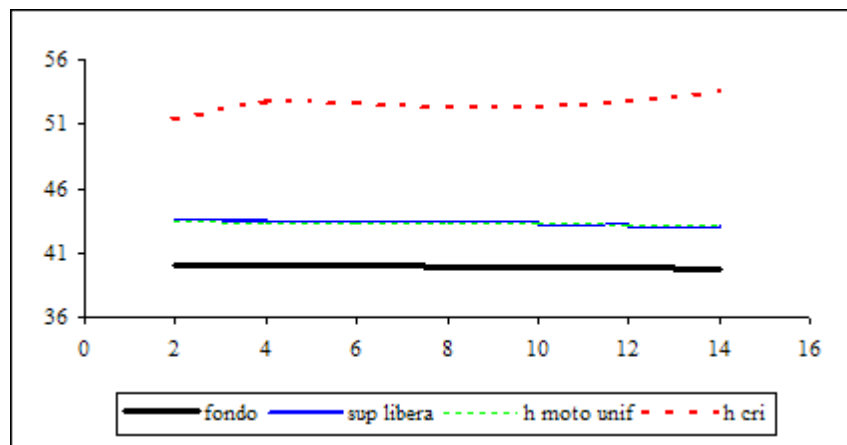
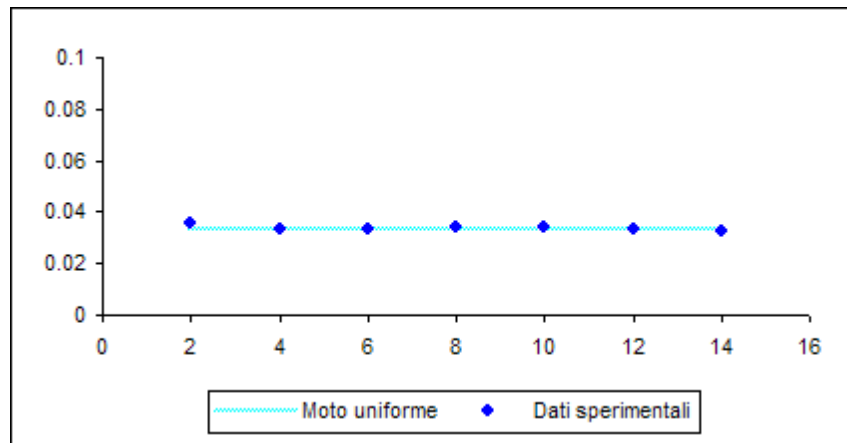


Prova 8 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	2.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.34	3.34	88	12.60

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.07	43.64	3.57	11.25	0.471	0.0242	1.775	0.0562
2	39.87	43.22	3.35	12.77	0.467	0.0230	1.953	0.0639
3	40.32	43.68	3.36	12.70	0.467	0.0230	1.944	0.0635
4	40.19	43.59	3.40	12.40	0.468	0.0232	1.910	0.0620
5	40.09	43.48	3.39	12.47	0.468	0.0232	1.918	0.0624
6	40.05	43.38	3.33	12.93	0.467	0.0228	1.970	0.0646
7	39.96	43.19	3.23	13.74	0.465	0.0222	2.062	0.0687

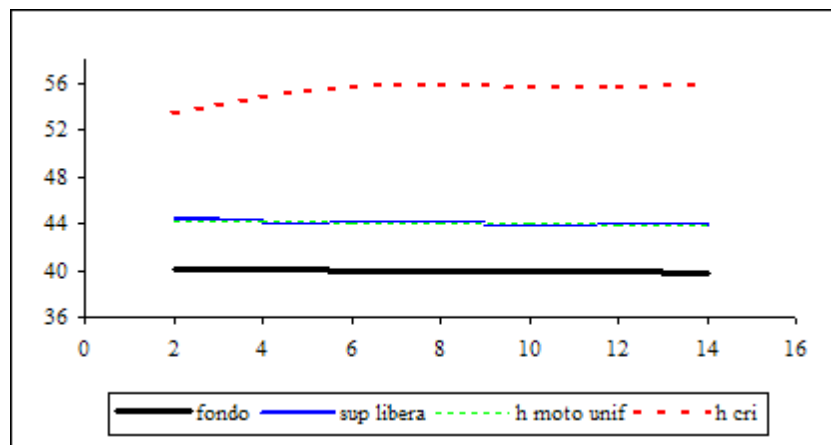
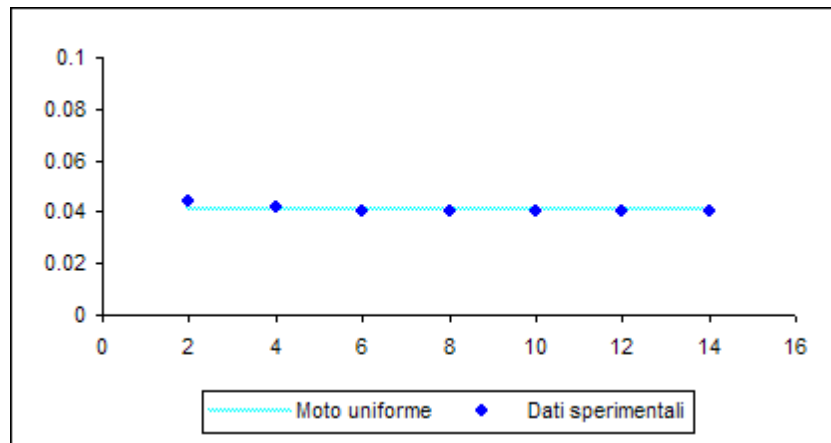


Prova 9 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	2.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.09	4.08	86	15.29

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	44.47	4.38	13.28	0.488	0.0287	1.741	0.0664
2	39.89	44.06	4.17	14.66	0.483	0.0276	1.875	0.0733
3	40.32	44.35	4.03	15.69	0.481	0.0268	1.973	0.0785
4	40.14	44.14	4.00	15.93	0.480	0.0267	1.995	0.0796
5	40.09	44.11	4.02	15.77	0.480	0.0268	1.981	0.0788
6	40.05	44.06	4.01	15.85	0.480	0.0267	1.988	0.0792
7	39.90	43.90	4.00	15.93	0.480	0.0267	1.995	0.0796

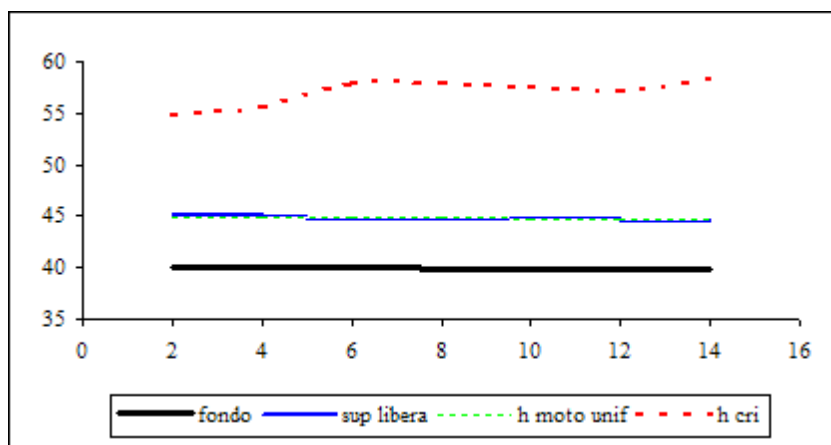
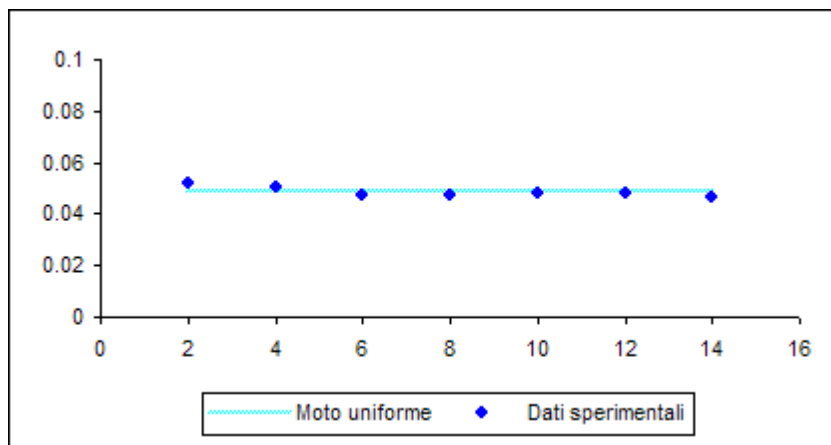


Prova 10 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	2.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.85	4.86	82	17.00

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	45.31	5.22	14.61	0.504	0.0331	1.673	0.0731
2	39.89	44.95	5.06	15.55	0.501	0.0323	1.753	0.0778
3	40.35	45.07	4.72	17.87	0.494	0.0306	1.946	0.0894
4	40.21	44.92	4.71	17.95	0.494	0.0305	1.952	0.0897
5	40.12	44.89	4.77	17.50	0.495	0.0308	1.915	0.0875
6	40.07	44.88	4.81	17.21	0.496	0.0310	1.892	0.0861
7	40.00	44.64	4.64	18.49	0.493	0.0301	1.996	0.0925

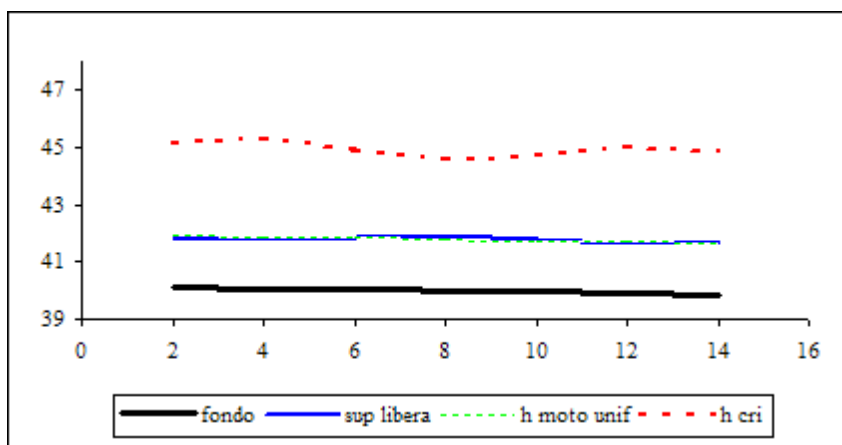
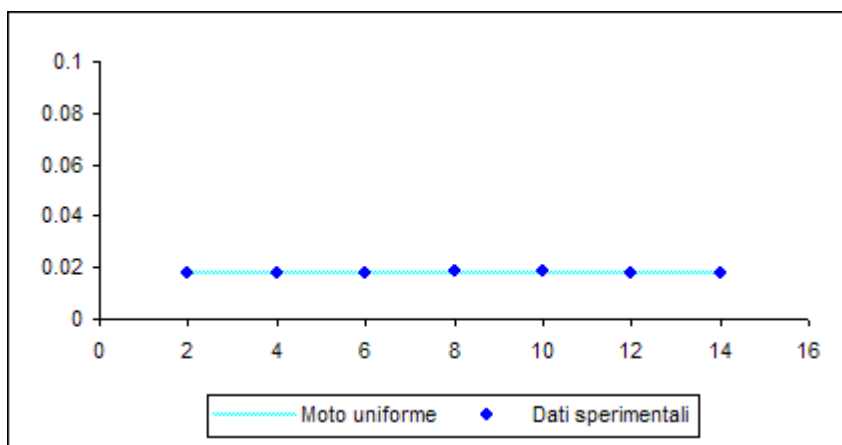


Prova 11 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	2.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
1.80	1.80	88	4.93

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.11	41.89	1.78	5.03	0.436	0.0131	1.680	0.0251
2	39.89	41.64	1.75	5.20	0.435	0.0129	1.724	0.0260
3	40.34	42.14	1.80	4.91	0.436	0.0132	1.652	0.0246
4	40.21	42.07	1.86	4.60	0.437	0.0136	1.573	0.0230
5	40.13	41.96	1.83	4.76	0.437	0.0134	1.612	0.0238
6	40.05	41.82	1.77	5.08	0.435	0.0130	1.695	0.0254
7	40.00	41.79	1.79	4.97	0.436	0.0131	1.666	0.0248

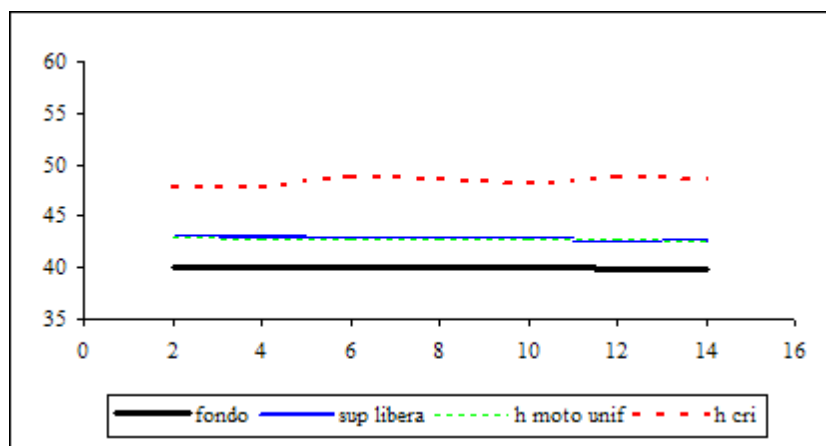
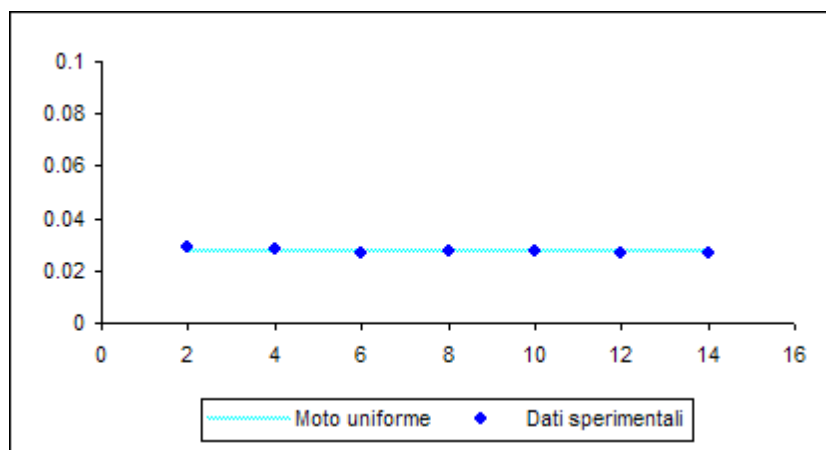


Prova 12 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	2.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
2.76	2.75	89	8.38

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.12	42.99	2.87	7.73	0.457	0.0201	1.641	0.0386
2	39.89	42.75	2.86	7.78	0.457	0.0200	1.650	0.0389
3	40.35	43.05	2.70	8.73	0.454	0.0190	1.798	0.0437
4	40.22	42.94	2.72	8.60	0.454	0.0192	1.778	0.0430
5	40.15	42.92	2.77	8.30	0.455	0.0195	1.731	0.0415
6	40.07	42.75	2.68	8.86	0.454	0.0189	1.818	0.0443
7	40.04	42.74	2.70	8.73	0.454	0.0190	1.798	0.0437

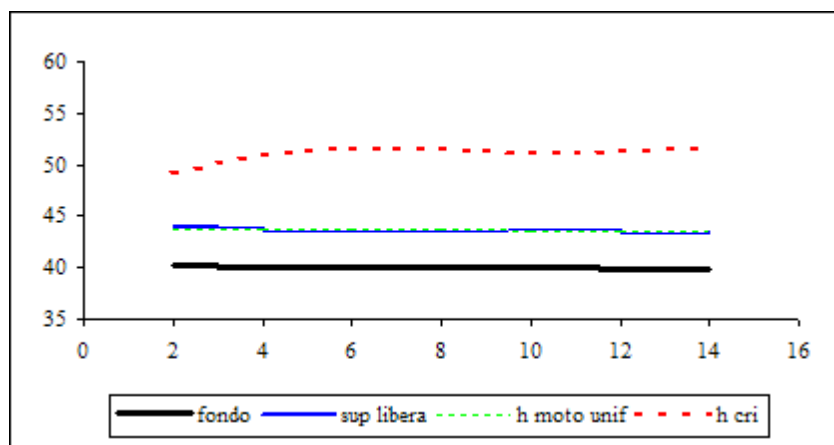
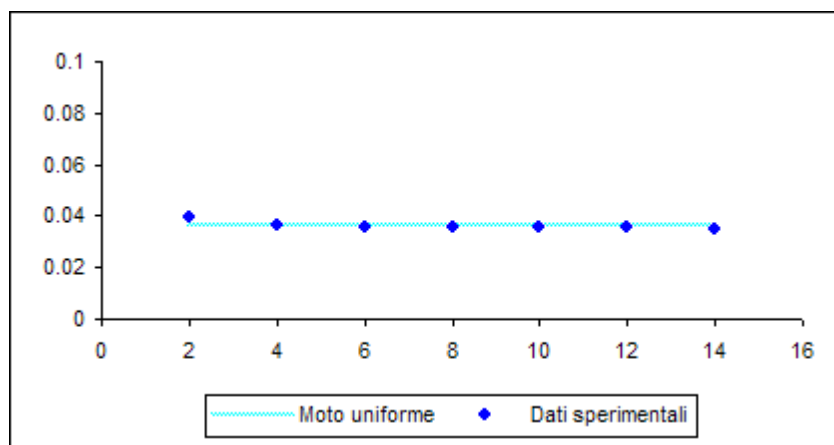


Prova 13 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	2.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.62	3.61	87	10.95

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.14	44.12	3.98	9.05	0.480	0.0266	1.508	0.0452
2	39.91	43.57	3.66	10.70	0.473	0.0248	1.710	0.0535
3	40.37	43.90	3.53	11.50	0.471	0.0240	1.805	0.0575
4	40.22	43.76	3.54	11.44	0.471	0.0241	1.797	0.0572
5	40.14	43.72	3.58	11.18	0.472	0.0243	1.767	0.0559
6	40.07	43.64	3.57	11.24	0.471	0.0242	1.775	0.0562
7	40.00	43.51	3.51	11.63	0.470	0.0239	1.820	0.0582

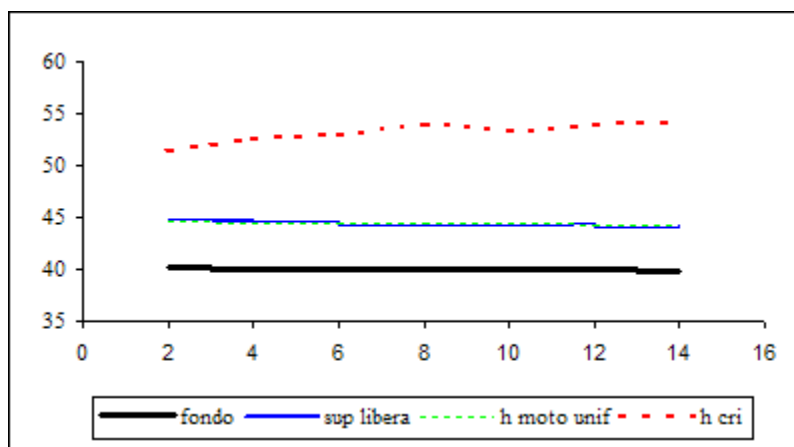
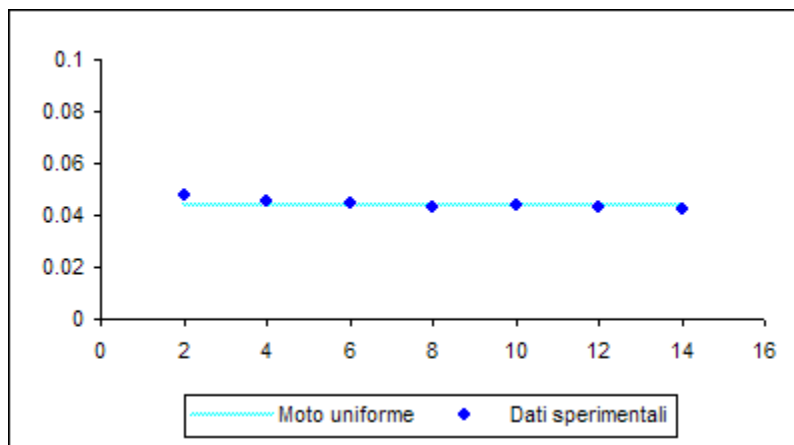


Prova 14 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	2.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
<i>cm</i>	<i>cm</i>	$m^{1/3} s^{-1}$	<i>cm</i>
4.42	4.41	85	13.10

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>m</i>	<i>m</i>		
1	40.11	44.89	4.78	11.15	0.496	0.0309	1.527	0.0557
2	39.88	44.40	4.52	12.47	0.490	0.0295	1.661	0.0623
3	40.35	44.79	4.44	12.92	0.489	0.0291	1.706	0.0646
4	40.22	44.50	4.28	13.90	0.486	0.0282	1.802	0.0695
5	40.15	44.52	4.37	13.34	0.487	0.0287	1.747	0.0667
6	40.05	44.32	4.27	13.97	0.485	0.0281	1.809	0.0698
7	40.00	44.25	4.25	14.10	0.485	0.0280	1.822	0.0705

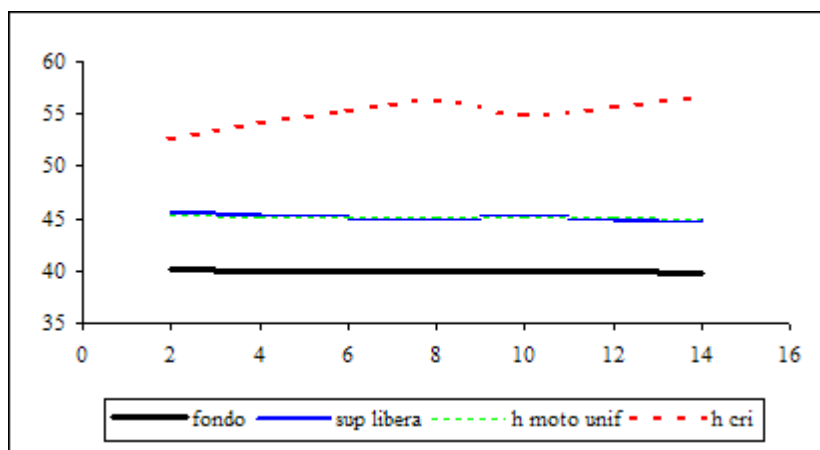
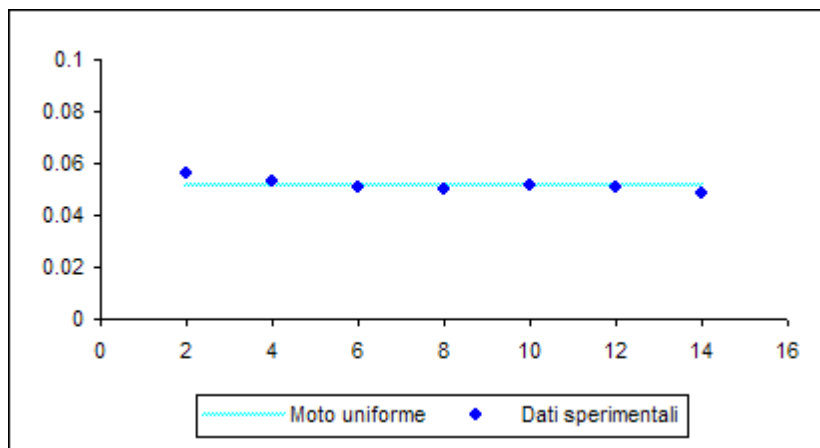


Prova 15 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	2.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.16	5.14	84	15.02

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	45.72	5.63	12.56	0.513	0.0351	1.494	0.0628
2	39.88	45.22	5.34	13.96	0.507	0.0337	1.617	0.0698
3	40.32	45.42	5.10	15.31	0.502	0.0325	1.733	0.0765
4	40.19	45.16	4.97	16.12	0.499	0.0318	1.801	0.0806
5	40.09	45.26	5.17	14.90	0.503	0.0329	1.697	0.0745
6	40.04	45.08	5.04	15.68	0.501	0.0322	1.764	0.0784
7	39.98	44.85	4.87	16.79	0.497	0.0313	1.857	0.0839

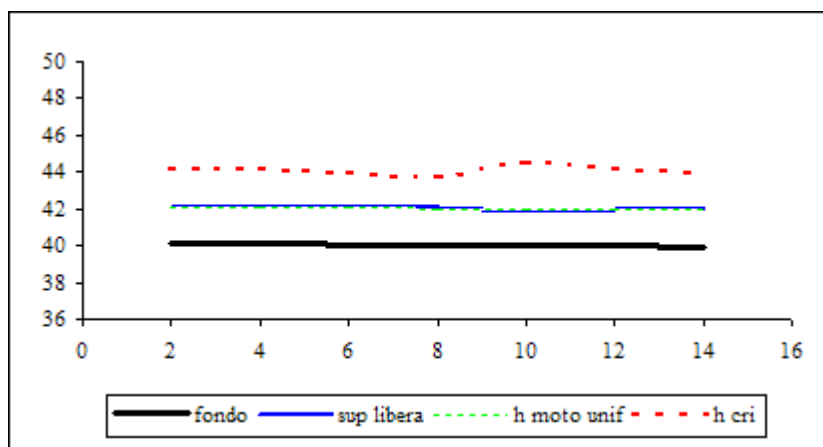
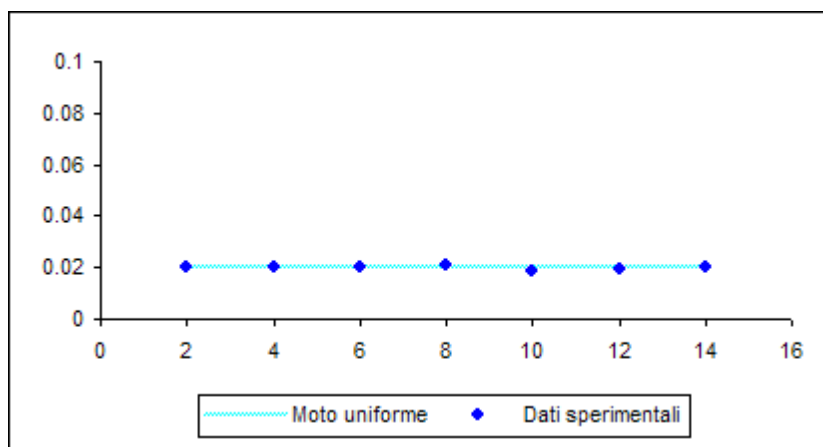


Prova 16 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	1.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
1.99	1.99	86	4.03

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.12	42.12	2.00	3.97	0.440	0.0145	1.409	0.0199
2	39.91	41.89	1.98	4.05	0.440	0.0144	1.431	0.0203
3	40.35	42.39	2.04	3.82	0.441	0.0148	1.368	0.0191
4	40.22	42.29	2.07	3.71	0.441	0.0150	1.338	0.0185
5	40.14	42.02	1.88	4.49	0.438	0.0137	1.546	0.0225
6	40.06	42.01	1.95	4.18	0.439	0.0142	1.464	0.0209
7	40.00	41.99	1.99	4.01	0.440	0.0145	1.420	0.0201

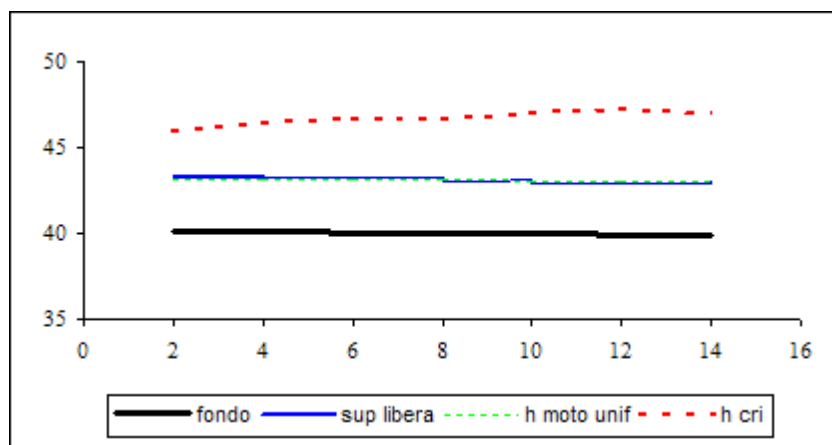
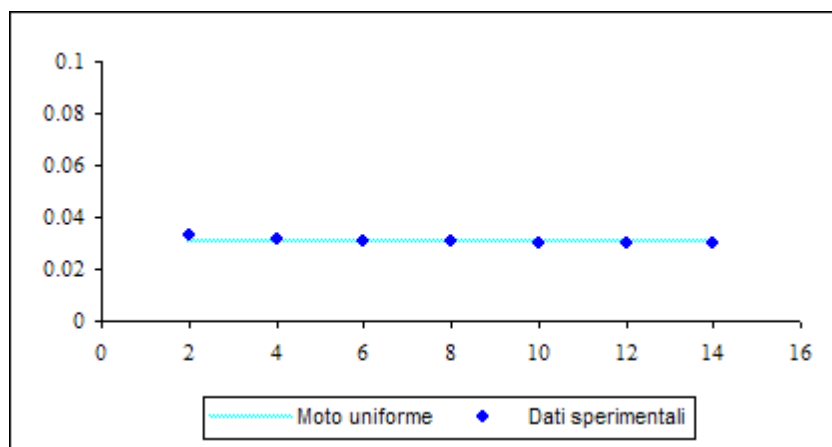


Prova 17 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	1.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.09	3.08	86	6.67

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	43.38	3.29	5.89	0.466	0.0226	1.338	0.0294
2	39.89	43.06	3.17	6.34	0.463	0.0219	1.414	0.0317
3	40.36	43.47	3.11	6.59	0.462	0.0215	1.455	0.0329
4	40.20	43.29	3.09	6.67	0.462	0.0214	1.469	0.0334
5	40.12	43.13	3.01	7.03	0.460	0.0209	1.528	0.0352
6	40.05	43.02	2.97	7.22	0.459	0.0207	1.559	0.0361
7	40.00	43.01	3.01	7.03	0.460	0.0209	1.528	0.0352

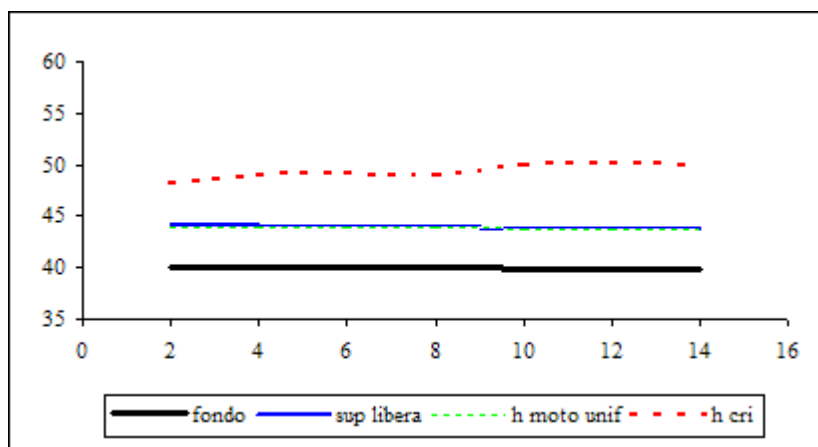
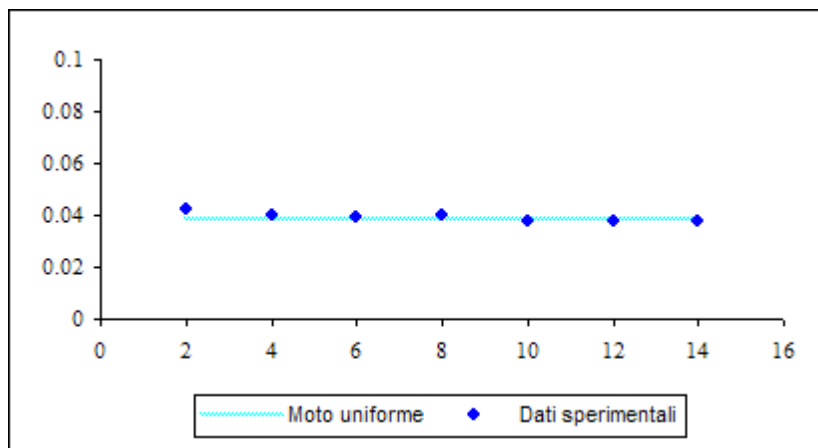


Prova 18 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	1.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.88	3.88	90	9.33

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.06	44.27	4.21	8.09	0.484	0.0278	1.386	0.0404
2	39.86	43.85	3.99	9.00	0.480	0.0266	1.502	0.0450
3	40.29	44.25	3.96	9.14	0.479	0.0264	1.519	0.0457
4	40.19	44.20	4.01	8.91	0.480	0.0267	1.491	0.0446
5	40.11	43.90	3.79	9.98	0.476	0.0255	1.622	0.0499
6	40.06	43.82	3.76	10.14	0.475	0.0253	1.642	0.0507
7	39.96	43.72	3.76	10.14	0.475	0.0253	1.642	0.0507

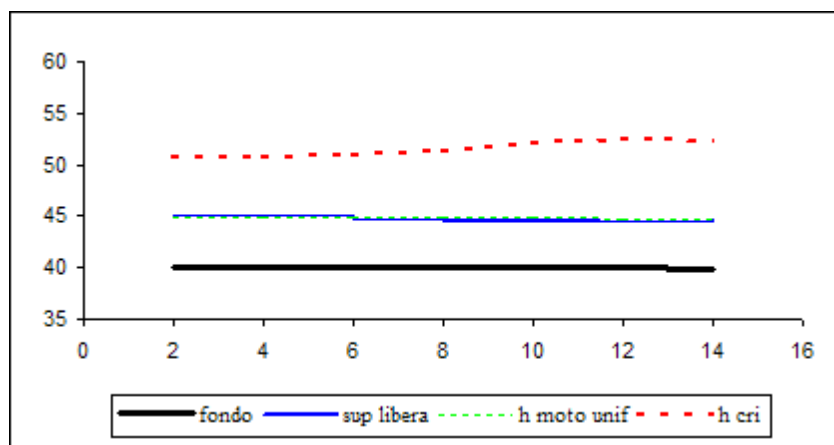
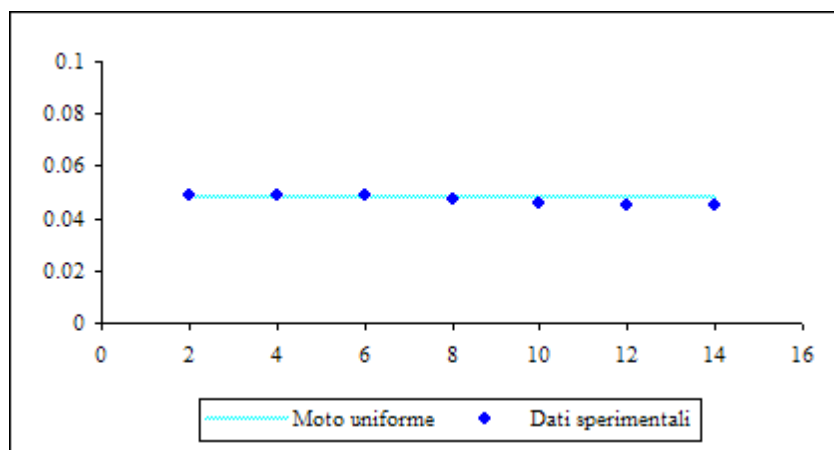


Prova 19 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	1.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.70	4.81	86	11.43

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.10	45.01	4.91	10.57	0.498	0.0315	1.467	0.0529
2	39.87	44.77	4.90	10.61	0.498	0.0315	1.472	0.0531
3	40.33	45.19	4.86	10.79	0.497	0.0313	1.490	0.0539
4	40.16	44.90	4.74	11.34	0.495	0.0307	1.547	0.0567
5	40.08	44.69	4.61	11.99	0.492	0.0300	1.613	0.0600
6	40.02	44.55	4.53	12.42	0.491	0.0295	1.656	0.0621
7	39.98	44.52	4.54	12.36	0.491	0.0296	1.650	0.0618

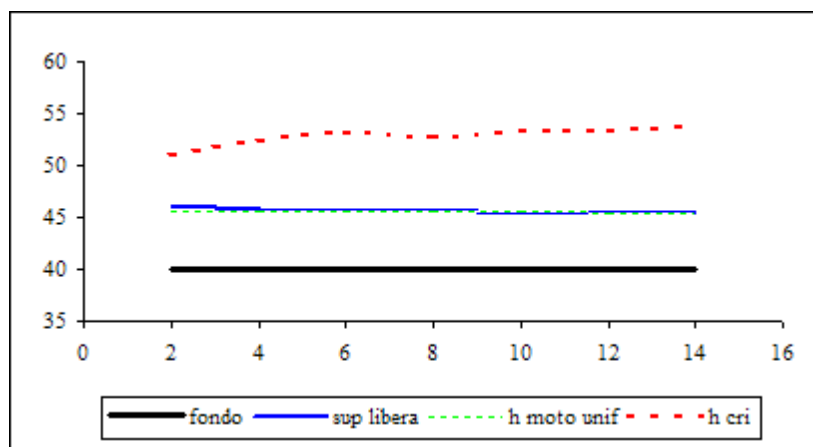
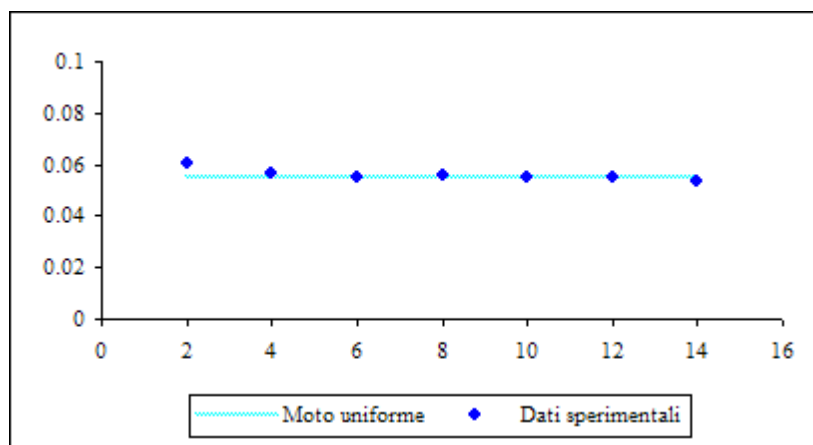


Prova 20 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	1.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.52	5.52	87	12.74

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	46.14	6.05	10.88	0.521	0.0372	1.341	0.0544
2	39.86	45.55	5.69	12.30	0.514	0.0354	1.470	0.0615
3	40.32	45.84	5.52	13.07	0.510	0.0346	1.539	0.0653
4	40.18	45.78	5.60	12.70	0.512	0.0350	1.506	0.0635
5	40.09	45.57	5.48	13.26	0.510	0.0344	1.555	0.0663
6	40.04	45.51	5.47	13.31	0.509	0.0344	1.560	0.0665
7	39.99	45.37	5.38	13.76	0.508	0.0339	1.599	0.0688

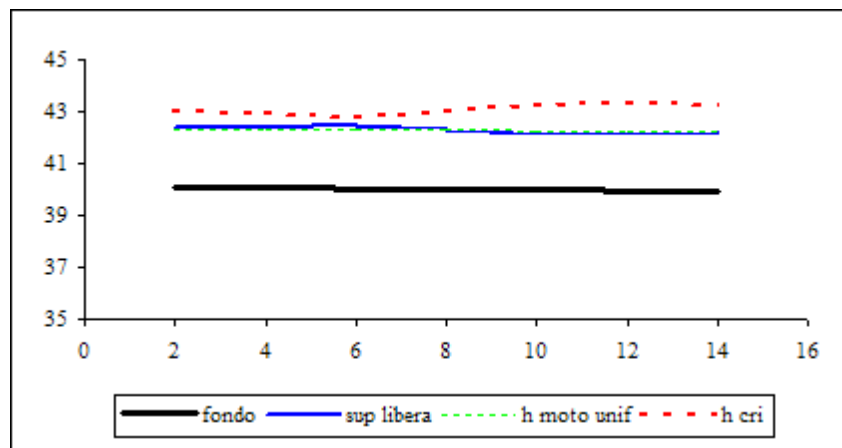
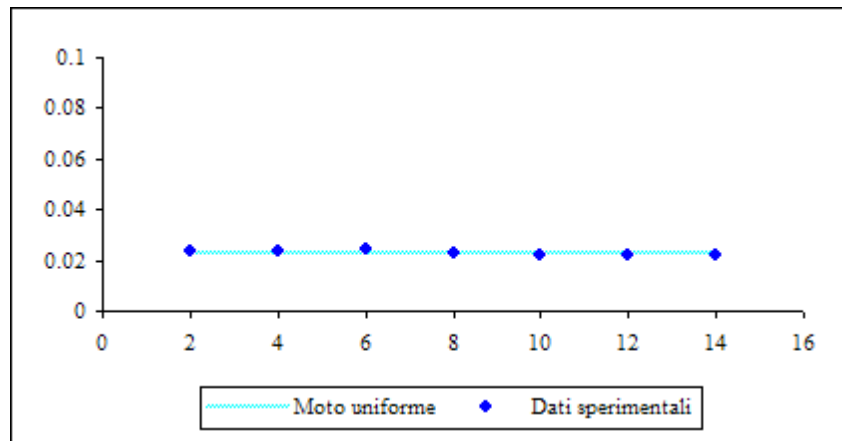


Prova 21 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	1.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
2.29	2.28	85	3.05

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.06	42.39	2.33	2.93	0.447	0.0167	1.122	0.0147
2	39.87	42.22	2.35	2.88	0.447	0.0168	1.108	0.0144
3	40.31	42.72	2.41	2.74	0.448	0.0172	1.067	0.0137
4	40.19	42.50	2.31	2.98	0.446	0.0166	1.137	0.0149
5	40.11	42.32	2.21	3.26	0.444	0.0159	1.215	0.0163
6	40.03	42.22	2.19	3.32	0.444	0.0158	1.231	0.0166
7	39.98	42.19	2.21	3.26	0.444	0.0159	1.215	0.0163

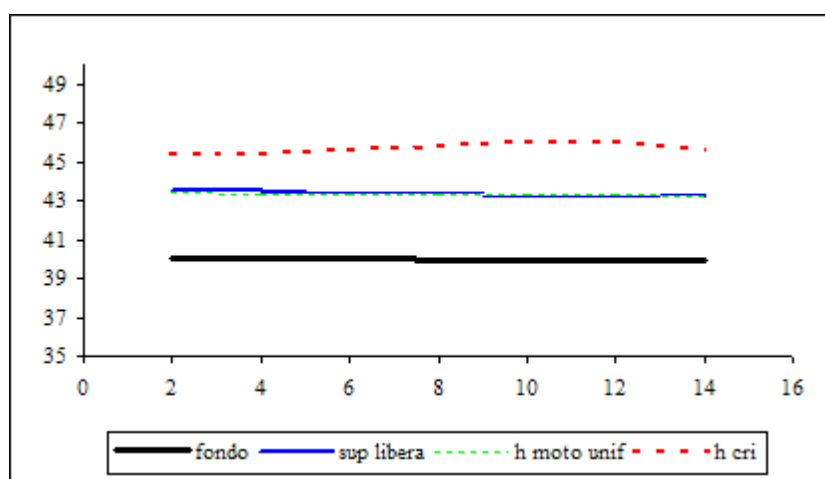
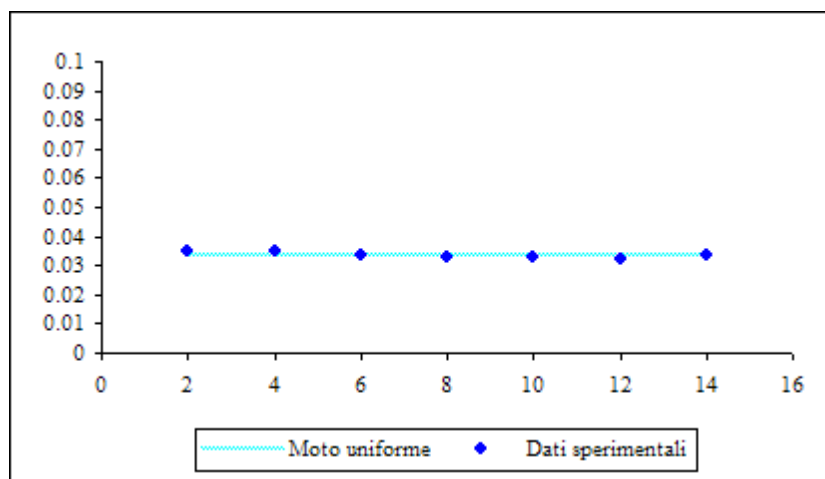


Prova 22 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	1.00

h _{med}	h _u	K _s	y _{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.34	3.34	93	5.67

Rilievo	z _f	z _s	h	y _{cr}	P	R _{Hf}	Fr	E _k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.04	43.50	3.46	5.32	0.469	0.0236	1.240	0.0266
2	39.89	43.35	3.46	5.32	0.469	0.0236	1.240	0.0266
3	40.34	43.71	3.37	5.61	0.467	0.0231	1.290	0.0280
4	40.18	43.50	3.32	5.78	0.466	0.0228	1.319	0.0289
5	40.09	43.35	3.26	5.99	0.465	0.0224	1.356	0.0300
6	40.09	43.34	3.25	6.03	0.465	0.0224	1.362	0.0302
7	39.96	43.31	3.35	5.68	0.467	0.0230	1.302	0.0284

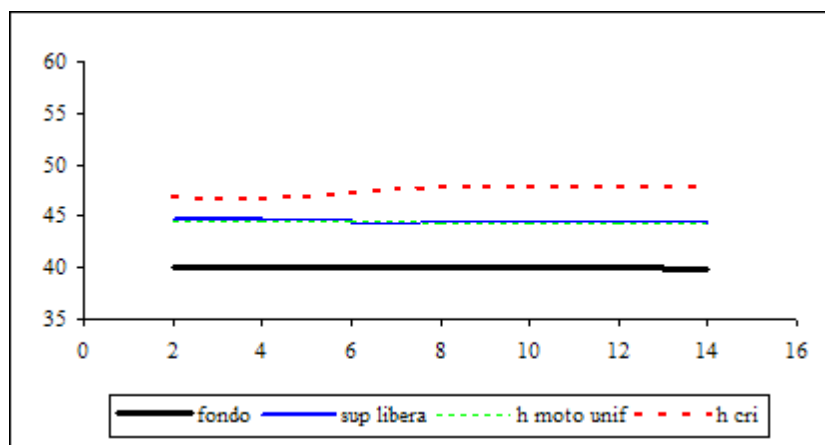
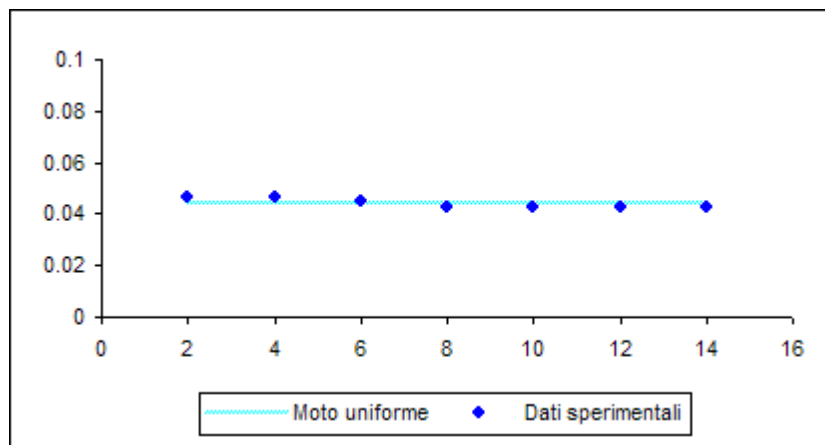


Prova 23 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	1.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.38	4.39	91	7.38

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.06	44.68	4.62	6.71	0.492	0.0300	1.205	0.0336
2	39.85	44.50	4.65	6.63	0.493	0.0302	1.194	0.0331
3	40.38	44.84	4.46	7.20	0.489	0.0292	1.271	0.0360
4	40.17	44.46	4.29	7.79	0.486	0.0283	1.347	0.0389
5	40.05	44.33	4.28	7.82	0.486	0.0282	1.352	0.0391
6	39.99	44.28	4.29	7.79	0.486	0.0283	1.347	0.0389
7	39.99	44.28	4.29	7.79	0.486	0.0283	1.347	0.0389

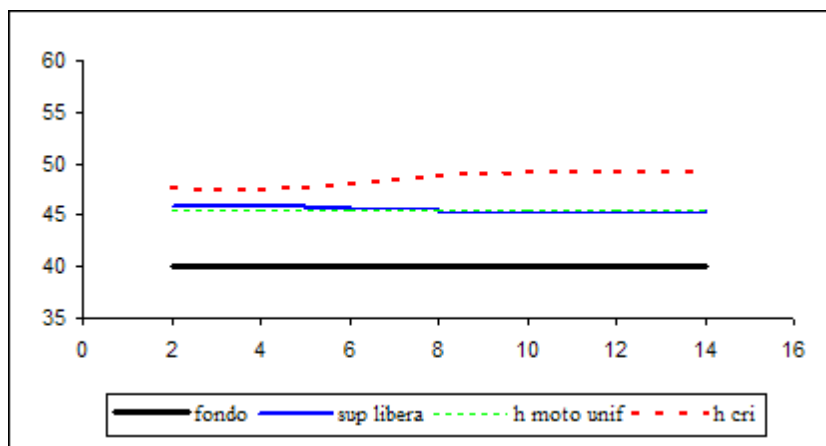
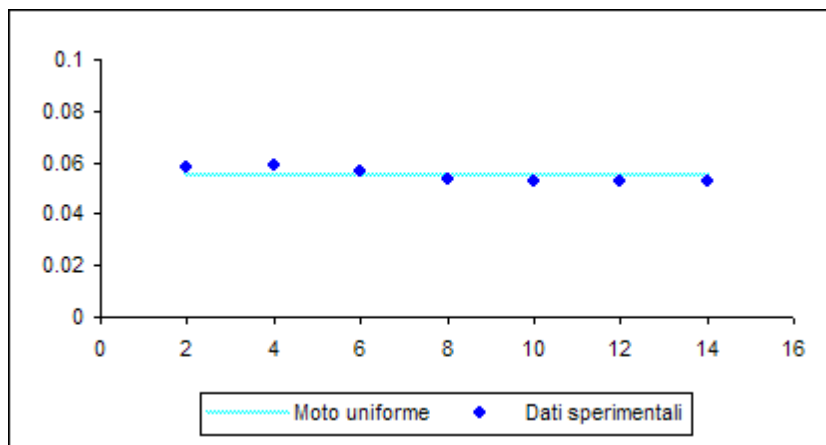


Prova 24 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	1.00

h _{med}	h _u	K _s	y _{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.50	5.49	86	8.46

Rilievo	z _f	z _s	h	y _{cr}	P	R _{Hf}	Fr	E _k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.1	45.9	5.85	7.45	0.517	0.0362	1.128	0.0372
2	39.9	45.7	5.87	7.40	0.517	0.0363	1.122	0.0370
3	40.3	46.0	5.63	8.04	0.513	0.0351	1.195	0.0402
4	40.2	45.6	5.37	8.84	0.507	0.0339	1.283	0.0442
5	40.1	45.4	5.27	9.17	0.505	0.0334	1.319	0.0459
6	40.0	45.3	5.27	9.17	0.505	0.0334	1.319	0.0459
7	40.0	45.2	5.25	9.24	0.505	0.0333	1.327	0.0462

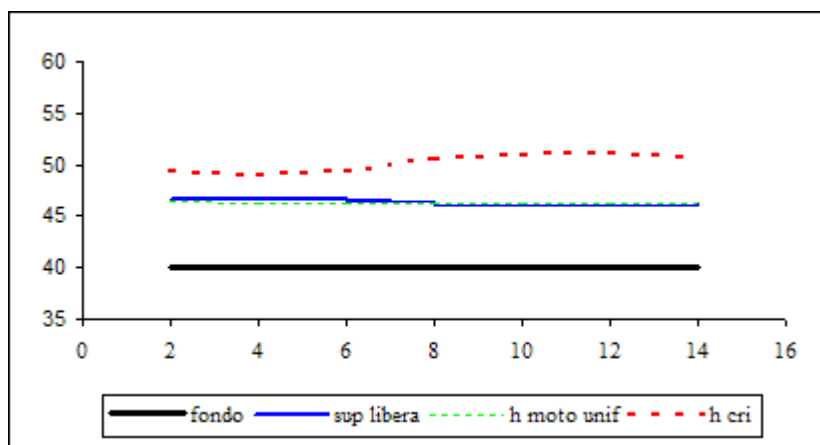
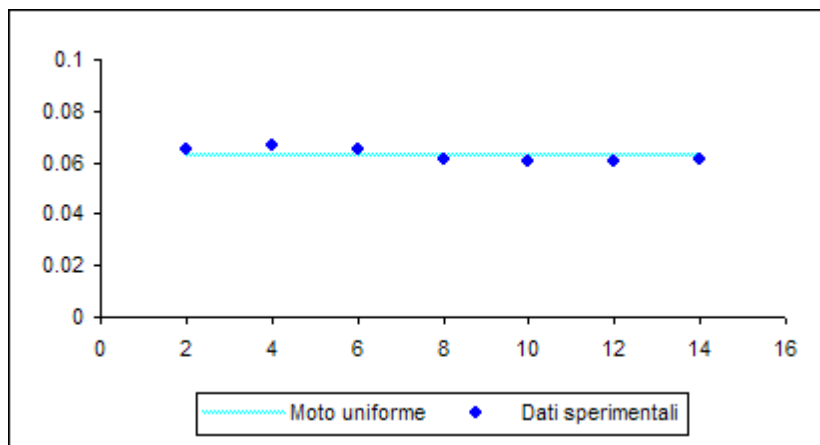


Prova 25 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	1.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.26	6.26	88	10.07

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40	47	6.55	9.28	0.531	0.0395	1.190	0.0464
2	40	47	6.66	8.97	0.533	0.0400	1.161	0.0449
3	40	47	6.51	9.39	0.530	0.0393	1.201	0.0470
4	40	46	6.16	10.49	0.523	0.0377	1.305	0.0524
5	40	46	6.05	10.87	0.521	0.0372	1.341	0.0544
6	40	46	6.01	11.02	0.520	0.0370	1.354	0.0551
7	40	46	6.14	10.56	0.523	0.0376	1.311	0.0528

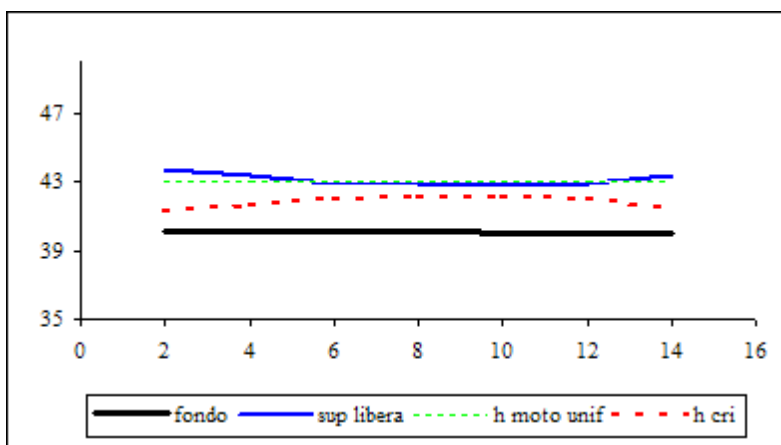
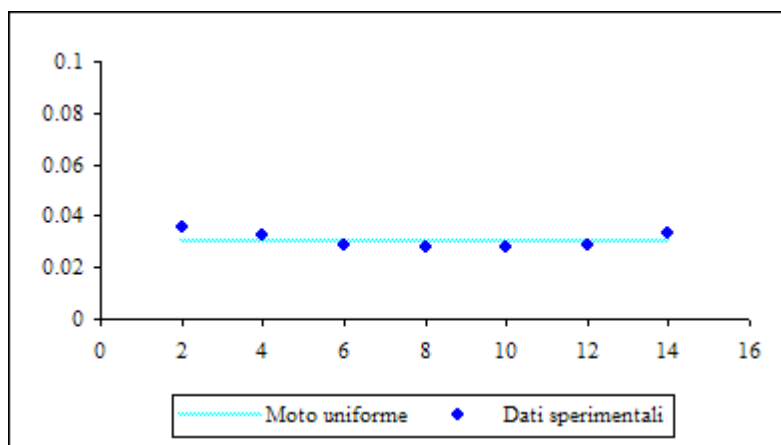


Prova 26 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	0.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
2.98	2.99	78	1.71

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	43.68	3.59	1.23	0.472	0.0243	0.586	0.0062
2	39.86	43.11	3.25	1.50	0.465	0.0224	0.680	0.0075
3	40.32	43.2	2.88	1.91	0.458	0.0201	0.815	0.0096
4	40.19	42.99	2.8	2.02	0.456	0.0196	0.850	0.0101
5	40.11	42.88	2.77	2.07	0.455	0.0195	0.864	0.0103
6	40.05	42.91	2.86	1.94	0.457	0.0200	0.824	0.0097
7	39.97	43.31	3.34	1.42	0.467	0.0229	0.653	0.0071

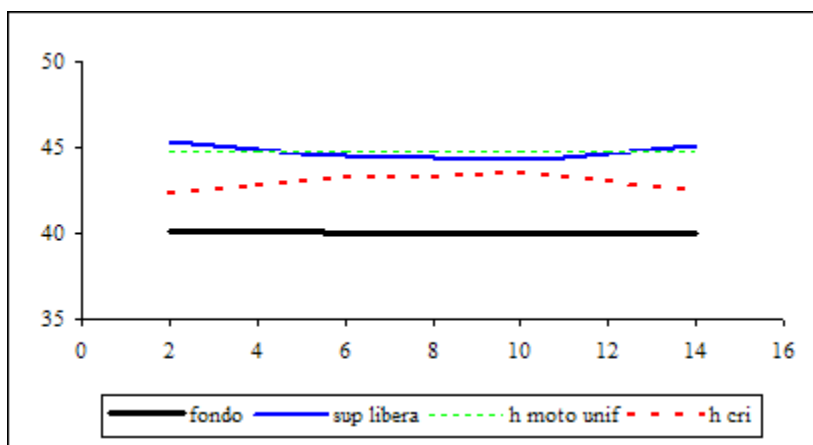
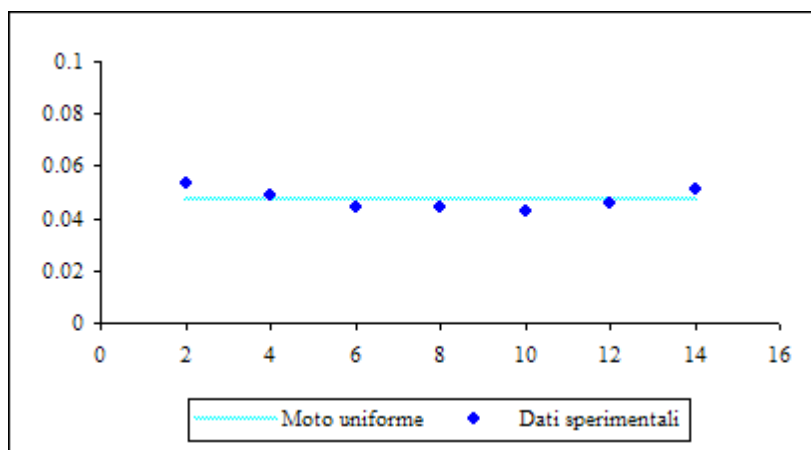


Prova 27 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	0.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.71	4.70	77	2.89

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.07	45.38	5.31	2.26	0.506	0.0336	0.652	0.0113
2	39.86	44.72	4.86	2.69	0.497	0.0313	0.744	0.0135
3	40.35	44.78	4.43	3.24	0.489	0.0290	0.855	0.0162
4	40.20	44.61	4.41	3.27	0.488	0.0289	0.861	0.0163
5	40.11	44.41	4.30	3.44	0.486	0.0283	0.894	0.0172
6	40.04	44.64	4.60	3.00	0.492	0.0299	0.808	0.0150
7	39.98	45.06	5.08	2.46	0.502	0.0324	0.696	0.0123

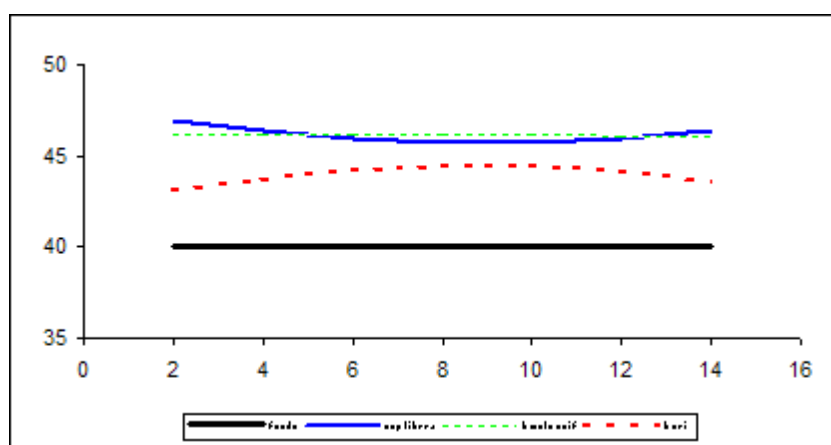
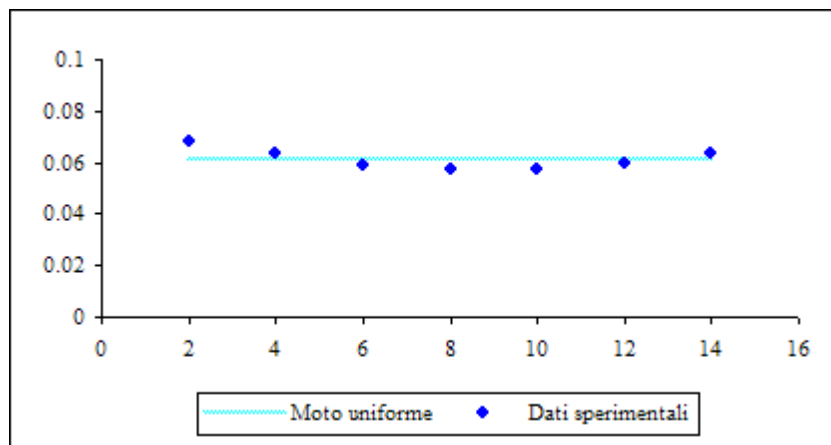


Prova 28 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	0.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
<i>cm</i>	<i>cm</i>	$m^{1/3} s^{-1}$	<i>cm</i>
6.10	6.09	78	3.88

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>m</i>	<i>m</i>		
1	40.07	46.89	6.82	3.08	0.536	0.0407	0.672	0.0154
2	39.85	46.21	6.36	3.54	0.527	0.0386	0.746	0.0177
3	40.32	46.19	5.87	4.16	0.517	0.0363	0.842	0.0208
4	40.21	45.91	5.70	4.41	0.514	0.0355	0.880	0.0221
5	40.11	45.82	5.71	4.40	0.514	0.0355	0.877	0.0220
6	40.05	45.99	5.94	4.06	0.519	0.0366	0.827	0.0203
7	39.99	46.32	6.33	3.58	0.527	0.0385	0.752	0.0179

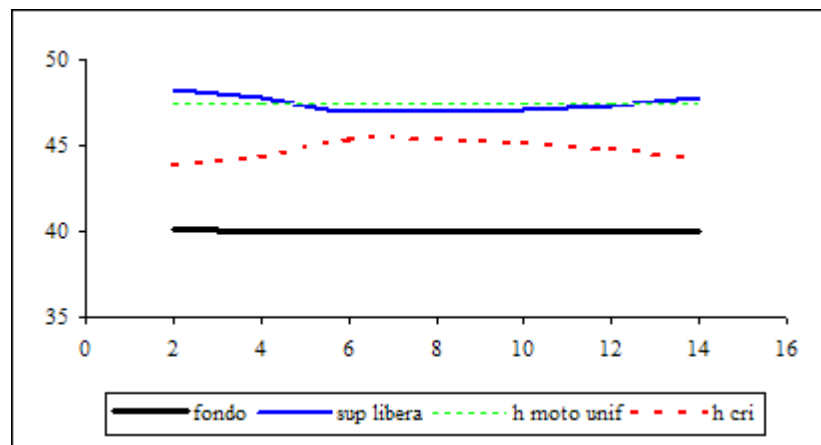
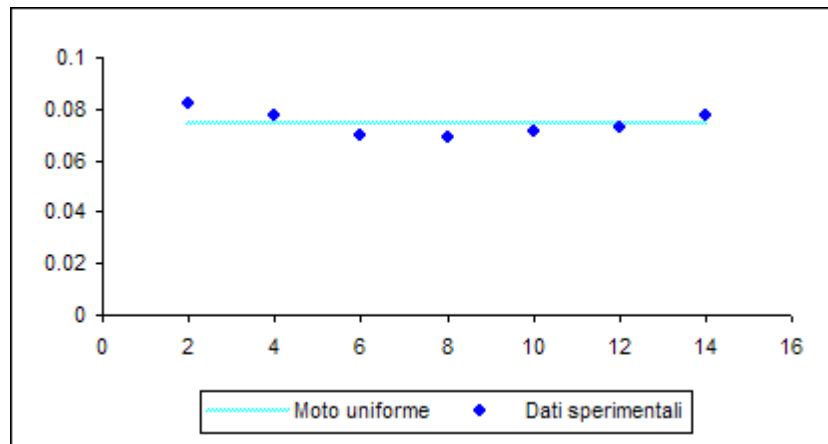


Prova 29 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	0.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
7.43	7.44	77	4.65

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.06	48.28	8.22	3.77	0.564	0.0466	0.677	0.0189
2	39.85	47.62	7.77	4.22	0.555	0.0448	0.737	0.0211
3	40.33	47.28	6.95	5.28	0.539	0.0413	0.871	0.0264
4	40.22	47.15	6.93	5.31	0.539	0.0412	0.875	0.0265
5	40.09	47.19	7.10	5.06	0.542	0.0419	0.844	0.0253
6	40.05	47.34	7.29	4.80	0.546	0.0427	0.811	0.0240
7	39.98	47.75	7.77	4.22	0.555	0.0448	0.737	0.0211

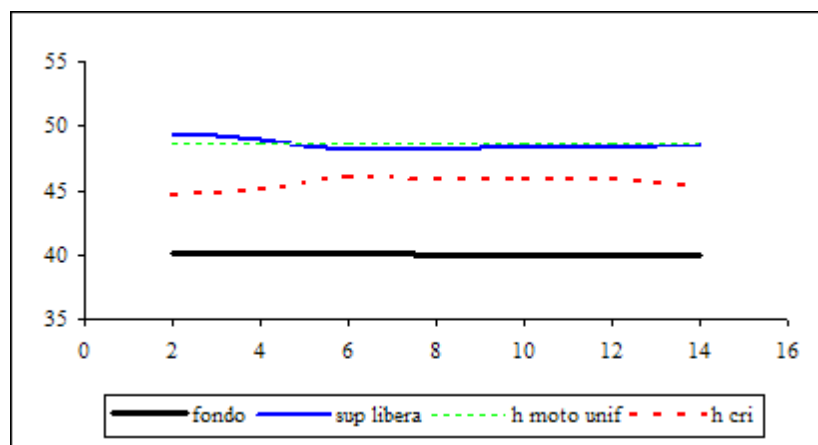
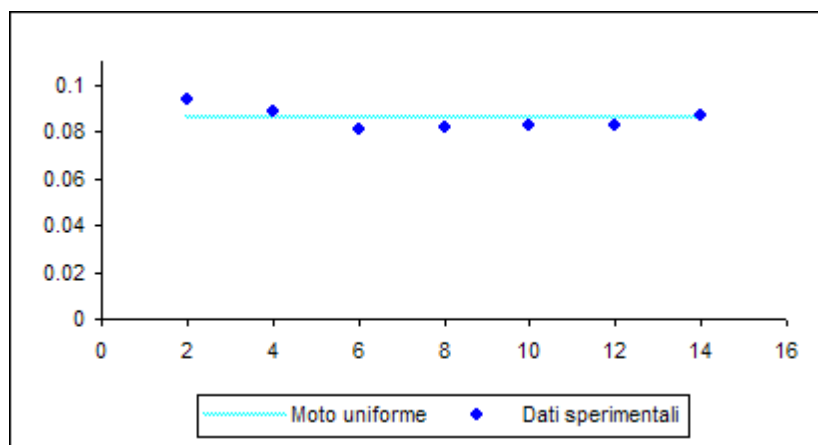


Prova 30 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	0.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
8.41	8.58	78	5.47

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.06	49.44	9.38	4.53	0.588	0.0511	0.695	0.0226
2	39.87	48.73	8.86	5.07	0.577	0.0491	0.757	0.0254
3	40.32	48.46	8.14	6.01	0.563	0.0463	0.859	0.0300
4	40.12	48.34	8.22	5.89	0.564	0.0466	0.847	0.0295
5	40.09	48.39	8.30	5.78	0.566	0.0469	0.835	0.0289
6	40.04	48.33	8.29	5.79	0.566	0.0469	0.836	0.0290
7	39.97	48.64	8.67	5.30	0.573	0.0484	0.782	0.0265

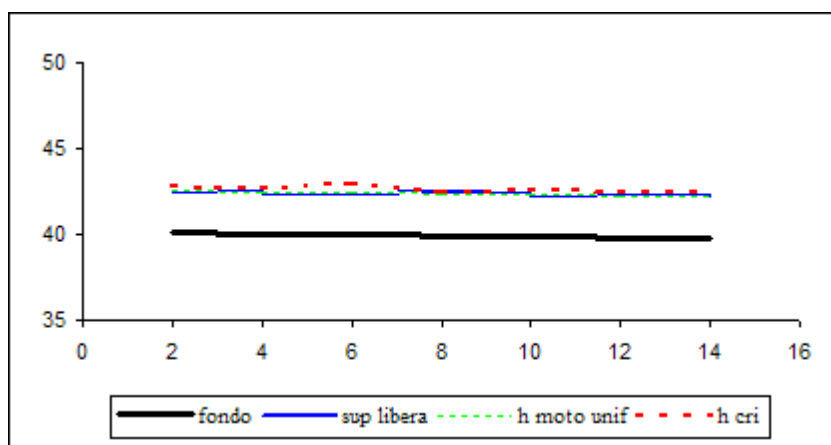
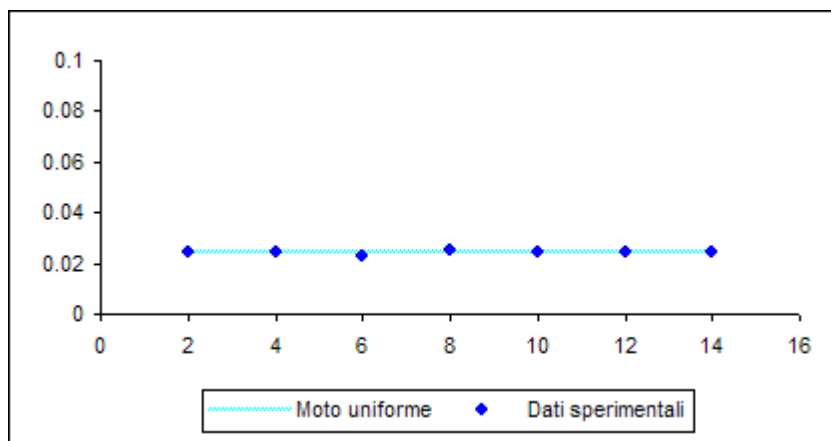


Prova 1 – $d_{50}=3.0$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	3.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
2.43	2.44	44	2.70

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.08	42.49	2.41	2.74	0.448	0.0172	1.067	0.0137
2	39.82	42.27	2.45	2.65	0.449	0.0175	1.041	0.0133
3	40.32	42.64	2.32	2.96	0.446	0.0166	1.129	0.0148
4	40.18	42.67	2.49	2.57	0.450	0.0177	1.016	0.0128
5	40.05	42.48	2.43	2.70	0.449	0.0173	1.054	0.0135
6	40.03	42.50	2.47	2.61	0.449	0.0176	1.028	0.0131
7	39.95	42.39	2.44	2.68	0.449	0.0174	1.047	0.0134

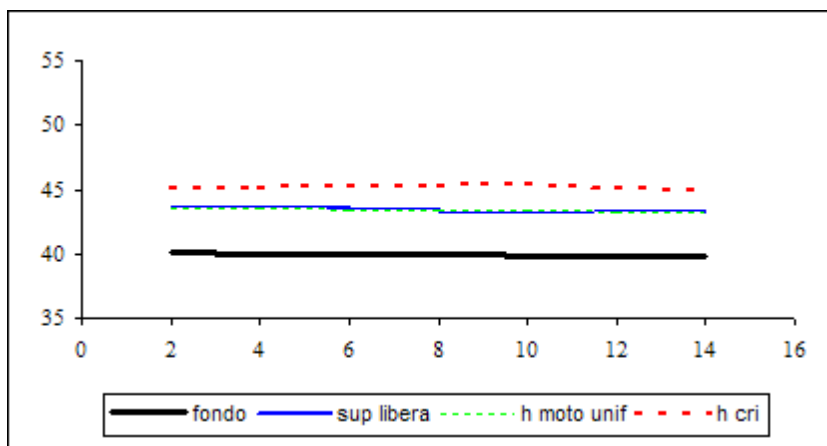
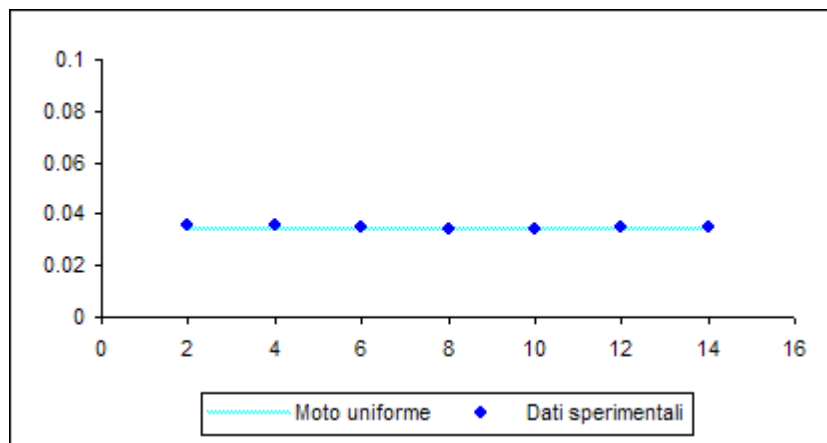


Prova 2 – $d_{50}=3.0$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	3.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.46	3.45	51	5.27

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	43.67	3.58	4.97	0.472	0.0243	1.178	0.0249
2	39.85	43.38	3.53	5.11	0.471	0.0240	1.203	0.0256
3	40.23	43.71	3.48	5.26	0.470	0.0237	1.229	0.0263
4	40.18	43.62	3.44	5.38	0.469	0.0235	1.251	0.0269
5	40.06	43.44	3.38	5.58	0.468	0.0231	1.284	0.0279
6	40.02	43.48	3.46	5.32	0.469	0.0236	1.240	0.0266
7	39.91	43.39	3.48	5.26	0.470	0.0237	1.229	0.0263

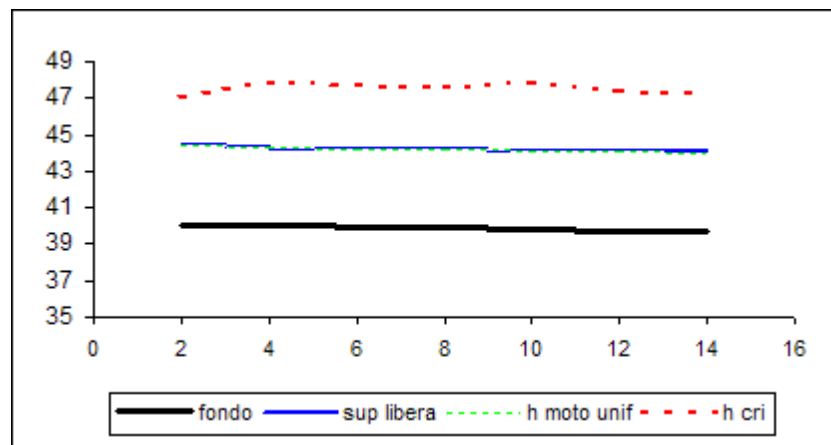
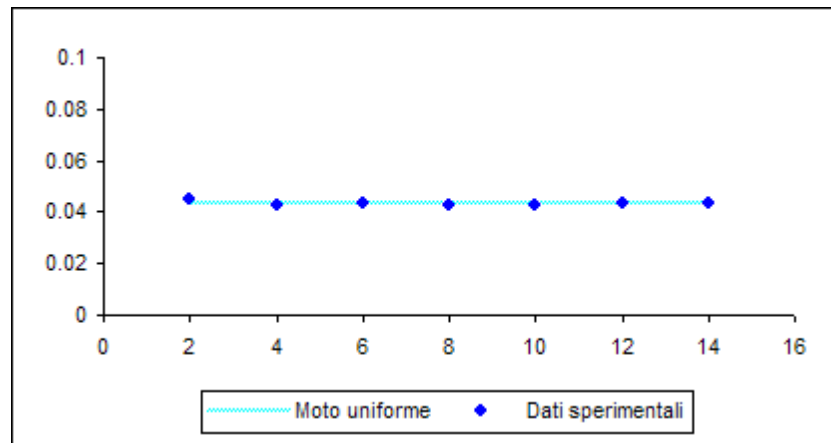


Prova 3 – $d_{50}=3.0$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	3.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.30	4.31	54	7.64

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.05	44.57	4.52	7.01	0.490	0.0295	1.246	0.0351
2	39.82	44.11	4.29	7.79	0.486	0.0283	1.347	0.0389
3	40.15	44.46	4.31	7.72	0.486	0.0284	1.338	0.0386
4	40.11	44.41	4.30	7.75	0.486	0.0283	1.343	0.0388
5	40.06	44.29	4.23	8.01	0.485	0.0279	1.376	0.0400
6	40.02	44.35	4.33	7.64	0.487	0.0285	1.329	0.0382
7	39.92	44.26	4.34	7.61	0.487	0.0285	1.324	0.0380

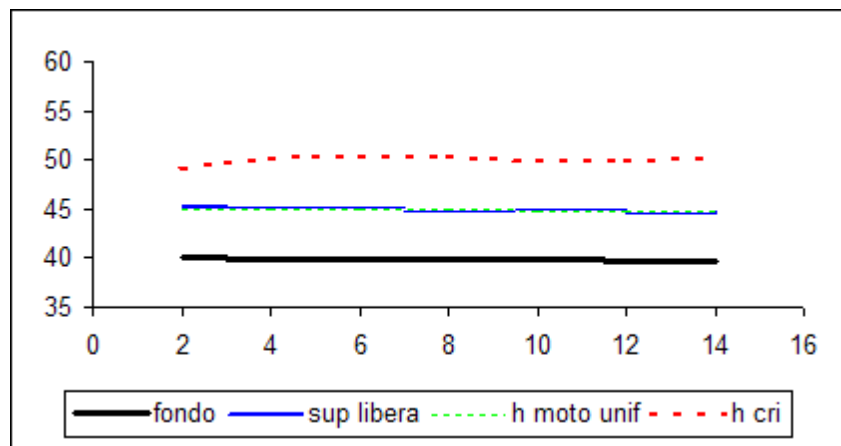
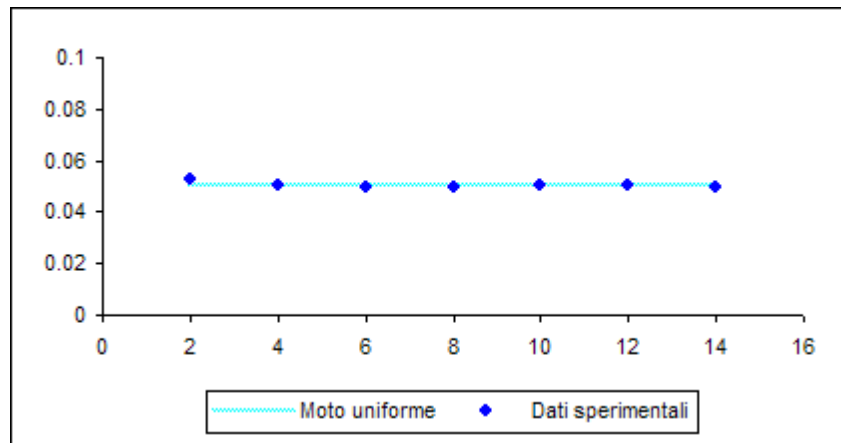


Prova 4 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	3.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.00	5.02	57	10.03

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.03	45.34	5.31	9.04	0.506	0.0336	1.305	0.0452
2	39.78	44.80	5.02	10.12	0.500	0.0321	1.420	0.0506
3	40.20	45.18	4.98	10.28	0.500	0.0319	1.436	0.0514
4	40.09	45.06	4.97	10.33	0.499	0.0318	1.443	0.0517
5	40.00	45.02	5.02	10.11	0.500	0.0321	1.419	0.0506
6	40.00	45.03	5.03	10.08	0.501	0.0321	1.416	0.0504
7	40.05	45.02	4.97	10.30	0.499	0.0319	1.440	0.0515

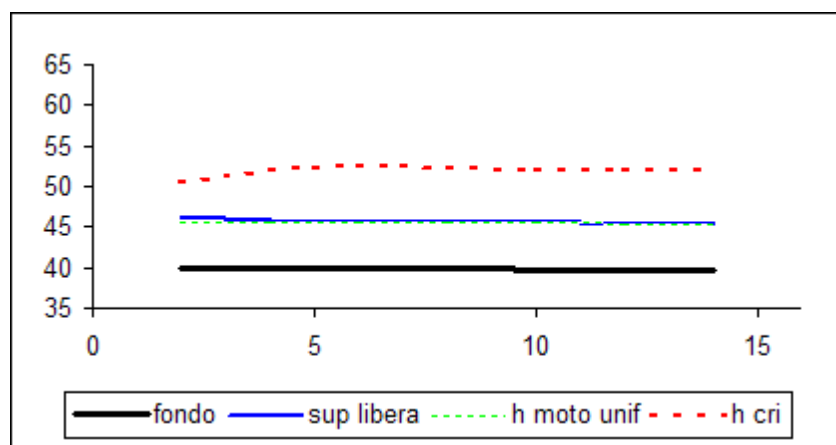
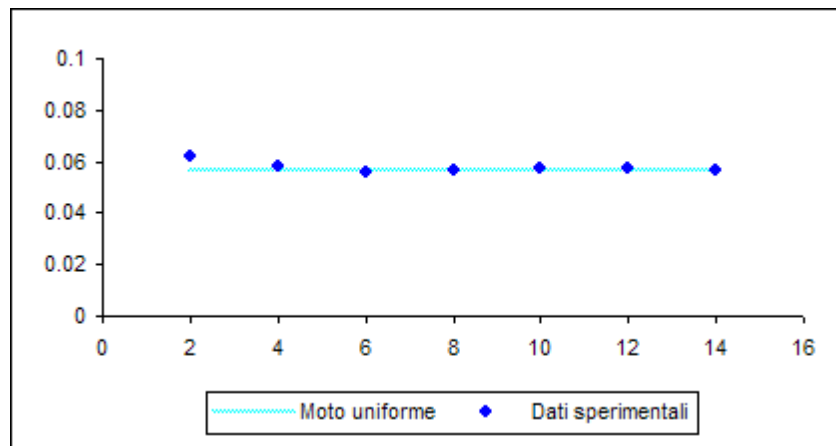


Prova 5 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	3.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.69	5.68	59	12.03

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.02	46.19	6.17	10.46	0.523	0.0377	1.302	0.0523
2	39.74	45.52	5.78	11.92	0.516	0.0359	1.436	0.0596
3	40.29	45.90	5.61	12.65	0.512	0.0350	1.502	0.0633
4	40.07	45.73	5.66	12.43	0.513	0.0353	1.482	0.0621
5	40.06	45.76	5.70	12.25	0.514	0.0355	1.466	0.0613
6	40.00	45.72	5.72	12.17	0.514	0.0356	1.459	0.0608
7	40.12	45.78	5.66	12.43	0.513	0.0353	1.482	0.0621

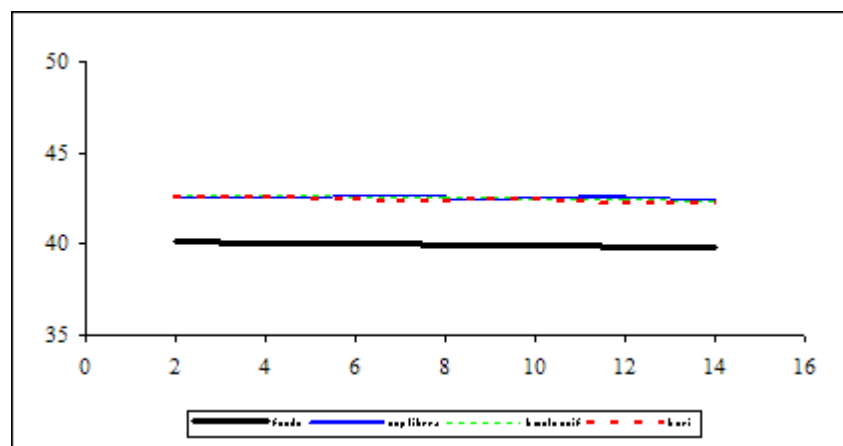
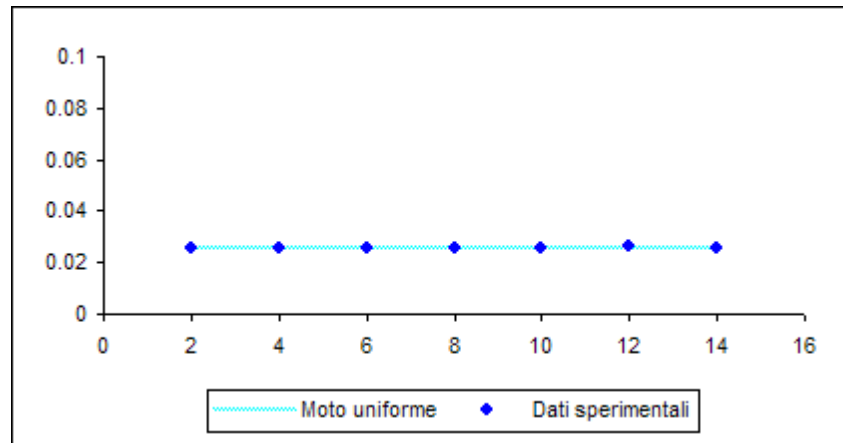


Prova 6 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	2.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
2.56	2.55	45	2.44

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.12	42.66	2.54	2.47	0.451	0.0180	0.986	0.0123
2	39.89	42.42	2.53	2.49	0.451	0.0180	0.992	0.0124
3	40.25	42.79	2.54	2.47	0.451	0.0180	0.986	0.0123
4	40.19	42.77	2.58	2.39	0.452	0.0183	0.963	0.0120
5	40.09	42.61	2.52	2.51	0.450	0.0179	0.998	0.0125
6	40.05	42.68	2.63	2.30	0.453	0.0186	0.936	0.0115
7	40.00	42.55	2.55	2.45	0.451	0.0181	0.980	0.0123

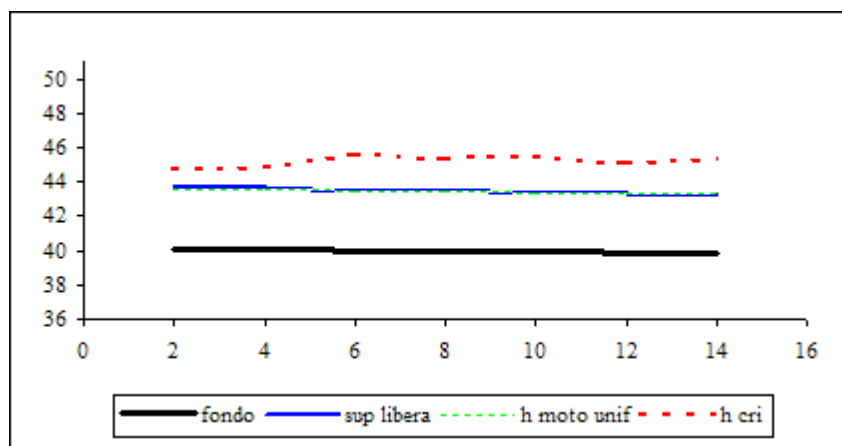
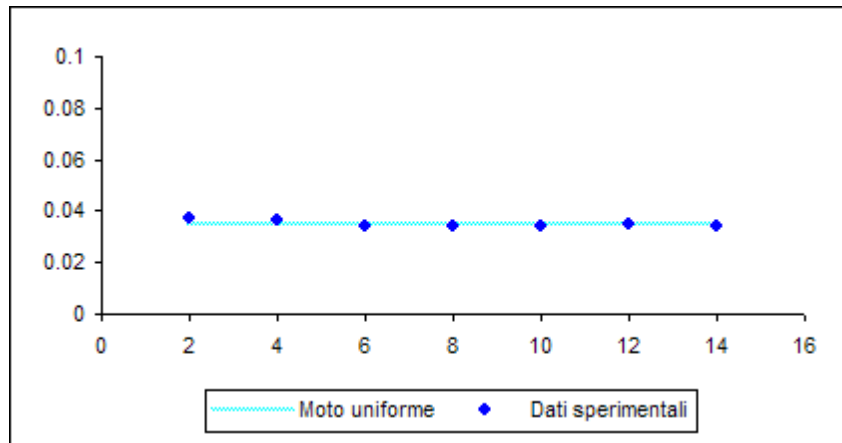


Prova 7 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	2.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.47	3.48	55	5.21

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.10	43.82	3.72	4.60	0.474	0.0251	1.112	0.0230
2	39.82	43.46	3.64	4.81	0.473	0.0246	1.149	0.0240
3	40.38	43.79	3.41	5.48	0.468	0.0233	1.267	0.0274
4	40.28	43.72	3.44	5.38	0.469	0.0235	1.251	0.0269
5	40.12	43.52	3.40	5.51	0.468	0.0232	1.273	0.0276
6	40.02	43.51	3.49	5.23	0.470	0.0238	1.224	0.0261
7	40.00	43.41	3.41	5.48	0.468	0.0233	1.267	0.0274

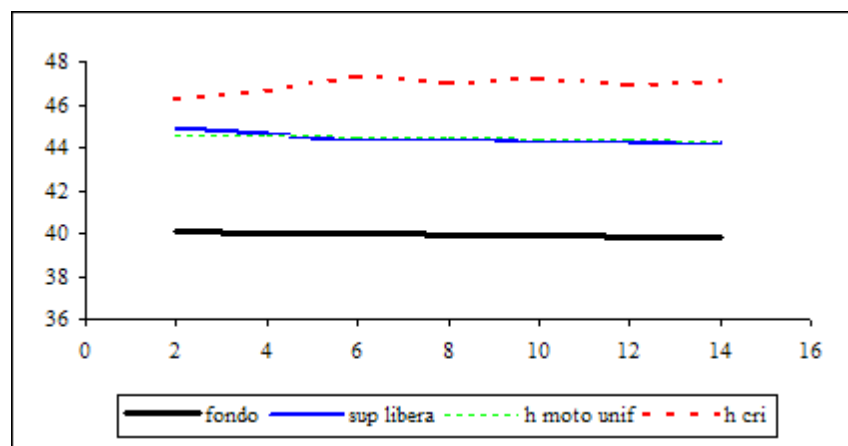
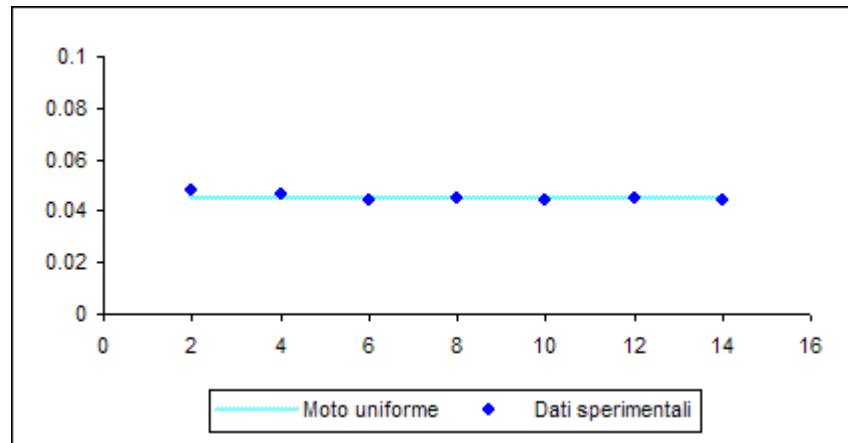


Prova 8 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	2.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.49	4.52	55	6.97

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.07	44.89	4.82	6.16	0.496	0.0311	1.131	0.0308
2	39.82	44.48	4.66	6.60	0.493	0.0302	1.190	0.0330
3	40.26	44.69	4.43	7.30	0.489	0.0290	1.283	0.0365
4	40.17	44.67	4.50	7.07	0.490	0.0294	1.254	0.0354
5	40.08	44.50	4.42	7.33	0.488	0.0290	1.288	0.0367
6	40.01	44.51	4.50	7.07	0.490	0.0294	1.254	0.0354
7	39.98	44.42	4.44	7.26	0.489	0.0291	1.279	0.0363

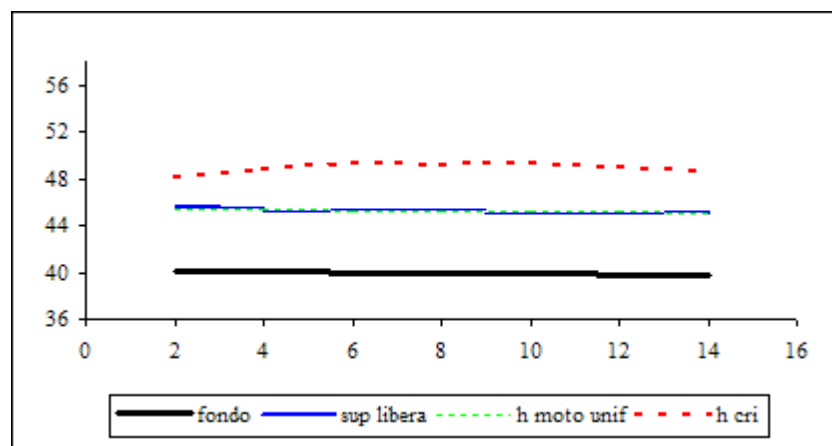
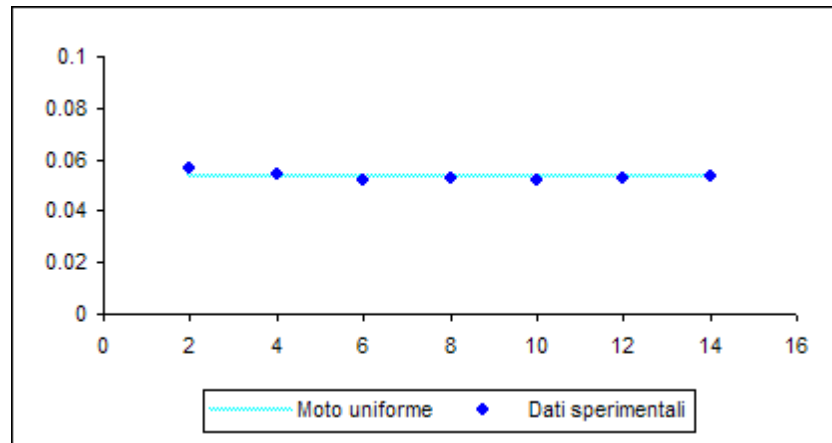


Prova 9 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	2.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.33	5.32	57	8.97

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.06	45.69	5.63	8.04	0.513	0.0351	1.195	0.0402
2	39.85	45.24	5.39	8.77	0.508	0.0340	1.276	0.0439
3	40.19	45.39	5.20	9.42	0.504	0.0330	1.346	0.0471
4	40.18	45.45	5.27	9.18	0.505	0.0334	1.319	0.0459
5	40.09	45.29	5.20	9.42	0.504	0.0330	1.346	0.0471
6	40.02	45.31	5.29	9.11	0.506	0.0335	1.312	0.0455
7	39.96	45.31	5.35	8.90	0.507	0.0338	1.290	0.0445

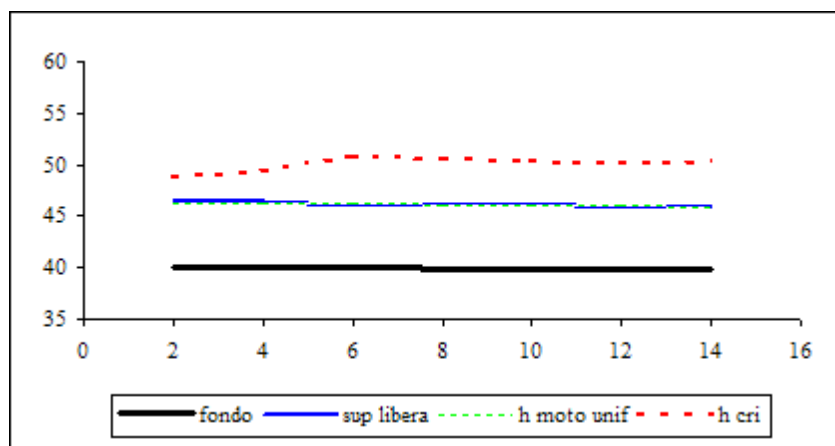
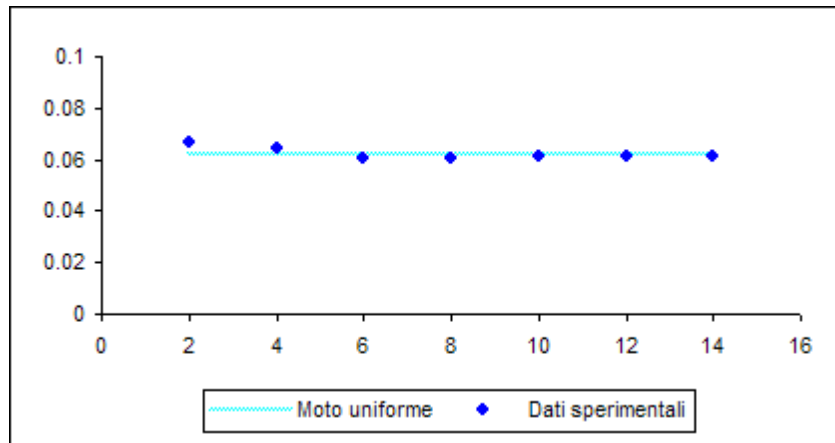


Prova 10 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	2.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.23	6.20	56	10.08

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.05	46.72	6.67	8.76	0.533	0.0400	1.146	0.0438
2	39.73	46.19	6.46	9.34	0.529	0.0391	1.202	0.0467
3	40.18	46.21	6.03	10.72	0.521	0.0371	1.333	0.0536
4	40.12	46.19	6.07	10.57	0.521	0.0373	1.320	0.0529
5	40.06	46.18	6.12	10.40	0.522	0.0375	1.304	0.0520
6	40.01	46.14	6.13	10.37	0.523	0.0375	1.301	0.0518
7	39.98	46.08	6.10	10.47	0.522	0.0374	1.310	0.0524

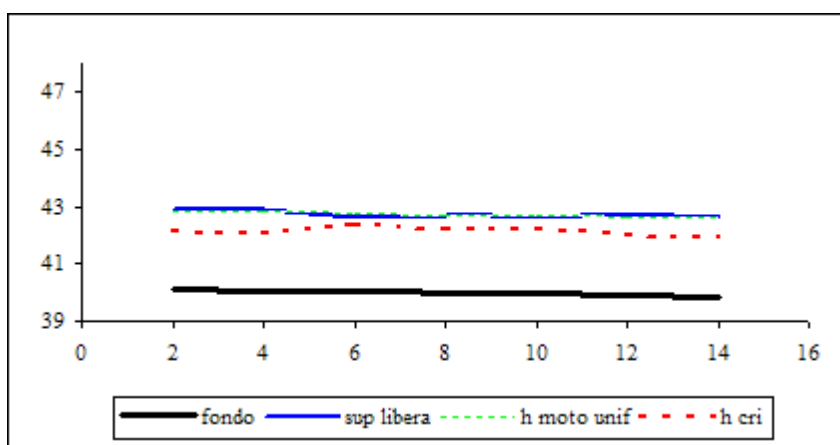
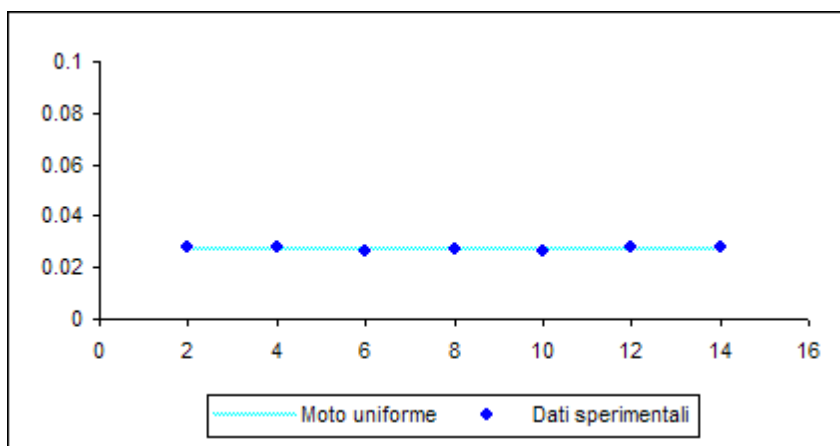


Prova 11 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	2.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
2.72	2.73	45	2.14

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.11	42.89	2.78	2.06	0.456	0.0195	0.861	0.0103
2	39.87	42.68	2.81	2.02	0.456	0.0197	0.847	0.0101
3	40.36	42.99	2.63	2.30	0.453	0.0186	0.935	0.0115
4	40.18	42.87	2.69	2.20	0.454	0.0190	0.904	0.0110
5	40.11	42.76	2.65	2.27	0.453	0.0187	0.925	0.0113
6	40.06	42.82	2.76	2.09	0.455	0.0194	0.870	0.0104
7	39.98	42.76	2.78	2.06	0.456	0.0195	0.861	0.0103

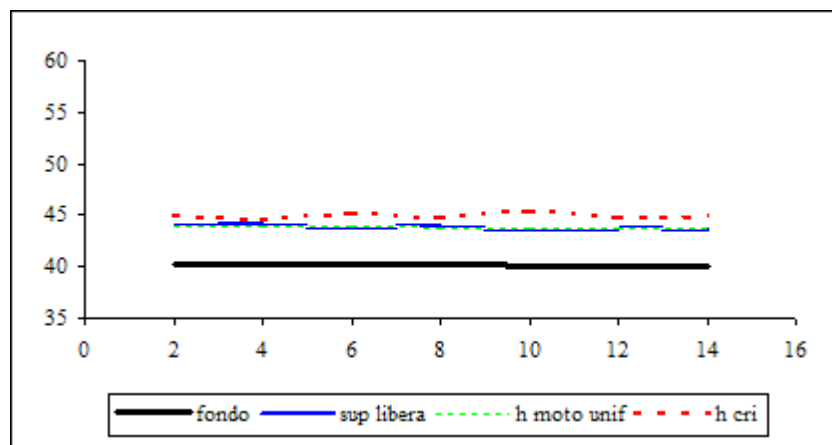
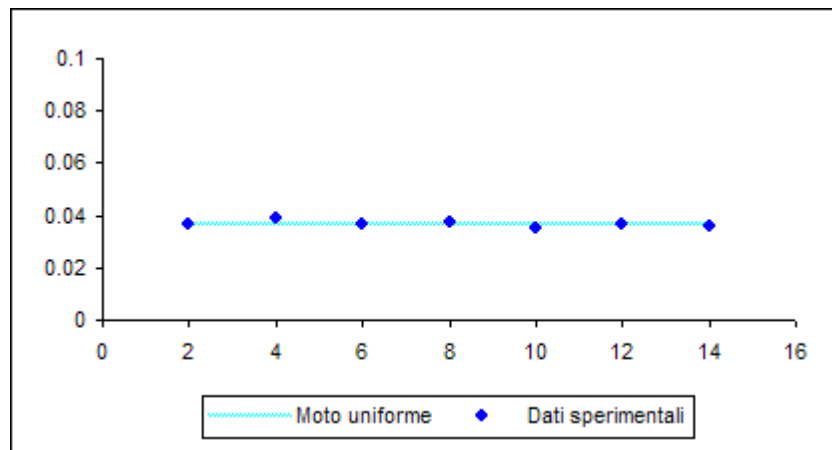


Prova 12 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	2.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.67	3.65	57	4.73

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.26	43.96	3.70	4.65	0.474	0.0250	1.121	0.0233
2	39.86	43.72	3.86	4.27	0.477	0.0259	1.052	0.0214
3	40.34	43.97	3.63	4.83	0.473	0.0246	1.154	0.0242
4	40.23	43.95	3.72	4.60	0.474	0.0251	1.112	0.0230
5	40.12	43.64	3.52	5.14	0.470	0.0239	1.208	0.0257
6	40.02	43.70	3.68	4.70	0.474	0.0249	1.130	0.0235
7	39.99	43.58	3.59	4.94	0.472	0.0243	1.173	0.0247

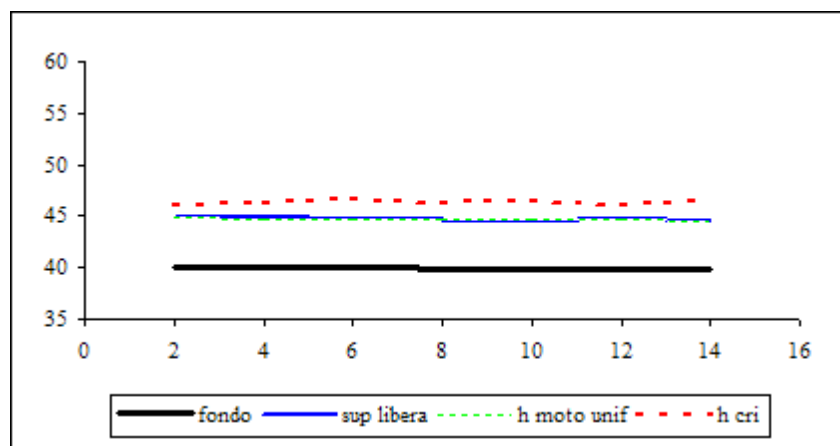
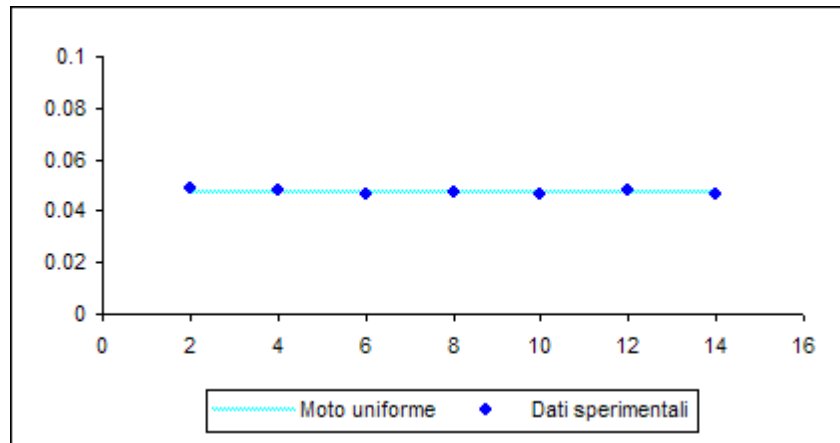


Prova 13 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	2.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.72	4.75	57	6.38

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.05	44.93	4.88	6.02	0.498	0.0314	1.111	0.0301
2	39.82	44.61	4.79	6.25	0.496	0.0309	1.142	0.0312
3	40.31	44.95	4.64	6.66	0.493	0.0301	1.198	0.0333
4	40.15	44.90	4.75	6.35	0.495	0.0307	1.157	0.0318
5	40.07	44.72	4.65	6.63	0.493	0.0302	1.194	0.0331
6	40.01	44.81	4.80	6.22	0.496	0.0310	1.138	0.0311
7	39.98	44.66	4.68	6.54	0.494	0.0303	1.183	0.0327

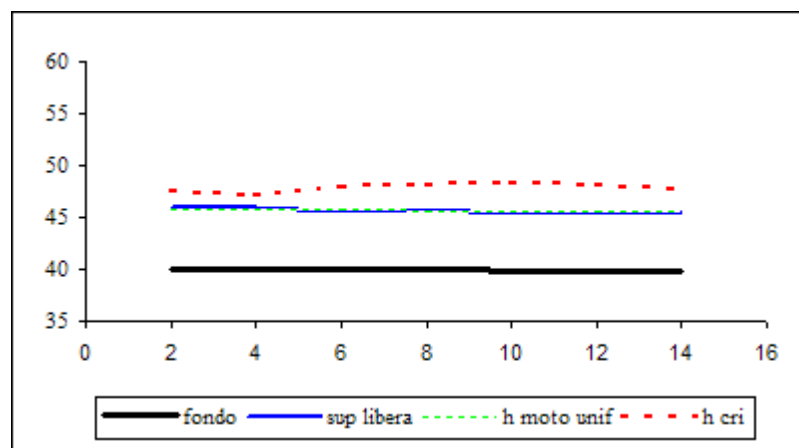
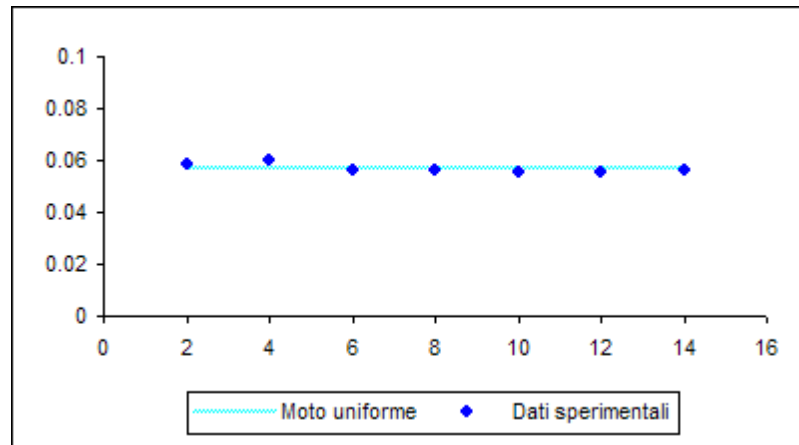


Prova 14 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	2.00

h _{med}	h _u	K _s	y _{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.67	5.73	57	7.86

Rilievo	z _f	z _s	h	y _{cr}	P	R _{Hf}	Fr	E _k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.04	45.91	5.87	7.39	0.517	0.0363	1.122	0.0370
2	39.84	45.85	6.01	7.05	0.520	0.0370	1.083	0.0353
3	40.32	45.97	5.65	7.98	0.513	0.0352	1.189	0.0399
4	40.12	45.74	5.62	8.07	0.512	0.0351	1.198	0.0403
5	40.13	45.65	5.52	8.36	0.510	0.0346	1.231	0.0418
6	40.02	45.59	5.57	8.21	0.511	0.0349	1.214	0.0411
7	39.99	45.64	5.65	7.98	0.513	0.0352	1.189	0.0399

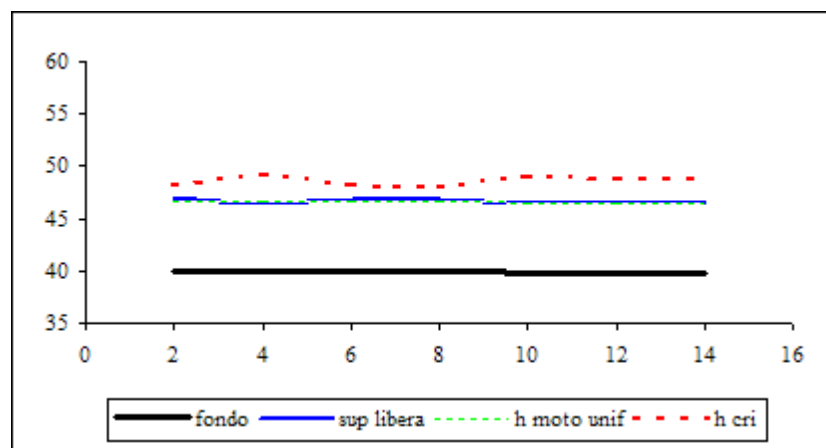
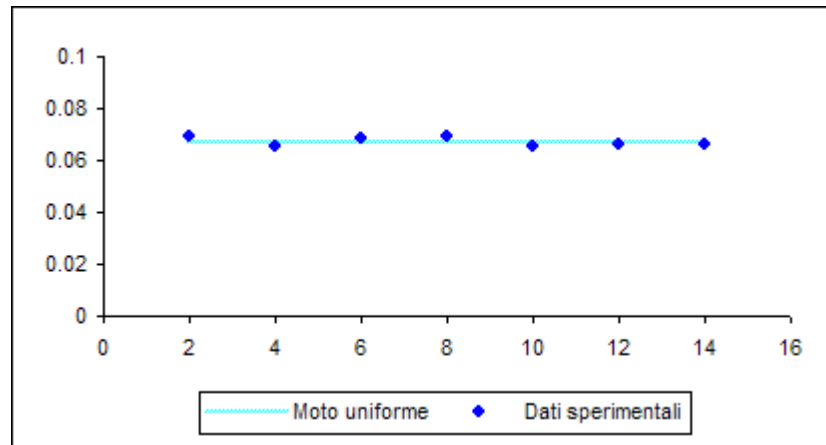


Prova 15 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	2.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.71	6.66	56	8.64

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.01	46.93	6.92	8.10	0.538	0.0411	1.082	0.0405
2	40.30	46.82	6.52	9.13	0.530	0.0393	1.183	0.0456
3	40.10	46.95	6.86	8.26	0.537	0.0408	1.098	0.0413
4	39.83	46.76	6.93	8.08	0.539	0.0412	1.080	0.0404
5	40.11	46.63	6.52	9.13	0.530	0.0393	1.183	0.0456
6	40.00	46.59	6.59	8.94	0.532	0.0397	1.164	0.0447
7	39.99	46.59	6.60	8.91	0.532	0.0397	1.162	0.0445

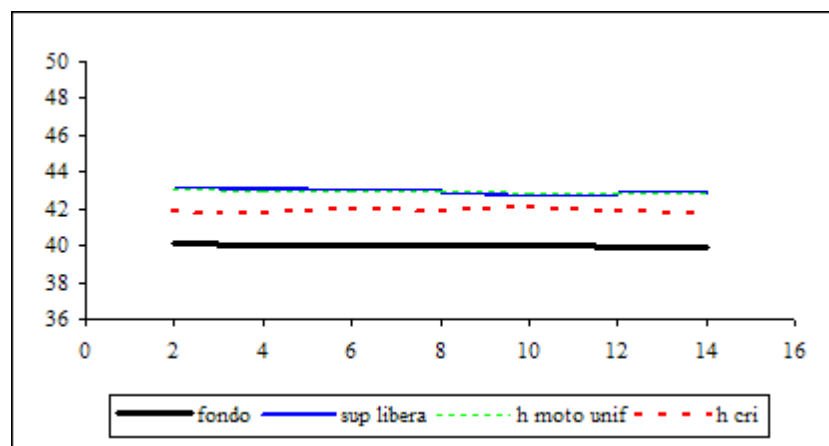
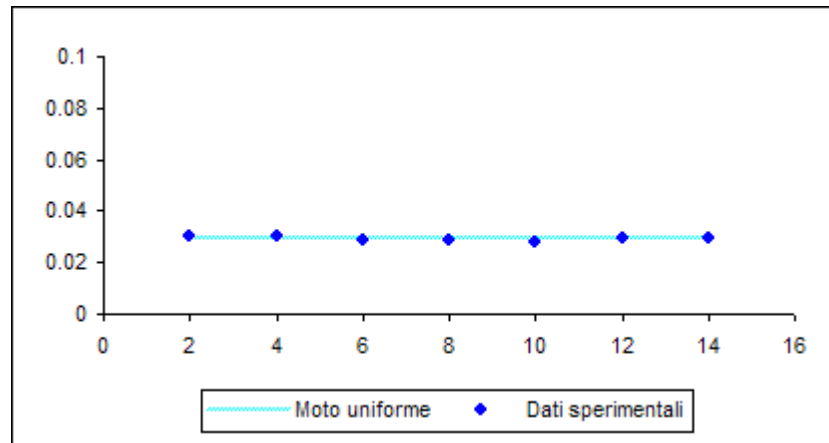


Prova 16 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	1.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
2.90	2.91	47	1.87

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	43.09	3.00	1.77	0.460	0.0209	0.767	0.0088
2	39.88	42.92	3.04	1.72	0.461	0.0211	0.752	0.0086
3	40.32	43.19	2.87	1.93	0.457	0.0201	0.820	0.0096
4	40.26	43.16	2.90	1.89	0.458	0.0203	0.807	0.0094
5	40.12	42.89	2.77	2.07	0.455	0.0195	0.865	0.0104
6	40.02	42.93	2.91	1.88	0.458	0.0203	0.803	0.0094
7	39.99	42.90	2.91	1.88	0.458	0.0203	0.803	0.0094

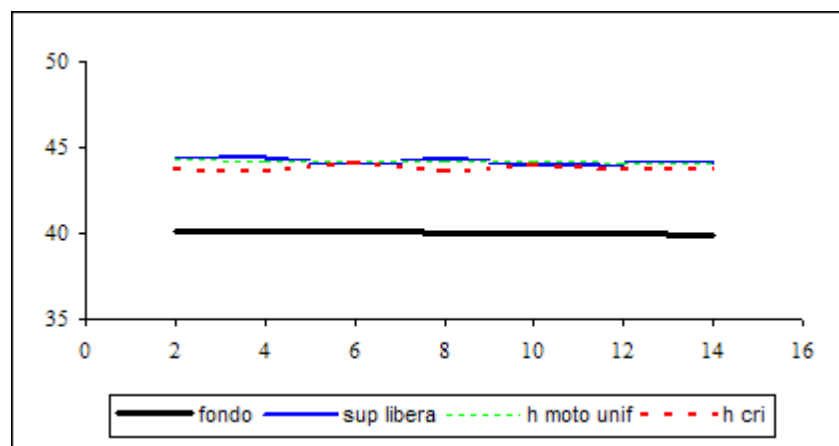
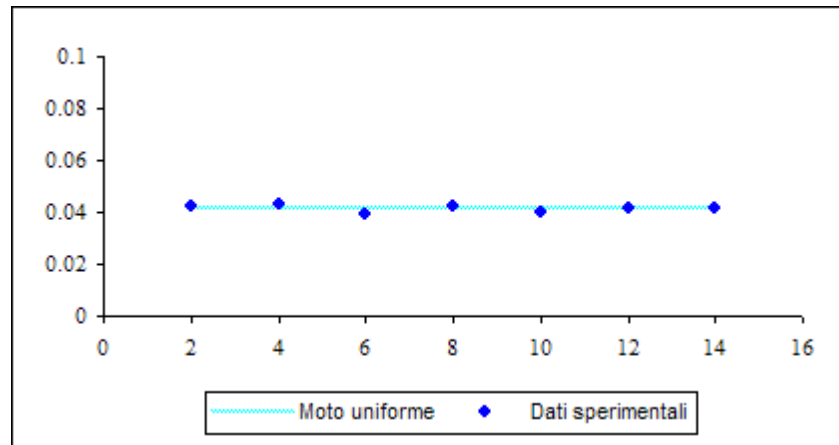


Prova 17 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	1.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.13	4.15	54	3.72

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.12	44.36	4.24	3.54	0.485	0.0280	0.914	0.0177
2	39.84	44.13	4.29	3.46	0.486	0.0283	0.898	0.0173
3	40.31	44.27	3.96	4.06	0.479	0.0264	1.013	0.0203
4	40.13	44.37	4.24	3.54	0.485	0.0280	0.914	0.0177
5	40.06	44.05	3.99	4.00	0.480	0.0266	1.001	0.0200
6	40.03	44.18	4.15	3.70	0.483	0.0275	0.944	0.0185
7	40.07	44.19	4.12	3.75	0.482	0.0273	0.954	0.0188

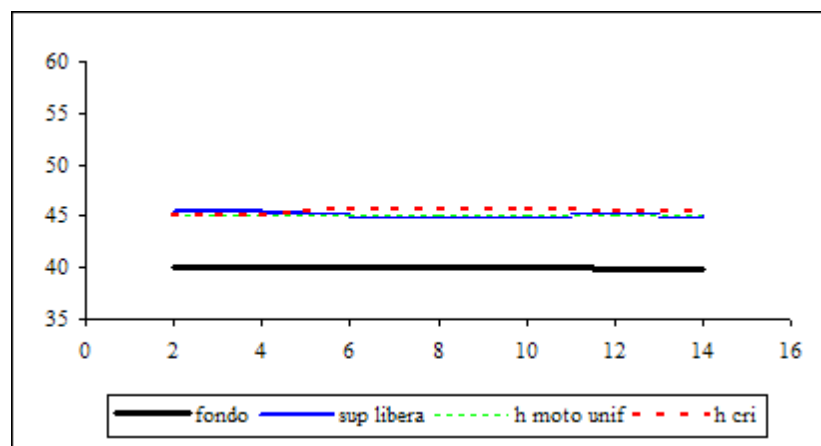
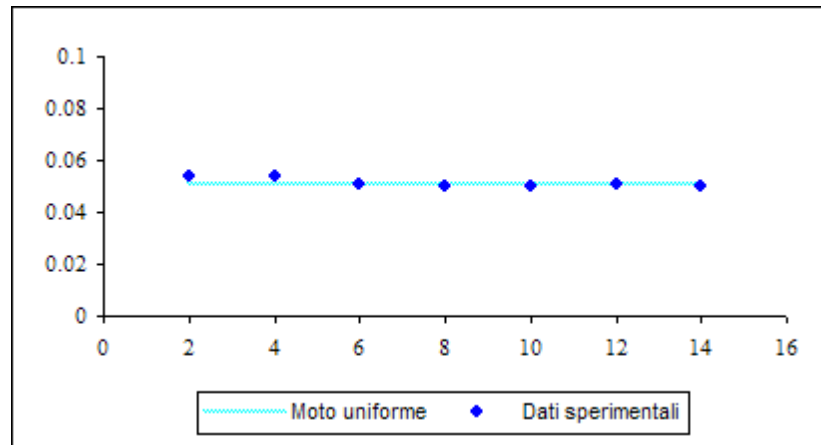


Prova 18 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	1.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.09	5.10	59	5.46

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.07	45.45	5.38	4.95	0.508	0.0339	0.959	0.0248
2	39.84	45.21	5.37	4.97	0.507	0.0339	0.962	0.0249
3	40.22	45.27	5.05	5.62	0.501	0.0323	1.055	0.0281
4	40.33	45.33	5.00	5.73	0.500	0.0320	1.071	0.0287
5	40.06	45.03	4.97	5.80	0.499	0.0318	1.081	0.0290
6	40.02	45.13	5.11	5.49	0.502	0.0326	1.036	0.0274
7	39.98	45.01	5.03	5.67	0.501	0.0322	1.061	0.0283

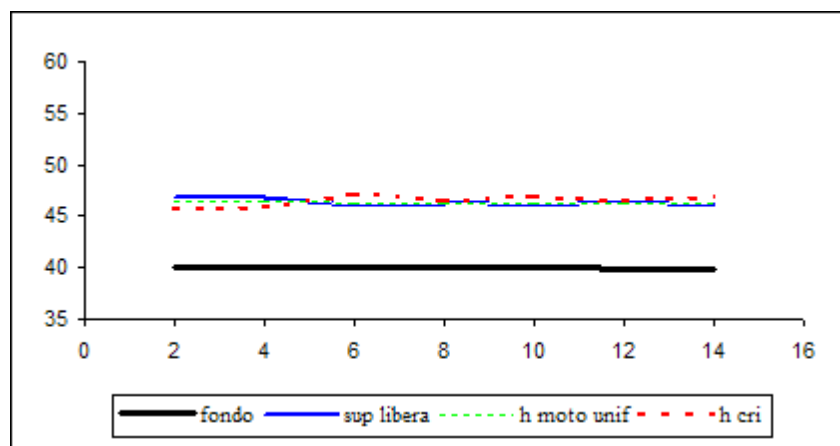
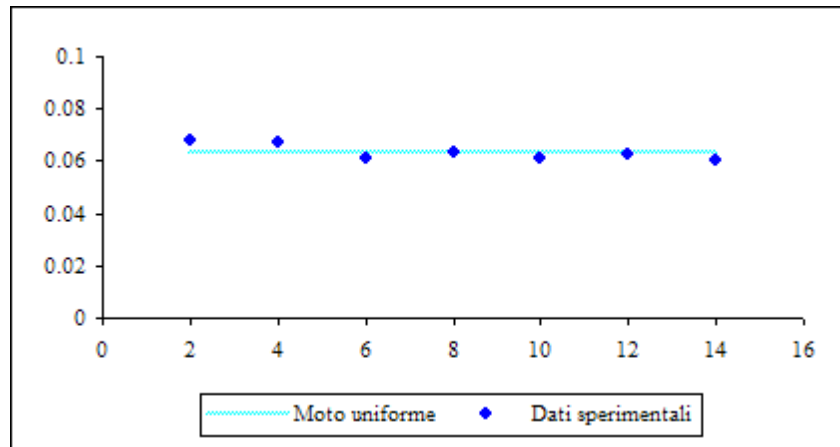


Prova 19 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	1.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.25	6.30	57	6.38

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	46.91	6.82	5.48	0.536	0.0407	0.896	0.0274
2	39.84	46.52	6.68	5.71	0.534	0.0401	0.924	0.0285
3	40.31	46.39	6.08	6.89	0.522	0.0373	1.065	0.0345
4	40.18	46.51	6.33	6.36	0.527	0.0385	1.002	0.0318
5	40.09	46.18	6.09	6.87	0.522	0.0373	1.062	0.0343
6	40.05	46.33	6.28	6.46	0.526	0.0382	1.014	0.0323
7	40.16	46.21	6.05	6.96	0.521	0.0372	1.073	0.0348

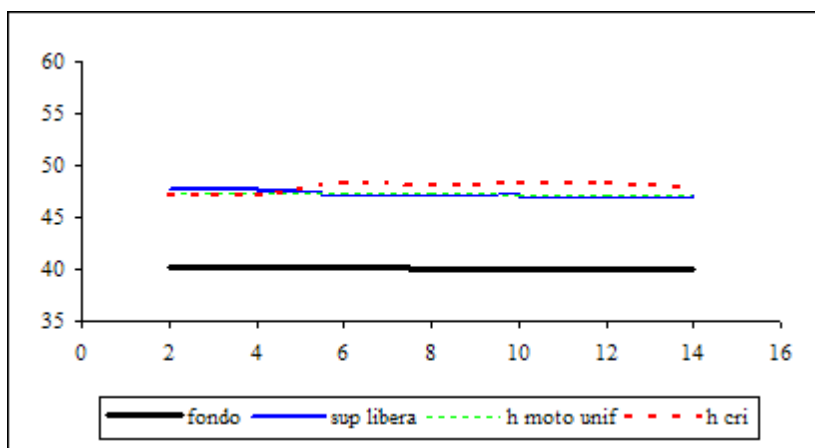
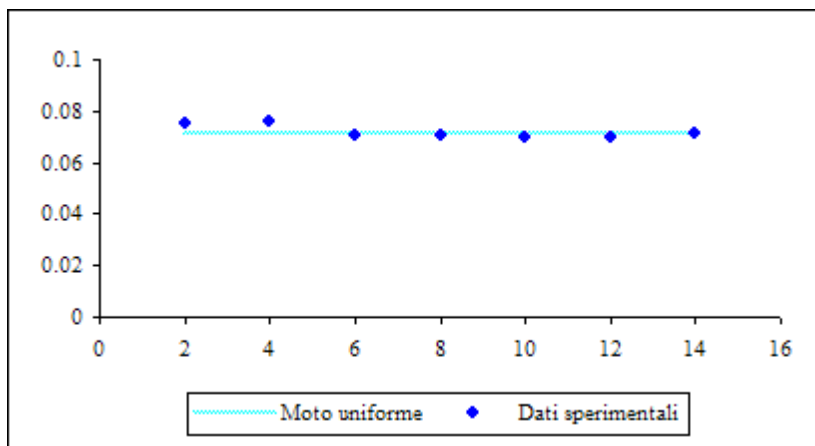


Prova 20 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	1.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
7.12	7.15	59	7.74

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.18	47.72	7.54	7.00	0.551	0.0438	0.964	0.0350
2	39.86	47.42	7.56	6.97	0.551	0.0439	0.960	0.0348
3	40.30	47.32	7.02	8.08	0.540	0.0416	1.073	0.0404
4	40.19	47.21	7.02	8.08	0.540	0.0416	1.073	0.0404
5	40.11	47.11	7.00	8.13	0.540	0.0415	1.077	0.0406
6	40.03	47.00	6.97	8.20	0.539	0.0413	1.084	0.0410
7	40.00	47.14	7.14	7.81	0.543	0.0421	1.046	0.0391

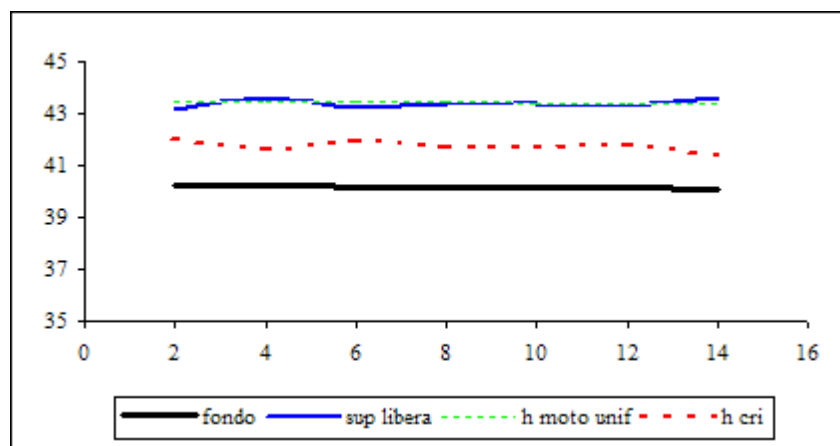
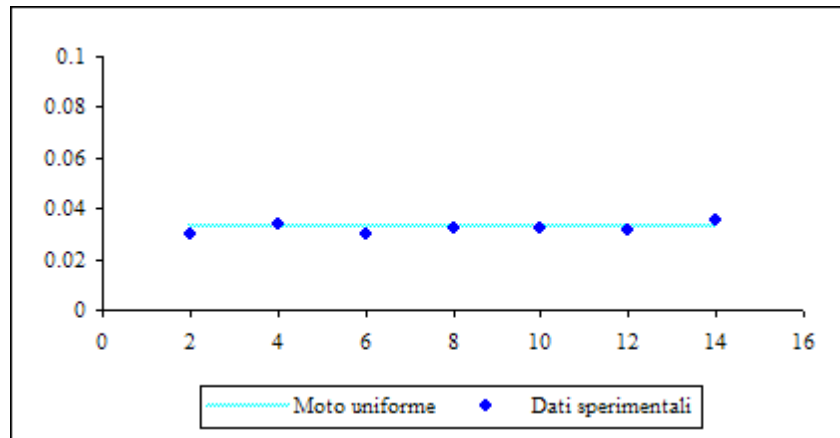


Prova 21 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	1.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.26	3.27	48	1.55

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.23	43.19	2.96	1.82	0.459	0.0206	0.784	0.0091
2	39.87	43.26	3.39	1.39	0.468	0.0232	0.639	0.0069
3	40.34	43.37	3.03	1.73	0.461	0.0211	0.757	0.0087
4	40.21	43.45	3.24	1.52	0.465	0.0223	0.684	0.0076
5	40.12	43.33	3.21	1.55	0.464	0.0221	0.694	0.0077
6	40.02	43.17	3.15	1.61	0.463	0.0218	0.714	0.0080
7	39.98	43.52	3.54	1.27	0.471	0.0241	0.599	0.0064

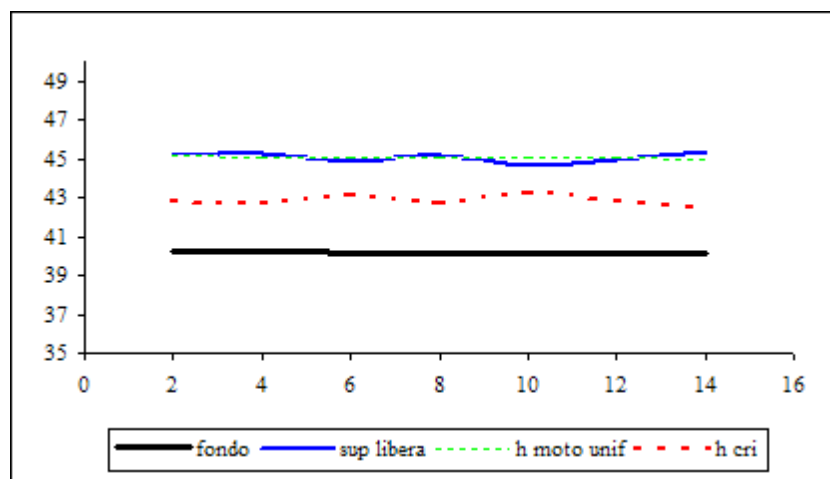
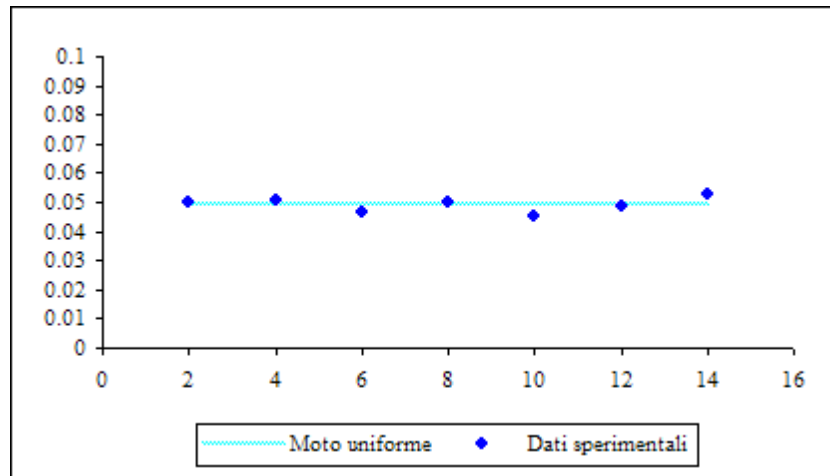


Prova 22 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	1.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
4.90	4.91	51	2.66

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.22	45.21	4.99	2.56	0.500	0.0319	0.716	0.0128
2	39.88	44.92	5.04	2.51	0.501	0.0322	0.705	0.0125
3	40.33	44.98	4.65	2.95	0.493	0.0302	0.796	0.0147
4	40.21	45.21	5.00	2.55	0.500	0.0320	0.714	0.0127
5	40.12	44.65	4.53	3.10	0.491	0.0295	0.828	0.0155
6	40.03	44.89	4.86	2.70	0.497	0.0313	0.745	0.0135
7	39.99	45.28	5.29	2.28	0.506	0.0335	0.656	0.0114

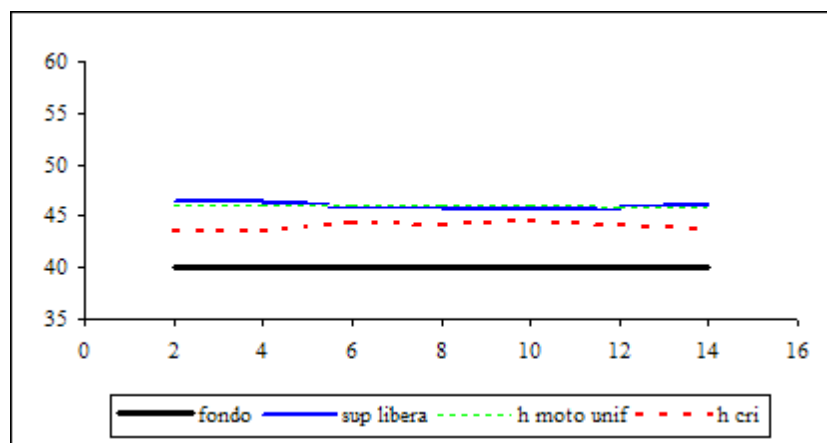
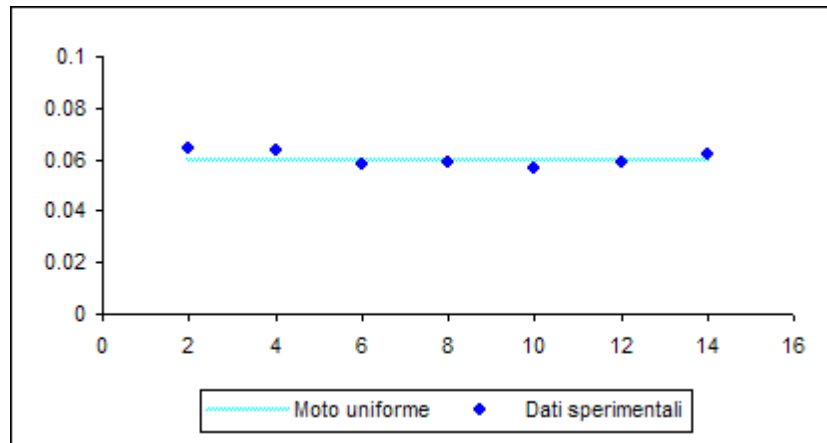


Prova 23 – $d_{50}=3.0$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	1.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
5.97	5.96	57	3.95

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	46.49	6.40	3.50	0.528	0.0388	0.739	0.0175
2	39.87	46.24	6.37	3.53	0.527	0.0386	0.745	0.0177
3	40.32	46.10	5.78	4.29	0.516	0.0359	0.861	0.0214
4	40.21	46.09	5.88	4.15	0.518	0.0364	0.840	0.0207
5	40.13	45.82	5.69	4.43	0.514	0.0354	0.882	0.0221
6	40.05	45.92	5.87	4.16	0.517	0.0363	0.842	0.0208
7	39.98	46.22	6.24	3.68	0.525	0.0380	0.768	0.0184

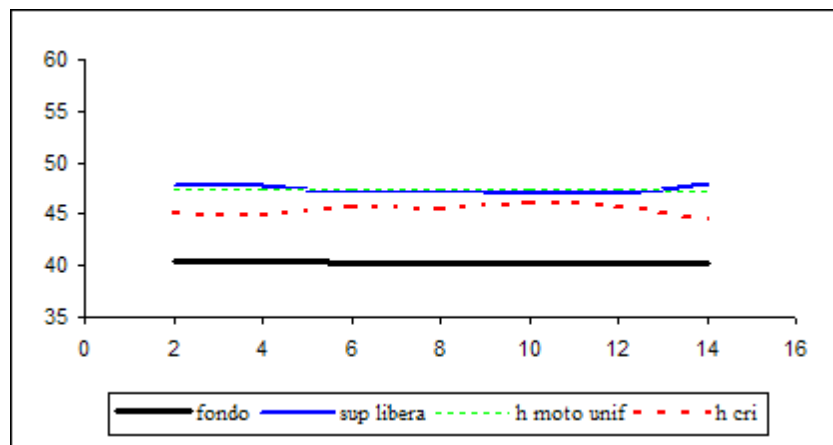
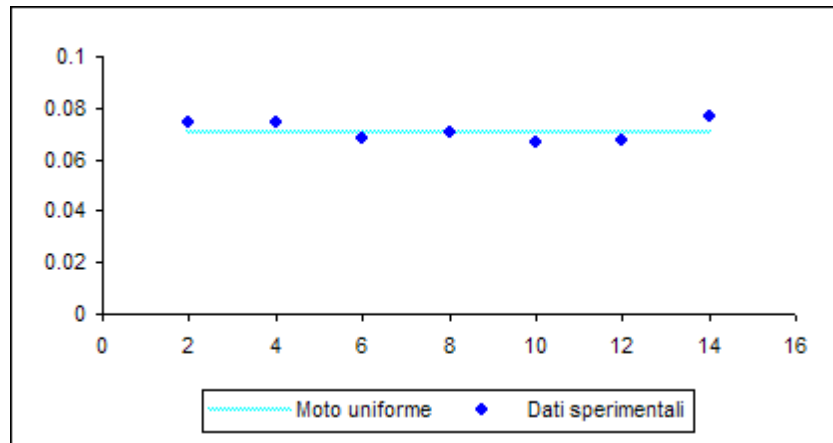


Prova 24 – $d_{50}=3.0$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	1.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
7.08	7.05	59	5.04

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.4	47.8	7.41	4.64	0.548	0.0433	0.791	0.0232
2	39.9	47.4	7.46	4.58	0.549	0.0435	0.783	0.0229
3	40.3	47.2	6.85	5.43	0.537	0.0408	0.890	0.0272
4	40.3	47.3	7.04	5.14	0.541	0.0417	0.855	0.0257
5	40.1	46.8	6.69	5.69	0.534	0.0401	0.923	0.0285
6	40.0	46.8	6.77	5.56	0.535	0.0405	0.906	0.0278
7	40.0	47.7	7.67	4.33	0.553	0.0444	0.751	0.0217

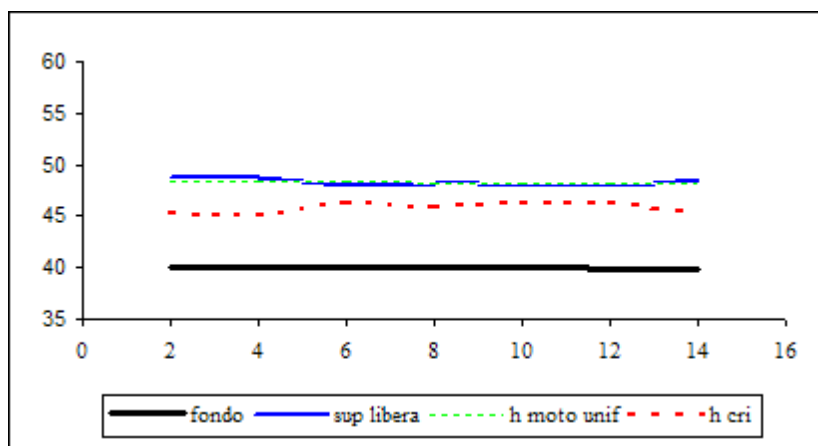
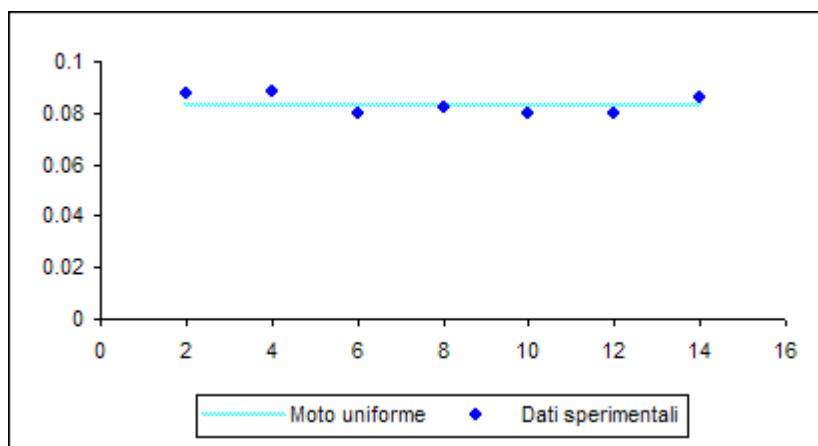


Prova 25 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	1.00

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
8.28	8.29	58	5.74

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40	49	8.75	5.20	0.575	0.0487	0.771	0.0260
2	40	49	8.82	5.12	0.576	0.0490	0.762	0.0256
3	40	48	8.01	6.21	0.560	0.0458	0.880	0.0310
4	40	48	8.25	5.85	0.565	0.0467	0.842	0.0293
5	40	48	8.00	6.22	0.560	0.0457	0.882	0.0311
6	40	48	7.96	6.28	0.559	0.0456	0.889	0.0314
7	40	49	8.61	5.37	0.572	0.0482	0.790	0.0269

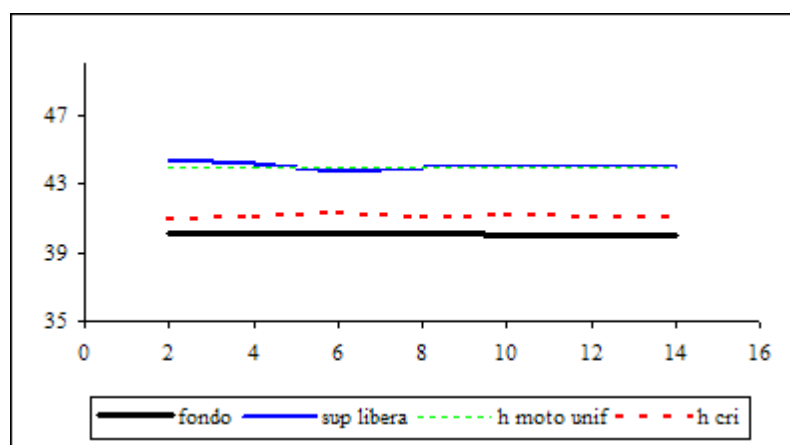
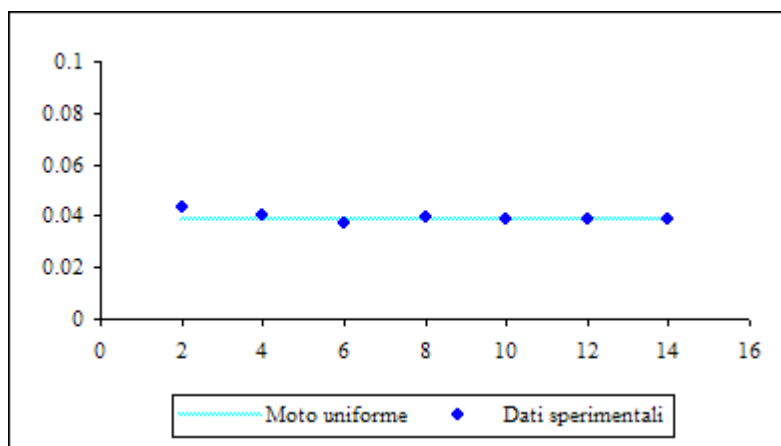


Prova 26 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	5
i	%	0.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
3.90	3.88	52	1.02

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	44.41	4.32	0.85	0.486	0.0284	0.444	0.0043
2	39.89	43.95	4.06	0.97	0.481	0.0270	0.488	0.0048
3	40.32	44.02	3.7	1.16	0.474	0.0250	0.561	0.0058
4	40.15	44.09	3.94	1.03	0.479	0.0263	0.510	0.0051
5	40.03	43.88	3.85	1.07	0.477	0.0258	0.528	0.0054
6	40.01	43.92	3.91	1.04	0.478	0.0262	0.516	0.0052
7	39.98	43.89	3.91	1.04	0.478	0.0262	0.516	0.0052

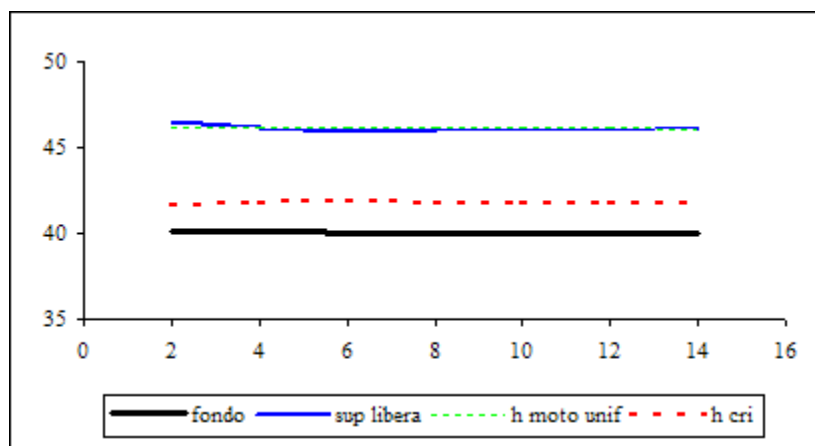
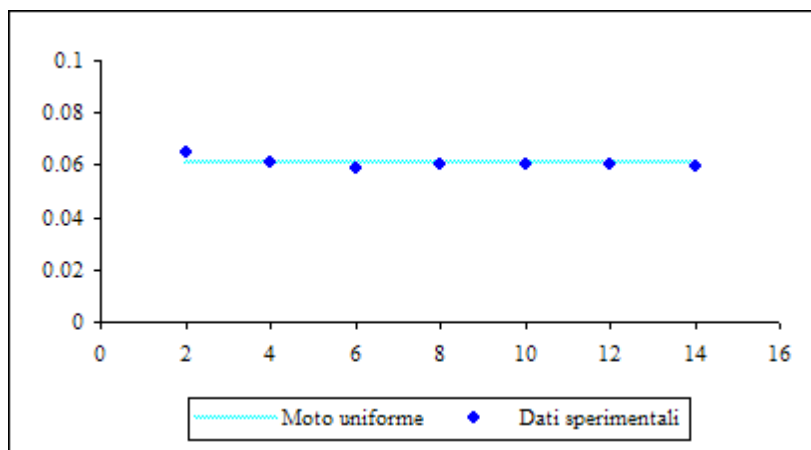


Prova 27 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	10
i	%	0.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
6.01	6.09	52	1.73

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.07	46.54	6.47	1.52	0.529	0.0391	0.485	0.0076
2	39.86	45.98	6.12	1.70	0.522	0.0375	0.527	0.0085
3	40.35	46.21	5.86	1.85	0.517	0.0363	0.563	0.0093
4	40.20	46.22	6.02	1.76	0.520	0.0370	0.540	0.0088
5	40.11	46.15	6.04	1.75	0.521	0.0371	0.538	0.0087
6	40.04	46.08	6.04	1.75	0.521	0.0371	0.538	0.0087
7	39.98	45.97	5.99	1.78	0.520	0.0369	0.544	0.0089

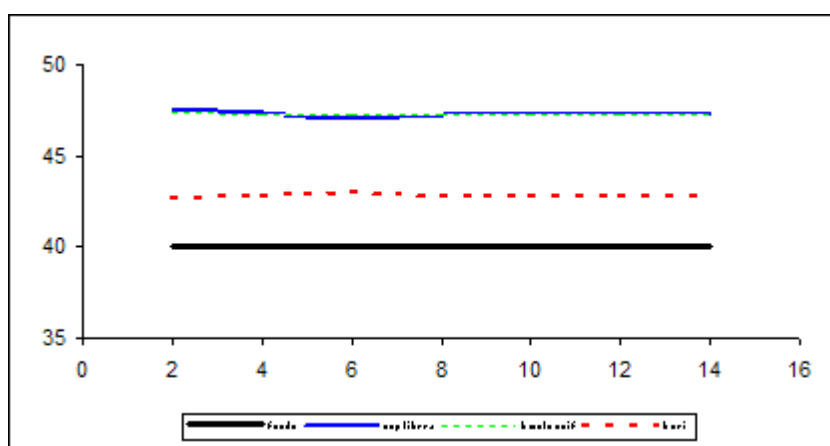
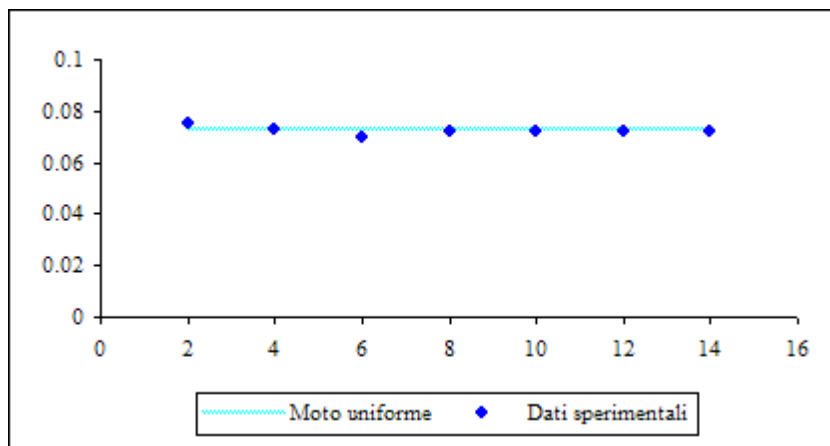


Prova 28 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	15
i	%	0.50

h _{med}	h _u	K _s	y _{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
7.19	7.25	60	2.75

Rilievo	z _f	z _s	h	y _{cr}	P	R _{Hf}	Fr	E _k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.07	47.56	7.49	2.56	0.550	0.0436	0.584	0.0128
2	39.85	47.13	7.28	2.70	0.546	0.0427	0.610	0.0135
3	40.32	47.31	6.99	2.93	0.540	0.0414	0.648	0.0147
4	40.21	47.42	7.21	2.76	0.544	0.0424	0.618	0.0138
5	40.11	47.32	7.21	2.76	0.544	0.0424	0.618	0.0138
6	40.05	47.25	7.20	2.77	0.544	0.0424	0.620	0.0138
7	39.99	47.21	7.22	2.75	0.544	0.0424	0.617	0.0137

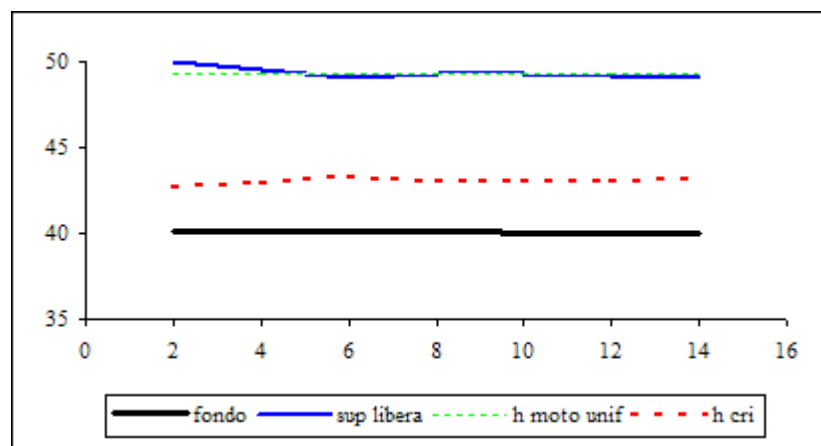
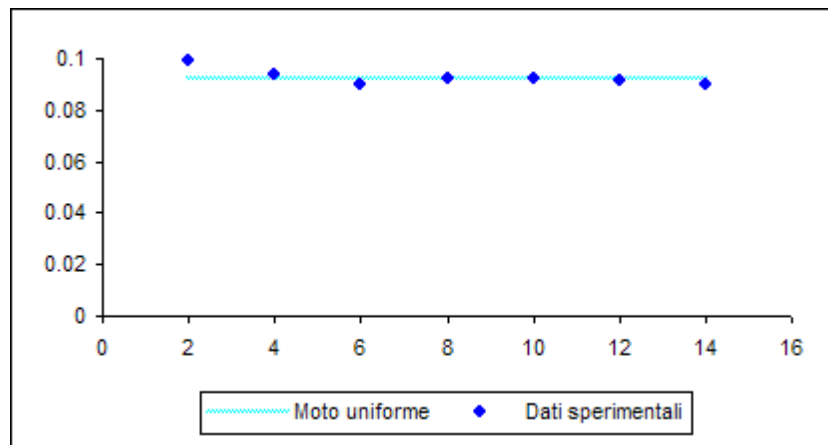


Prova 29 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	20
i	%	0.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
9.29	9.24	56	2.96

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.09	50.03	9.94	2.58	0.599	0.0531	0.509	0.0129
2	39.89	49.3	9.41	2.88	0.588	0.0512	0.553	0.0144
3	40.32	49.34	9.02	3.13	0.580	0.0497	0.589	0.0157
4	40.15	49.37	9.22	3.00	0.584	0.0505	0.570	0.0150
5	40.03	49.23	9.20	3.01	0.584	0.0504	0.572	0.0151
6	40.01	49.19	9.18	3.02	0.584	0.0503	0.574	0.0151
7	39.98	49.01	9.03	3.13	0.581	0.0498	0.588	0.0156



Prova 30 – $d_{50}=0.25$ – SEZIONE RETTANGOLARE

Q	l/s	25
i	%	0.50

h_{med}	h_u	K_s	y_{cr}
cm	cm	$m^{1/3} s^{-1}$	cm
10.54	10.65	57	3.50

Rilievo	z_f	z_s	h	y_{cr}	P	R_{Hf}	Fr	E_k
	cm	cm	cm	cm	m	m		
1	40.06	51.61	11.55	2.98	0.631	0.0586	0.508	0.0149
2	39.74	50.7	10.96	3.31	0.619	0.0566	0.550	0.0166
3	40.35	50.81	10.46	3.64	0.609	0.0549	0.590	0.0182
4	40.12	50.76	10.64	3.52	0.613	0.0556	0.575	0.0176
5	40.03	50.46	10.43	3.66	0.609	0.0548	0.592	0.0183
6	40.01	50.47	10.46	3.64	0.609	0.0549	0.590	0.0182
7	39.98	50.26	10.28	3.77	0.606	0.0543	0.605	0.0188

