



Università della
Calabria



Politecnico di Bari



Università degli Studi
della Basilicata



Università del
Salento

***Dottorato di Ricerca in Ingegneria Idraulica
per l'Ambiente e il Territorio - XXI Ciclo***

*Settore Scientifico – Disciplinare ICAR/02
(Costruzioni Idrauliche, Marittime e Idrologia)*

Dissertazione per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca

TRACIMAZIONE DI DIGHE COSTIERE E INONDAZIONE

dott. ing. Caterina Ricottilli

Coordinatore

prof. ing. Paolo Veltri

Supervisor:

prof. ing. Giuseppe Frega

prof. ing. Roberto G. Tomasicchio

Rende Novembre 2008

INDICE

ELENCO DELLE FIGURE	v
ELENCO DELLE TABELLE	xxiii
SOMMARIO	xxviii

Capitoli

1. INTRODUZIONE	1
1.1 Obiettivi dello studio.....	2
2. I FENOMENI DI TRACIMAZIONE E INONDAZIONE	4
2.1 Generalità sul fenomeno di tracimazione di una struttura costiera.....	4
2.2 Valori limite della portata di tracimazione.....	7
2.3 Studi esistenti sul fenomeno di tracimazione e inondazione di dighe costiere.....	10
2.4 Formule empiriche per il calcolo della portata di tracimazione...	14
2.5 Parametri da cui dipende la portata di tracimazione.....	16
2.5.1 Altezza d'onda e periodo.....	16
2.5.2 Ripidità dell'onda e tipo di frangimento.....	17
2.5.3 Altezza di risalita dell'onda e quota di sommità.....	18
2.5.4 Scabrezza, profondità al piede,angolo di incidenza, presenza della berma o di muri verticali.....	20
3. PROCEDURA SPERIMENTALE	21
3.1 Apparato sperimentale.....	21

3.2	Taratura degli strumenti.....	25
3.2.1	Taratura del misuratore di portata.....	25
3.2.2	Taratura delle sonde e del misuratore di risalita dell'onda.....	29
3.3	Esperimenti di tracimazione.....	31
3.4	Esperimenti di tracimazione e inondazione combinati.....	40
3.5	Probabilità di tracimazione.....	46
4.	IL MODELLO NUMERICO.....	52
4.1	Introduzione.....	52
4.2	Equazioni del modello di interazione onda-corrente.....	53
4.2.1	Equazione di continuità mediata rispetto al tempo.....	57
4.2.2	Equazione del moto mediata rispetto al tempo.....	59
4.2.3	Equazione di bilancio dell'energia dell'onda.....	60
4.3	Procedura di calcolo.....	64
4.4	Modello probabilistico per la stima della portata di tracimazione.....	66
4.5	Formula empirica per il calcolo della portata di tracimazione.....	70
5.	CONFRONTO TRA IL RISULTATO OTTENUTO CON IL MODELLO NUMERICO E IL RISULTATO SPERIMENTALE.....	73
5.1	Sensitività del modello numerico.....	73
5.2	Confronto tra i parametri statistici di risalita e tracimazione dell'onda.....	80

5.3 Confronto tra le grandezze nella propagazione dell'onda da largo a riva.....	85
---	----

6. APPLICAZIONE E VERIFICA DI ALCUNE FORMULE

EMPIRICHE ESISTENTI IN LETTERATURA.....	93
6.1 La formula di Owen (1980).....	93
6.2 La formula di van der Meer (2002).....	95
6.3 La formula di Schüttrumpf (2001).....	97
6.4 Il fenomeno combinato di tracimazione e inondazione delle dighe costiere, la formula suggerita da EurOtop (2007).....	99
6.5 Confronto tra il risultato sperimentale e il risultato empirico.....	100
6.5.1 Confronto del risultato sperimentale con il risultato ottenuto applicando la formula di Owen (1980).....	101
6.5.2 Confronto del risultato sperimentale con il risultato ottenuto applicando la formula di van der Meer(2002).....	104
6.5.3 Confronto del risultato sperimentale con il risultato ottenuto applicando la formula di Schüttrumpf (2001)....	108
6.5.4 Confronto del risultato sperimentale con il risultato ottenuto applicando la formula suggerita da EurOtop (2007) per il caso di sommergenza negativa $R_c < 0$	112
6.6 Sintesi dei risultati.....	115
6.6.1 Sommergenza positiva e nulla: $R_c \geq 0$	116
6.6.2 Sommergenza negativa: $R_c < 0$	118
6.6.3 Sommergenza positiva, nulla e negativa: $R_c > 0$, $R_c = 0$, $R_c < 0$	121

7. CONCLUSIONI.....	124
7.1 Sviluppi futuri.....	127

Appendici

A. SENSITIVITÀ DEL MODELLO NUMERICO AI PARAMETRI EMPIRICI DI INPUT.....	128
B. VARIAZIONI <i>CROSS-SHORE</i> CALCOLATE E MISURATE...	155
BIBLIOGRAFIA.....	264

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 2.1:	Il fenomeno di tracimazione dell'onda sul Samphire Hoe seawall, UK, (da CLASH project, www.clash-eu.org (2001)).....	5
Figura 2.2.:	possibili scenari per il fenomeno di tracimazione e inondazione di una diga costiera.....	6
Figura 2.3:	Rappresentazione grafica dell'altezza d'onda, dell'altezza di risalita e dell'altezza della cresta della struttura.....	19
Figura 3.1:	Apparato Sperimentale.....	22
Figura 3.2:	Dimensioni dell'apparato sperimentale.....	22
Figura 3.3:	Disposizione delle sonde G1-G7 in canaletta.....	24
Figura 3.4:	Sistema di riferimento adottato per condurre gli esperimenti.....	24
Figura 3.5(a):	Andamento temporale dei valori di portata letti dal misuratore (R) e della variazione di livello d'acqua all'interno del bacino di raccolta per 4 test di taratura.....	27
Figura 3.5(b):	Andamento temporale dei valori di portata letti dal misuratore (R) e della variazione di livello d'acqua all'interno del bacino di raccolta per 4 test di taratura.....	28
Figura 3.6:	Correlazione tra i valori di portata letti dal misuratore e i valori pompati e misurati.....	29
Figura 3.7:	Esempio di curva di taratura per il misuratore di risalita dell'onda.....	31
Figura 3.8:	Generatore di onde irregolari utilizzato durante gli esperimenti.....	32
Figura 3.9:	Possibili situazioni per il calcolo di H	45

Figura 3.10:	Andamento della portata di tracimazione e inondazione q_o misurata in funzione del tirante H_I	46
Figura 3.11:	Confronto tra i valori di probabilità di tracimazione misurati e calcolati basati sul valore $e = 3$ per $K = 2 + 0.5/R_*^3$ e $K = 2$	48
Figura 3.12:	Confronto tra i valori di probabilità di tracimazione misurati e calcolati basati sul valore $e = 4$ per $K = 2 + 0.5/R_*^3$ e $K = 2$	49
Figura 3.13:	Confronto tra i valori di probabilità di tracimazione misurati e calcolati basati sul valore $e = 4.5$ per $K = 2 + 0.5/R_*^3$ e $K = 2$	50
Figura 3.14:	Confronto tra i valori di probabilità di tracimazione misurati e calcolati basati sul valore $e = 5$ per $K = 2 + 0.5/R_*^3$ e $K = 2$	51
Figura 4.1:	Rappresentazione schematica delle grandezze considerate nel modello numerico CSHOREP per lo studio dei fenomeni di tracimazione e inondazione di strutture di difesa costiera.....	54
Figura 4.2:	Due possibili condizioni di livello d'acqua sulla cresta della struttura.....	65
Figura 4.3:	Schema del modello probabilistico per il calcolo della risalita dell'onda.....	67
Figura 5.1:	Confronto tra i valori del livello $(S + \overline{\eta}_r)$ misurati sperimentalmente e calcolati con il modello numerico	81
Figura 5.2:	Confronto tra i valori della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera misurati sperimentalmente dal misuratore di risalita dell'onda σ_m e calcolati con il modello numerico σ_r	82

Figura 5.3:	Confronto tra i valori della probabilità di tracimazione P_o misurati sperimentalmente e calcolati con il modello numerico	83
Figura 5.4:	Confronto tra i valori di portata di tracimazione misurati sperimentalmente, q_m e calcolati con il modello numerico, q_o	84
Figura 5.5:	Confronto tra i valori di portata di tracimazione misurati sperimentalmente q_m e calcolati con il modello numerico utilizzando una formula empirica q_e	85
Figura 5.6:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 2.....	89
Figura 5.7:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 41.....	90
Figura 5.8:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 94.....	91
Figura 5.9:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 103.....	92
Figura 6.1:	Confronto tra la portata di tracimazione misurata sperimentalmente e la portata di tracimazione calcolata con la formula di Owen nel caso di sommergenza positiva $R_c > 0$	104

Figura 6.2:	Confronto tra la portata di tracimazione misurata sperimentalmente e la portata di tracimazione calcolata con la formula di van der Meer nel caso di sommergenza positiva $R_c > 0$	108
Figura 6.3:	Confronto tra la portata di tracimazione misurata sperimentalmente e la portata di tracimazione calcolata con la formula di Schüttrumpf nel caso di sommergenza positiva e nulla $R_c \geq 0$	112
Figura 6.4:	Confronto tra la portata di tracimazione misurata sperimentalmente e la portata di tracimazione calcolata con la formula suggerita da EurOtop (2007) nel caso di sommergenza negativa $R_c < 0$	114
Figura 6.5:	Andamento dei dati sperimentali di portata di tracimazione in caso di sommergenza positiva e nulla basato sull'equazione (6.17).....	117
Figura 6.6:	Andamento dei dati sperimentali di portata di tracimazione in caso di sommergenza negativa basato sull'equazione (6.18 a).....	119
Figura 6.7:	Andamento dei dati sperimentali di portata di tracimazione in caso di sommergenza negativa basato sull'equazione (6.18 b).....	120
Figura 6.8:	Andamento dei dati sperimentali di portata di tracimazione in caso di sommergenza negativa basato sull'equazione (6.19).....	121
Figura 6.9:	Andamento dei dati sperimentali di portata di tracimazione in caso di sommergenza positiva, nulla e negativa basato sull'equazione (6.20).....	122
Figura A.1:	$\gamma=0.7; \delta_r=0.02 \text{ m}; f_b=0.0$	151
Figura A.2	$:\gamma=0.8; \delta_r=0.02 \text{ m}; f_b=0.0$	152

Figura A.3:	$\gamma=0.8; \delta_r=0.01 \text{ m}; f_b=0.0$	153
Figura A.4:	$\gamma=0.8; \delta_r=0.02 \text{ m}; f_b=0.01$	154
Figura B.1:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 1.....	157
Figura B.2:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 2.....	158
Figura B.3:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 3.....	159
Figura B.4:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 4.....	160
Figura B.5:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 5.....	161
Figura B.6:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 6.....	162
Figura B.7:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 7.....	163
Figura B.8:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della	164

	superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 8.....	
Figura B.9:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 9.....	165
Figura B.10:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 10.....	166
Figura B.11:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 11.....	167
Figura B.12:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 12.....	168
Figura B.13:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 13.....	169
Figura B.14:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 14.....	170
Figura B.15:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 15.....	171
Figura B.16:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 16.....	172

Figura B.17:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 17.....	173
Figura B.18:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 18.....	174
Figura B.19:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 19.....	175
Figura B.20:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 20.....	176
Figura B.21:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 21.....	177
Figura B.22:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 22.....	178
Figura B.23:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 23.....	179
Figura B.24:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 24.....	180

Figura B.25:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 25.....	181
Figura B.26:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 26.....	182
Figura B.27:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 27.....	183
Figura B.28:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 28.....	184
Figura B.29:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 29.....	185
Figura B.30:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 30.....	186
Figura B.31:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 31.....	187
Figura B.32:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 32.....	188

Figura B.33:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 33.....	189
Figura B.34:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 34.....	190
Figura B.35:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 35.....	191
Figura B.36:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 36.....	192
Figura B.37:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 37.....	193
Figura B.38:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 38.....	194
Figura B.39:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 39.....	195
Figura B.40:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 40.....	196

Figura B.41:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 41.....	197
Figura B.42:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 42.....	198
Figura B.43:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 43.....	199
Figura B.44:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 44.....	200
Figura B.45:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 45.....	201
Figura B.46:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 46.....	202
Figura B.47:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 47.....	203
Figura B.48:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 48.....	204

Figura B.49:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 49.....	205
Figura B.50:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 50.....	206
Figura B.51:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 51.....	207
Figura B.52:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 52.....	208
Figura B.53:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 53.....	209
Figura B.54:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 54.....	210
Figura B.55:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 55.....	211
Figura B.56:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 56.....	212

Figura B.57:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 57.....	213
Figura B.58:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 58.....	214
Figura B.59:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 59.....	215
Figura B.60:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 60.....	216
Figura B.61:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 61.....	217
Figura B.62:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 62.....	218
Figura B.63:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 63.....	219
Figura B.64:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 64.....	220

Figura B.65:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 65.....	221
Figura B.66:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 66.....	222
Figura B.67:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 67.....	223
Figura B.68:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 68.....	224
Figura B.69:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 69.....	225
Figura B.70:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 70.....	226
Figura B.71:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 71.....	227
Figura B.72:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 72.....	228

Figura B.73:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 73.....	229
Figura B.74:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 74.....	230
Figura B.75:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 75.....	231
Figura B.76:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 76	232
Figura B.77	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 77.....	233
Figura B.78:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 78.....	234
Figura B.79:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 79.....	235
Figura B.80:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 80.....	236

Figura B.81:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 81.....	237
Figura B.82:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 70.....	238
Figura B.83:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 83.....	239
Figura B.84:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 84.....	240
Figura B.85:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 85.....	241
Figura B.86:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 86.....	242
Figura B.87:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 87.....	243
Figura B.88:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 88.....	244

V

Figura B.89:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 89.....	245
Figura B.90:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 90.....	246
Figura B.91:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 91.....	247
Figura B.92:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 92.....	248
Figura B.93:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 93.....	249
Figura B.94:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 94.....	250
Figura B.95:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 95.....	251
Figura B.96:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 96.....	252

Figura B.97:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 97.....	253
Figura B.98:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 98.....	254
Figura B.99:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 99.....	255
Figura B.100:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 100.....	256
Figura B.101:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 101.....	257
Figura B.102:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 102.....	258
Figura B.103:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 103.....	259
Figura B.104:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 104.....	260

Figura B.105:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 105.....	261
Figura B.106:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 106.....	262
Figura B.107:	Variazione <i>cross-shore</i> della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 107.....	263

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 2.1:	Valori ammissibili delle portate medie di tracimazione (tradotta da Burchartch and Hughes (2003)).....	9
Tabella 2.2 (a):	Formule empiriche per il calcolo della portata di tracimazione e relative adimensionalizzazioni dei parametri Q ed R	15
Tabella 2.2 (b):	Formule empiriche per il calcolo della portata di tracimazione e relative adimensionalizzazioni dei parametri Q ed R	16
Tabella 3.1 (a):	Statistica dell'oscillazione della superficie libera misurata dalle sonde G1-G6 e valori misurati dalla sonda G1 dell'incremento di livello marino S , della profondità d'acqua d_l , del periodo di picco dello spettro T_p e del coefficiente di riflessione r . Esperimenti 1 – 27.....	35
Tabella 3.1 (b):	Statistica dell'oscillazione della superficie libera misurata dalle sonde G1-G6 e valori misurati dalla sonda G1 dell'incremento di livello marino S , della profondità d'acqua d_l , del periodo di picco dello spettro T_p e del coefficiente di riflessione r . Esperimenti 28 – 54.....	36
Tabella 3.1 (c):	Statistica dell'oscillazione della superficie libera misurata dalle sonde G1-G6 e valori misurati dalla sonda G1 dell'incremento di livello marino S , della profondità d'acqua d_l , del periodo di picco dello spettro T_p e del coefficiente di riflessione r . Esperimenti 55 – 78.....	37
Tabella 3.2 (a):	Statistica della risalita dell'onda sul pendio 1/5 ottenuta con il misuratore di risalita e valori misurati del numero totale di onde incidenti N_i ; del numero di eventi di tracimazione N_o ; della probabilità di tracimazione P_o e della portata di tracimazione media per unità di larghezza della cresta della struttura q (Esperimenti 1-36).....	38

Tabella 3.2 (b):	Statistica della risalita dell'onda sul pendio 1/5 ottenuta con il misuratore di risalita e valori misurati del numero totale di onde incidenti N_i ; del numero di eventi di tracimazione N_o ; della probabilità di tracimazione P_o e della portata di tracimazione media per unità di larghezza della cresta della struttura q (Esperimenti 37-67).....	39
Tabella 3.2 (c):	Statistica della risalita dell'onda sul pendio 1/5 ottenuta con il misuratore di risalita e valori misurati del numero totale di onde incidenti N_i ; del numero di eventi di tracimazione N_o ; della probabilità di tracimazione P_o e della portata di tracimazione media per unità di larghezza della cresta della struttura q (Esperimenti 68-78).....	40
Tabella 3.3:	Statistica dell'oscillazione della superficie libera misurata dalle sonde G1-G6 e valori misurati dalla sonda G1 dell'incremento di livello marino S , della profondità d'acqua d_1 , del periodo di picco dello spettro T_p e del coefficiente di riflessione r . Esperimenti 79 - 107.....	43
Tabella 3.4:	Statistica della risalita dell'onda sul pendio 1/5 ottenuta con il misuratore di risalita e valori misurati del numero totale di onde incidenti N_i ; della probabilità di tracimazione P_o e della portata di tracimazione media per unità di larghezza della cresta della struttura q (esperimenti 79-107).....	44
Tabella 5.1(a):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma=0.8$; $\delta_r=0.02$ m; $f_b=0$. Esperimenti 1-18.....	75
Tabella 5.1 (b):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma=0.8$; $\delta_r=0.02$ m; $f_b=0$. Esperimenti 19-36.....	76
Tabella 5.1 (c):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma=0.8$; $\delta_r=0.02$ m; $f_b=0$. Esperimenti 37-61.....	77

Tabella 5.1 (d):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma=0.8$; $\delta_r=0.02$ m; $f_b=0$. Esperimenti 62-86.....	78
Tabella 5.1 (e):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma=0.8$; $\delta_r=0.02$ m; $f_b=0$. Esperimenti 87-107.....	79
Tabella 6.1:	Valori dei coefficienti empirici a e b utilizzati nella formula di Owen	95
Tabella 6.2 (a):	Clima ondoso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di Owen (1980) per gli esperimenti di tracimazione (Esperimenti 1-36).....	102
Tabella 6.2 (b):	Clima ondoso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di Owen (1980) per gli esperimenti di tracimazione (Esperimenti 37-72).....	103
Tabella 6.3 (a):	Clima ondoso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di van der Meer (2002) per gli esperimenti di tracimazione (Esperimenti 1-36).....	106
Tabella 6.3 (b):	Clima ondoso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di van der Meer (2002) per gli esperimenti di tracimazione (Esperimenti 37-72).....	107
Tabella 6.4 (a):	Clima ondoso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di Schüttrumpf (2001) per gli esperimenti di tracimazione in caso di sommergenza positiva $R_c > 0$ e nulla $R_c = 0$. (Esperimenti 1-39).....	110

Tabella 6.4 (b):	Clima ondoso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di Schüttrumpf (2001) per gli esperimenti di tracimazione in caso di sommergenza positiva $R_c > 0$ e nulla $R_c = 0$. (Esperimenti 40-78).....	111
Tabella 6.5:	Clima ondoso, valori della sommergenza e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati con la formula di EurOtop (2007) per gli esperimenti di tracimazione e inondazione in caso di sommergenza negativa $R_c < 0$ (Esperimenti 79-107).....	113
Tabella A.1 (a):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.7$; $\delta_r = 0.02$; $f_b = 0.0$. Esperimenti 1-18.....	131
Tabella A.1 (b):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.7$; $\delta_r = 0.02$; $f_b = 0.0$. Esperimenti 19-36.....	132
Tabella A.1 (c):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.7$; $\delta_r = 0.02$; $f_b = 0.0$. Esperimenti 37-61.....	133
Tabella A.1 (d):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.7$; $\delta_r = 0.02$; $f_b = 0.0$. Esperimenti 62-86.....	134
Tabella A.1 (e):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.7$; $\delta_r = 0.02$; $f_b = 0.0$. Esperimenti 87-107.....	135
Tabella A.2 (a):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 1-18.....	136
Tabella A.2 (b):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 19-36.....	137
Tabella A.2 (c):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 37-61.....	138

Tabella A.2 (d):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 62-86.....	139
Tabella A.2 (e):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 87-107.....	140
Tabella A.3 (a):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.01$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 1-18.....	141
Tabella A.3 (b):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.01$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 19-36.....	142
Tabella A.3 (c):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.01$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 37-61.....	143
Tabella A.3 (d):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.01$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 62-86.....	144
Tabella A.3 (e):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.01$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 87-107.....	145
Tabella A.4 (a):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0.01$. Esperimenti 1-18.....	146
Tabella A.4 (b):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0.01$. Esperimenti 19-36.....	147
Tabella A.4 (c):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0.01$. Esperimenti 37-61.....	148
Tabella A.4 (d):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0.01$. Esperimenti 62-86.....	149
Tabella A.4 (e):	Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0.01$. Esperimenti 87-107.....	150

SOMMARIO

La progettazione delle strutture di difesa costiera necessita della conoscenza preliminare di tutti i fenomeni a cui l'opera può essere soggetta a causa dell'azione continua delle onde. Questo permette di definire i parametri di progetto della struttura da realizzare, con particolare attenzione all'altezza della cresta il cui valore deve essere valutato attentamente al fine di limitare il più possibile i danni nelle aree di terra poste a tergo dell'opera che possono essere interessate, durante eventi ondosi estremi, da fenomeni di inondazione conseguenti ad un'eccessiva portata di tracimazione dell'opera.

In generale, le strutture di difesa costiera sono progettate riferendosi a: un fissato valore di livello d'acqua, ammettendo limitati valori della portata di tracimazione, ipotizzando assenza di mareggiate estreme ed escursione di marea. Tuttavia può accadere che, particolari condizioni di moto ondoso, superino il livello fissato d'acqua davanti alla struttura e che quindi questa venga tracimata e inondata da una parte delle onde incidenti. Lo studio dei fenomeni di tracimazione e inondazione assume quindi importanza fondamentale.

Lo studio condotto ha riguardato l'analisi dei fenomeni di tracimazione e inondazione di una struttura costiera impermeabile con paramento lato mare inclinato, soffermandosi, in particolare, sui fenomeni che si sviluppano nel passaggio da condizioni di eccessiva tracimazione a condizioni di inondazione.

La ricerca si basa su una fase sperimentale, durante la quale sono stati eseguiti 107 esperimenti che hanno permesso di valutare il fenomeno nel

suo processo di accadimento. Successivamente, l'applicazione del modello numerico CSHOREP (Kobayashi e de los Santos (2007), basato sulle equazioni di continuità, del moto e della conservazione dell'energia dell'onda, ai dati sperimentali ha permesso di ricavare i valori di portata di tracimazione e inondazione, la variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera e della velocità, mediata rispetto alla profondità, delle onde irregolari incidenti sulla struttura in presenza di corrente in moto permanente diretta verso riva.

I risultati ottenuti hanno permesso di effettuare un primo confronto tra i risultati del modello numerico e le misure sperimentali.

In una successiva fase, sono state selezionate, dalla letteratura esistente, alcune formule empiriche che applicate ai dati sperimentali disponibili hanno permesso di effettuare un raffronto tra il risultato empirico e le misure sperimentali.

Infine, sono state proposte una serie di formule pratiche utili per la stima della portata di tracimazione.

1 INTRODUZIONE

Le strutture di difesa costiera come dighe, argini e muri di sponda litoranei sono progettate per proteggere le zone costiere e i porti dalle inondazioni considerando un livello d'acqua di progetto, che non tiene conto delle onde di burrasca, e accettando limitati valori della portata di tracimazione tali da non causare danno alla struttura stessa e alle aree a terra da essa protette. Tuttavia può accadere che il livello d'acqua di fronte alla struttura raggiunga valori tali che in presenza di mareggiare e a causa dell'escursione di marea le strutture litoranee possano essere inondate.

La tracimazione di una diga costiera è legata al fenomeno di risalita dell'onda conseguente all'impatto di questa con la struttura stessa. Se l'altezza in sommità della cresta della struttura è inferiore al livello di massima risalita dell'onda, la struttura è soggetta a tracimazione. La conseguente portata tracimante la struttura viene misurata come portata $[m^3/s]$ per unità di larghezza della struttura $[m]$.

La ricerca scientifica, negli ultimi 50 anni, ha effettuato numerosi studi per comprendere i fenomeni di tracimazione e inondazione di strutture litoranee [Kobayashi and Wurjanto (1989), Kobayashi and Raichle (1994), Waal and van der Meer (1992), van der Meer and Janssen (1995), Herbert (1996), Besley et al. (1998), Besley (1999), Hedges and Reis (1999), Goda (2000), van Gent (2001), Burchartch and Hughes (2003), Shankar and Jayaratne (2003) e Kobayashi and de los Santos (2007)].

Difatti il verificarsi dei molteplici danni causati dal collasso delle difese costiere, durante le inondazioni nei Paesi Bassi (1953), in Germania (1962), in Danimarca (1976) e recentemente negli Stati Uniti, a causa dell'uragano Katrina che il 29 agosto del 2005 ha devastato le coste della Louisiana,

Mississippi e Alabama, dimostra come la maggior parte delle strutture di difesa siano progettate non tenendo in considerazione la possibilità del verificarsi di eventi ondosi estremi. Le formule di progetto esistenti, infatti, non considerano la possibile combinazione tra i fenomeni di tracimazione e di inondazione, di conseguenza tendono a sottostimare la portata di tracimazione.

Di conseguenza il fenomeno combinato di tracimazione e inondazione delle strutture di difesa costiera necessita di ulteriori approfondimenti.

Schüttrumpf and Oumeraci (2005) hanno svolto i primi studi sul fenomeno combinato di tracimazione e inondazione. L'apertura di una breccia su una diga costiera a causa della combinazione dei fenomeni di tracimazione e inondazione è stato studiato da Wang and Bowles (2006), D'Eliso et al. (2006) e Stanczak et al. (2006).

1.1 Obiettivi dello studio

Gli obiettivi della ricerca sono quelli di studiare i fenomeni di tracimazione e inondazione, e la combinazione tra essi, nel caso di struttura costiera impermeabile con paramento lato mare inclinato, per osservare e parametrizzare i fenomeni a cui va soggetta la struttura nel caso di elevati livelli d'acqua di fronte alla struttura. A tal fine sono stati condotti 107 esperimenti in laboratorio utilizzando una struttura liscia e impermeabile con un paramento lato mare di pendenza 1/5 posata su una spiaggia con pendenza 1/34.2. I risultati sperimentali ottenuti da 78 esperimenti di tracimazione e 29 esperimenti di inondazione sono stati utilizzati per calibrare e verificare il modello numerico CSHOREP per onde irregolari di Kobayashi and de los Santos (2007), che è stato recentemente esteso per includere gli effetti dell'interazione tra onda e corrente (Farhadzaded et al., 2007).

Le misure sperimentali sono state inoltre utilizzate per verificare le formule empiriche di Owen (1980), van der Meer (2002), Schüttrumpf (2001) ed EurOtop Manual (2007) e per ricavare una serie di nuove formule pratiche utili per il calcolo della portata di tracimazione. Lo studio è articolato come descritto di seguito.

Nel Capitolo 2 viene descritto il fenomeno della tracimazione delle dighe di difesa costiera, con riferimento ai parametri che entrano in gioco nel fenomeno. Viene inoltre esposto lo stato dell'arte attuale.

Nel Capitolo 3 è descritto l'apparato sperimentale utilizzato, la taratura dello stesso e spiegata la procedura utilizzata per condurre gli esperimenti. Sono inoltre esposti i risultati sperimentali per i due gruppi di esperimenti (tracimazione ed inondazione).

Il Capitolo 4 contiene la spiegazione del modello numerico utilizzato e vengono descritti i risultati ottenuti con esso.

Nel Capitolo 5 viene mostrato il confronto tra il risultato ottenuto dalle misure sperimentali e quello conseguito applicando il modello numerico.

Nel Capitolo 6 sono esposte le formule empiriche selezionate dalla letteratura ed è mostrato il confronto effettuato tra il risultato empirico, e il risultato sperimentale. Si presentano quindi una serie di formule pratiche che consentono il calcolo della portata di tracimazione e inondazione.

Infine nel Capitolo 7 sono presentate le conclusioni.

I grafici e le tabelle relativi alla sensitività del modello numerico ai parametri di input e i grafici che riportano la variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera e della velocità orizzontale sono allegati rispettivamente nelle Appendici A e B.

2 IL FENOMENO DI TRACIMAZIONE E INONDAZIONE

Nel presente capitolo si descrivono i fenomeni di tracimazione e inondazione di una diga costiera e lo stato dell'arte attuale.

2.1 Generalità sul fenomeno di tracimazione di una struttura costiera

La tracimazione di una struttura è un fenomeno di interazione tra moto ondoso e struttura e consiste nel superamento dell'opera da parte delle onde. Tale superamento inizia a verificarsi a partire da un certo valore di altezza delle onde incidenti e varia con la quota di sommità della struttura R_c , misurata rispetto al livello marino, oltre che con lo stato di mare. Tra i parametri fondamentali che descrivono il fenomeno, ha una certa importanza il rapporto tra la quota di sommità e l'altezza d'onda significativa, R_c/H_s . Assume particolare importanza anche la geometria del paramento e della struttura in cresta.

Inoltre se il livello marino di fronte alla struttura è più alto della cresta della struttura stessa quest'ultima viene inondata.

L'accettazione o meno di una certa portata di tracimazione dipende ovviamente dalle funzioni svolte dalla struttura di difesa, in quanto quest'ultima può essere, nella sua sommità, sede di una passeggiata o contenere, subito a tergo, una banchina d'approdo o altri elementi di costruzione suscettibili a danno in presenza di tracimazione.

Altra caratteristica del fenomeno sta nella non uniformità della portata tracimante, funzione variabile nel tempo e nello spazio, difatti, durante una

mareggiata, solo una parte delle onde presenti contribuisce al fenomeno di tracimazione della struttura da parte del mare. Non è quindi possibile descrivere il fenomeno onda per onda ma è possibile dedurre il valore medio della portata tracimata in m^3 / s per m di lunghezza della cresta.

La Figura 2.1 mostra un esempio del fenomeno di tracimazione di una struttura litoranea da parte dell'onda.



Figura 2.1: Il fenomeno di tracimazione dell'onda sul Samphire Hoe seawall, UK, (da CLASH project, www.clash-eu.org (2001))

E' possibile distinguere quattro differenti scenari di tracimazione e inondazione come mostrato in Figura 2.2 :

- a) **Tracimazione della struttura per $R_c > 0$:** E' la condizione tipica di progetto delle strutture costiere. Il livello marino è inferiore all'altezza della sommità della struttura e il fenomeno di tracimazione è legato solo alla presenza di onde che superano la cresta della diga.

- b) **Tracimazione della struttura per $R_c=0$:** Per questo tipo di scenario il livello marino è uguale all'altezza della sommità della struttura e il fenomeno di tracimazione è legato esclusivamente alla presenza di onde.

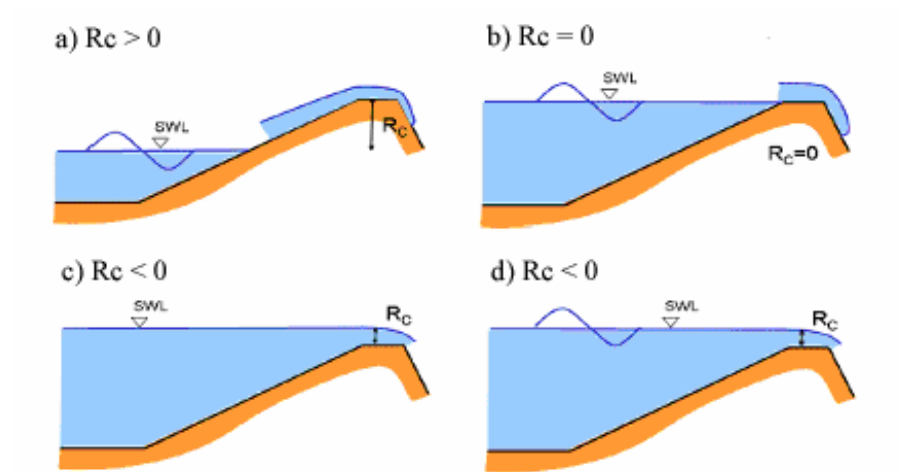


Figura 2.2.: possibili scenari per il fenomeno di tracimazione e inondazione di una diga costiera

- c) **Inondazione della struttura per $R_c < 0$:** Il livello marino è più elevato dell'altezza della sommità della struttura di conseguenza l'acqua inonda la struttura. Non vi è presenza di onde in questo scenario.
- d) **Inondazione e tracimazione della struttura per $R_c < 0$:** Il livello marino è più elevato dell'altezza della sommità della struttura e vi è presenza di onde che inondano la struttura. Per questo scenario si hanno contemporaneamente i fenomeni di tracimazione e di inondazione della struttura costiera.

2.2 Valori limite della portata di tracimazione

Se una struttura costiera è soggetta ad attacchi ondosì la portata d'acqua che può tracimare e/o inondare la struttura stessa può variare in modo significativo nel tempo, nello spazio e in base alle condizioni di moto ondosì che si presentano. È evidente quindi che la portata d'acqua tracimante dipende non solo dalle caratteristiche dell'onda legate alle condizioni ambientali, quali l'altezza d'onda, il periodo e il livello marino, ma anche dalla geometria della struttura e dalle proprietà del materiale con cui essa è costruita. Di conseguenza il fenomeno di tracimazione di una struttura costiera è molto complesso da studiare, essendo la portata che ne consegue funzione non lineare di più parametri.

La variazione temporale della portata tracimante una struttura è difficile da misurare e quantificare con esattezza in laboratorio, di conseguenza essa è generalmente espressa in termini di portata media per unità di larghezza della cresta della struttura costiera.

Per stimare la portata di tracimazione ammissibile su diverse tipologie di dighe costiere, molti ricercatori hanno studiato l'impatto del volume d'acqua associato alla portata di tracimazione su diversi tipi di ostacoli posizionati sopra una struttura tracimabile.

Goda (2000) sviluppò delle linee guida sul fenomeno di tracimazione di una struttura di difesa costiera effettuando uno studio, su un prototipo, consistente in una serie di misure ed osservazioni dell'impatto di un certo volume d'acqua su differenti oggetti situati sulla cresta di una barriera frangiflutti. Queste linee guida sono state adottate dal *Japanese code of practice* e dal *Coastal Engineering Manual (CEM)* (Burchartch and Hughes, 2003).

La Tabella 2.1 mostra i limiti ammissibili della portata di tracimazione q per le tipologie tipiche di difesa costiera progettate per garantire la sicurezza di oggetti e persone.

I valori riportati in Tabella 2.1 hanno carattere di linee guida in quanto a parità di portata tracimata l'intensità degli effetti è ancora dipendente dalla geometria del paramento e dalla forma del muro paraonde del coronamento, se esiste, senza trascurare il fatto che il massimo valore di tale portata può essere molto più grande del valore medio considerato nei manuali di progettazione.

m ³ /s per m	Sicurezza del traffico		Sicurezza delle strutture				litri/s per m
	Veicoli	Pedoni	Costruzioni	Difese di argini	Dighe coperte da vegetazione	Rivestimenti di terrapieni	
10 ⁰							1000
10 ⁻¹	Assenza di sicurezza a qualsiasi velocità	Molto pericoloso	Danni alla struttura	Danni anche se interamente protetti	Danni	Danni anche per lungomari pavimentati	200
						Danni per lungomari non pavimentati	50
10 ⁻²	Assenza di sicurezza a qualsiasi velocità	Molto pericoloso	Danni alla struttura	Danni se la scarpa a tergo non è protetta	Danni		20
10 ⁻³	Assenza di sicurezza a qualsiasi velocità	Molto pericoloso	Danni alla struttura	Danni se la cresta non è protetta	Inizio di danno		2
10 ⁻⁴	Da escludere il parcheggio dovunque	Pericoloso per opere coperte da vegetazione e per le dighe a berma orizzontale	Danni alla struttura	Nessun danno	Nessun danno	Nessun danno	0.1
		Pericoloso per opere a parete					
10 ⁻⁵	Da escludere il parcheggio per dighe a parete verticale	Percorso difficoltoso ma non pericoloso	Qualche danno alle opere accessorie	Nessun danno	Nessun danno	Nessun danno	0.02
	Non percorribile con sicurezza alle alte velocità						
10 ⁻⁶							0.004
10 ⁻⁶	Non percorribile con sicurezza alle alte velocità	Percorso bagnato non difficoltoso					0.001
10 ⁻⁷	Percorribile con sicurezza a tutte le velocità		Nessun danno				0.0001

Tabella 2.1: Valori ammissibili delle portate medie di tracimazione (tradotta da Burchartch and Hughes (2003))

2.3 Studi esistenti sul fenomeno di tracimazione e inondazione di dighe costiere

I metodi disponibili per stimare la portata di tracimazione consistono in modelli numerici, esperimenti specifici condotti in sito o in laboratorio e formule empiriche. La maggior parte dei modelli numerici sono stati verificati utilizzando dati sperimentali (più comunemente ottenuti con modelli a piccola scala condotti utilizzando determinate tipologie di strutture e limitate condizioni di moto ondoso). I modelli fisici permettono una rappresentazione visiva e diretta del fenomeno di tracimazione e inondazione di una diga costiera attraverso l'utilizzo di prototipi, opportunamente scalati, grazie ai quali riprodurre le condizioni che regolano il fenomeno da analizzare.

Esistono, infinite possibili combinazioni tra i parametri che entrano in gioco per il calcolo della portata di tracimazione e inondazione di una struttura costiera. Nonostante i numerosi studi effettuati per studiare il fenomeno, nessuno di questi riesce a coprire tutte le situazioni possibili, ognuno riguarda uno o pochi casi specifici. Molti autori hanno ricavato relazioni analitiche che legano la portata di tracimazione alle caratteristiche di moto ondoso e alla geometria e alle proprietà dei materiali costituenti la struttura di difesa costiera.

Una trattazione particolareggiata sulle strutture di difesa costiera, e sui parametri utilizzati nelle formule empiriche esistenti si trova in Burchartch and Hughes (2003) e in EurOtop (2007).

Gli studi su modelli fisici e numerici, condotti per comprendere il fenomeno di tracimazione da parte delle onde di una diga di difesa costiera sono numerosi.

Kobayashi and Wurjanto (1989) hanno esteso il modello numerico sviluppato precedentemente da Kobayashi et al. (1987) per analizzare il fenomeno di

tracimazione, da parte di onde monocromatiche, della cresta di una struttura costiera liscia e impermeabile di assegnata geometria.

Kobayashi and Raichle (1994) hanno condotto 12 prove di laboratorio per esaminare i processi di tracimazione da parte di onde irregolari incidenti su una struttura costiera con rivestimento grezzo di pendenza 1:2 posata su un pendio a dolce pendenza e posizionata nella zona dei frangenti. Essi verificarono che la probabilità di tracimazione è notevolmente influenzata dalla presenza di gruppi d'onda, misurati al di fuori della zona dei frangenti, e dalla forma dello spettro d'onda. I risultati sperimentali sono stati inoltre utilizzati dagli autori per tarare un modello numerico a una linea che è stato modificato per includere la variazione spaziale dell'attrito al fondo.

Waal and van der Meer (1992) hanno analizzato il fenomeno di risalita dell'onda e di tracimazione su dighe costiere utilizzando esperimenti a piccola scala.

Van der Meer and Janssen (1995) hanno sviluppato e proposto delle formule pratiche per il calcolo della portata di tracimazione su una diga costiera distinguendo i due casi di onde soggette a frangimento sul paramento della struttura (plunging) e onde non soggette a frangimento (surging). La formula proposta è stata successivamente riportata sul TAW di Van der Meer (2002).

Van Gent (2001) ha condotto degli studi effettuando misure su prototipo, prove su modello fisico e calcoli con modelli numerici, combinando tra loro i risultati ottenuti per studiare il fenomeno di risalita dell'onda su dighe costiere posate su spiagge poco profonde. Per l'autore le basse profondità influiscono notevolmente sull'evoluzione delle distribuzioni di altezza d'onda e sugli spettri di energia dell'onda nella sua propagazione da acque profonde fino al piede della struttura. Van Gent ha condotto inoltre una serie di indagini per studiare l'influenza degli spettri d'onda sul fenomeno di risalita e di tracimazione. Questo ha portato a considerare, per lo studio dei suddetti

fenomeni un periodo d'onda caratteristico che prendesse in considerazione gli effetti dello spettro di energia dell'onda. Effettuando una serie di prove di laboratorio con tipi diversi di spiagge e tipi diversi di strutture si giunse allo sviluppo di un metodo applicabile sia in caso di acque basse che in caso di acque profonde.

Shankar and Jayaratne (2003) hanno condotto una serie di esperimenti in canaletta per esaminare l'influenza dell'altezza d'onda e periodo, della ripidità dell'onda, del tipo di frangimento, della scabrezza e della porosità e della presenza dello strato di mantellata di una diga costiera, sui fenomeni di risalita e tracimazione dell'onda per strutture impermeabili e permeabili. Gli autori, inoltre confrontarono i risultati ottenuti con quelli ricavati da vari autori.

Van der Meer et al. (2006), hanno costruito un simulatore di tracimazione al fine di investigare in maniera realistica sul fenomeno utilizzando un prototipo di diga costiera. In particolare gli autori analizzarono il comportamento idraulico della cresta della diga costiera soggetta a tracimazione.

Kobayashi and de los Santos (2007) Condussero esperimenti utilizzando un canale artificiale per indagare sul fenomeno di infiltrazione e tracimazione dell'onda su una diga a cresta larga inclinata in pietra e verificarono il risultato utilizzando un modello numerico che è stato esteso per includere il flusso di portata dovuto ad infiltrazione e tracimazione. Proposero infine una semplice formula per il calcolo della portata di infiltrazione che tiene conto del setup dell'onda sul paramento lato mare.

Le formule per il calcolo della portata di tracimazione e gli studi esistenti, non tengono conto della possibilità di inondazione della struttura di conseguenza portano a sottostimare la portata di tracimazione.

I primi studi sul fenomeno combinato di tracimazione ed inondazione sono stati svolti da Schüttrumpf (2001) e van Gent (2002)

Schüttertrumpf and Oumeraci (2005) hanno analizzato sperimentalmente e teoricamente l'interazione tra i processi associati alla risalita, alla tracimazione e all'inondazione da parte dell'onda di una diga costiera e i meccanismi di collasso della diga stessa. Questi parametri sono stati analizzati al fine di effettuare l'analisi della stabilità della struttura. Sono state anche dedotte alcune formule per determinare la velocità del flusso di portata e il lo spessore dello stesso sul paramento lato mare della diga. Questi parametri sono stati determinati sulla base di esperimenti a piccola scala e verificati con prove su modello idraulico.

L'apertura di una breccia su una diga costiera a causa della combinazione dei fenomeni di tracimazione e inondazione è stato studiato da Wang and Bowles (2006), D'Eliso et al. (2006) e Stanczak et al. (2006) che hanno sviluppato anche dei modelli numerici.

Reeve et al. (2008) hanno condotto esperimenti di laboratorio e studi numerici per analizzare le caratteristiche della portata legate alla combinazione dei fenomeni di tracimazione e inondazione di una struttura impermeabile. Il risultato numerico e sperimentale è stato utilizzato dagli autori per ricavare alcune formule pratiche che consentono il calcolo della portata di tracimazione e inondazione.

Neves et al. (2008) hanno analizzato e confrontato una serie di modelli numerici esistenti, al fine di sviluppare un modello di calcolo efficiente che fosse adeguato per prevedere l'erosione e l'apertura di una breccia su dighe costiere durante un'intera mareggiata.

2.4 Formule empiriche per il calcolo della portata di tracimazione

Molti autori si sono preoccupati di quantificare, attraverso relazioni semiempiriche la portata media tracimante q in funzione dei parametri da cui essa dipende e cioè dell'altezza d'onda significativa H_s , del periodo di picco T_p (o del periodo medio T_m) dello *spreading* direzionale σ delle onde generate dal vento, dell'angolo di incidenza del moto ondoso, della profondità al piede della struttura, dell'accelerazione di gravità g , della geometria del paramento.

Gli studi basati su analisi sperimentali relative a varie tipologie di strutture costiere soggette all'impatto di onde irregolari, che hanno portato a ricavare una serie di formule empiriche, sono riassunti schematicamente in Tabella 2.2

Le principali relazioni analitiche proposte in letteratura sono di due tipi. La prima è della forma:

$$Q = a \exp(-bR) \quad (2.1)$$

la seconda assume la forma:

$$Q = aR^{-b} \quad (2.2)$$

in cui Q è la portata di tracimazione media, adimensionalizzata a metro di lunghezza ed R è la quota di sommità della struttura R_c adimensionalizzata. I coefficienti a e b presenti nelle equazioni (2.1) e (2.2) dipendono dalla configurazione del paramento della struttura. La Tabella 2.2 riporta le formule proposte dai vari autori, il tipo di struttura alla quale esse sono applicabili, il tipo di equazione e le adimensionalizzazioni di Q ed R .

Autore	Struttura	Formula	Portata tracimante Q adimensionale	Quota R adimensionale
Owen (1980, 1982)	Paramento impermeabile liscio e scabro, uniforme e discontinuo	$Q = a \cdot e^{-bR}$	$\frac{q}{gH_s T_m}$	$\frac{R_c}{H_s} \left(\frac{s_{om}}{2\pi} \right)^{0.5} \frac{1}{\gamma}$
Bradbury e Allsop (1988)	Paramento in massi naturali con muro paraonde	$Q = a \cdot R^{-b}$	$\frac{q}{gH_s T_m}$	$\left(\frac{R_c}{H_s} \right)^2 \left(\frac{s_{om}}{2\pi} \right)^{0.5}$
Aminti e Franco (1988)	Paramento in tetrapodi a doppio strato con muro paraonde	$Q = a \cdot R^{-b}$	$\frac{q}{gH_s T_m}$	$\left(\frac{R_c}{H_s} \right)^2 \left(\frac{s_{om}}{2\pi} \right)^{0.5}$
Ahrens e Heimbaugh (1988)	Diversi rivestimenti	$Q = a \cdot e^{-bR}$	$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}}$	$\frac{R_c}{(H_{m0}^2 L_{p0})^{1/3}}$
Pedersen e Burchart (1992)	Paramento di massi naturali con muro paraonde	$Q = a \cdot R$	$\frac{qT_{m0}}{L_{m0}^2}$	$\frac{H_s}{R_c}$
Franco, De Gerloni e Van der Meer (1994)	Frangiflutti con muro verticale con e senza superficie perforata	$Q = a \cdot e^{-bR}$	$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}}$	$\frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma}$
Van der Meer e Janssen (1995)	Paramento impermeabile liscio e scabro uniforme e discontinuo	$Q = a \cdot e^{-bR}$	$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}}$ per $\xi_p < 2$ $\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}}$ per $\xi_{op} \geq 2$	$\frac{R_c}{H_{m0}} \frac{\sqrt{s_{op}}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma}$ for $\xi_p < 2$ $\frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma}$ for $\xi_{op} \geq 2$
TAW (2002)	Paramento impermeabile liscio e scabro uniforme e discontinuo	$Q = a \cdot e^{-bR}$	$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}}$	$\frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma}$

Tabella 2.2 (a): Formule empiriche per il calcolo della portata di tracimazione e relative adimensionalizzazioni dei parametri Q ed R

Autore	Struttura	Formula	Portata tracimante Q adimensionale	Quota R adimensionale
Pedersen (1996)	Paramento in massi naturali con muro paraonde	$Q = R$	$\frac{qT_{m0}}{L_{m0}^2}$	$3.2 \times 10^{-5} \frac{H_s^5 \tan \alpha}{R_c^3 A_c B}$
Schüttertrumpf (2001)	Paramento impermeabile liscio di pendenza 1:6	$Q = a \cdot e^{-bR}$ a dipendente da ξ_{0m}	$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}}$	$R = \frac{R_c}{R_{u,2\%}}$

Tabella 2.2 (b) (continuazione): Formule empiriche per il calcolo della portata di tracimazione e relative adimensionalizzazioni dei parametri Q ed R

2.5 Parametri da cui dipende la portata di tracimazione

Come risulta evidente dalle Tabelle 2.1 e 2.2, le formule empiriche esistenti in letteratura, per il calcolo della portata di tracimazione sono legate al clima ondoso e alla geometria della struttura. Di conseguenza per l'applicazione delle formule analitiche riportate in Tabella 2.2 è richiesta la conoscenza del livello d'acqua e delle caratteristiche dell'onda al piede della struttura (altezza e periodo) oltre che la conoscenza del tipo di struttura. Il livello d'acqua inoltre deve tenere conto, se presente, anche dell'incremento di livello marino dovuto all'escursione di marea.

2.5.1 Altezza d'onda e periodo

L'altezza d'onda utilizzata nelle formule per il calcolo della portata tracimante una struttura è l'altezza d'onda incidente significativa misurata al piede della struttura H_{m0} , definita anche altezza d'onda spettrale e calcolata come

$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} = 4\sigma$. Alcuni autori utilizzano l'altezza d'onda significativa calcolata come la media del terzo delle onde più alte $H_{1/3}$. In acque profonde entrambe le definizioni producono pressoché lo stesso valore.

Il periodo d'onda generalmente utilizzato è il periodo di picco ricavato dallo spettro d'onda, T_p , quasi identico al periodo significativo $T_{1/3}$ (calcolato come la media dei periodi del terzo delle onde più alte) o anche il periodo medio T_{m0} calcolato utilizzando lo spettro d'onda o la registrazione della serie temporale. Il rapporto tra T_p / T_{m0} generalmente varia tra 1.1 e 1.25. Il periodo utilizzato nelle formule analitiche riportate in Tabella 2.2 è il periodo spettrale T_{m0} . Nel caso di spettro uniforme con un solo picco la relazione tra T_p e T_{m0} è $T_p = 1.1T_{m0}$ (EutOtop 2007).

2.5.2 Ripidità dell'onda e tipo di frangimento

La ripidità dell'onda è un parametro adimensionale definito come il rapporto tra altezza d'onda e lunghezza d'onda $s_0 = H_{m0}/L_0 = 2\pi H / gT^2$ essa è indice delle caratteristiche dell'onda (H e T). Generalmente $s_0=0.01$ indica onde tipiche di mare lungo e $s_0=0.04\div 0.06$ indica onde di vento. Le onde di mare lungo sono generalmente associate ad lunghi periodi d'onda ed in questi casi il periodo è il principale parametro che influisce sul fenomeno di tracimazione.

Un parametro utile per descrivere il frangimento del moto ondoso sul paramento della struttura e gli effetti che ne conseguono è il parametro associato al tipo di frangimento, o *numero di Irribarren*, definito come

$\xi = \tan \alpha / \sqrt{s_o}$, dove α è l'inclinazione del paramento lato mare della diga rispetto all'orizzontale

2.5.3 Altezza di risalita dell'onda e quota di sommità

In merito alle quote raggiunte dal moto ondoso sulla struttura, si precisa che l'oscillazione verticale della superficie libera è generalmente maggiore dell'altezza dell'onda incidente. I valori estremi raggiunti da tale oscillazione vengono generalmente denominati risalita massima R_u (run-up) e risalita minima (run-down) R_d dell'onda rispetto al livello marino di quiete. La massima quota di risalita R_u dell'onda viene generalmente utilizzata per determinare l'altezza della cresta da assegnare alla struttura, e per individuare il livello di protezione e di praticabilità del coronamento o per esprimere un giudizio sulla tracimazione e sulla trasmissione del moto ondoso incidente. La quota minima di risalita R_d viene invece utilizzata per avere una conoscenza della quota inferiore dalla quale deve partire la mantellata di rivestimento ovvero della quota ove disporre una eventuale berma orizzontale sul paramento. I valori di risalita massimo e minimo possono essere anche forniti in termini adimensionali rispetto all'altezza d'onda significativa H_s .

Trattandosi di quote variabili con la stessa legge probabilistica dell'altezza d'onda, le grandezze R_u e R_d sono affette da un pedice che descrive il livello di probabilità che si vuole raggiungere. Si ottengono così i rapporti R_{ui} / H_s e R_{di} / H_s indicando con il pedice i il livello di probabilità conseguito. Ad esempio $R_{u2\%}$ è il livello di massima risalita dell'onda, misurato verticalmente rispetto al livello marino, che viene superato dal 2% delle onde

incidenti (Figura 2.3). Se il valore raggiunto dalla risalita massima raggiunge la massima quota di coronamento si verifica il superamento e quindi la tracimazione. Ciò può essere consentito per situazioni estreme e per piccole aliquote di portata tracimante, in modo da non provocare danni seri alle strutture e all'area protetta.

L'altezza della cresta della struttura è definita attraverso la sommergenza R_c misurata rispetto al livello marino (Figura 2.3). Come accennato in precedenza, nel caso in cui la struttura è inondata la sommergenza è negativa.

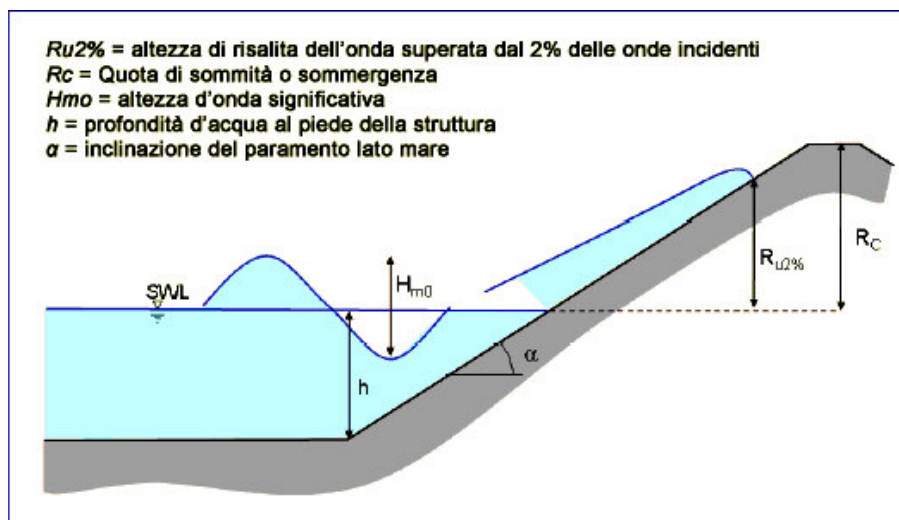


Figura 2.3: Rappresentazione grafica dell'altezza d'onda, dell'altezza di risalita e dell'altezza della cresta della struttura

2.5.4 Scabrezza, profondità al piede, angolo di incidenza, presenza di berma, o di muri verticali

L'effetto delle scabrezza, la presenza di berma o di muri verticali sulla sommità della struttura costiera e l'influenza della profondità al piede e dell'angolo di incidenza dell'onda, sono considerati nelle formule empiriche riassunte in Tabella 2.2 attraverso i parametri γ_f , γ_b , γ_v e γ_β rispettivamente.

Alcune espressioni (Owen, van der Meer e Jansen) tengono conto della riduzione della portata media di tracimazione dovuta alla scabrezza della superficie del paramento attraverso il coefficiente γ_f i cui valori sono compresi tra 0.50 e 1. Nel caso di superci rivestite di calcestruzzo e asfalto liscio una tabella riassuntiva di tali valori è riportata in Benassai (2006).

Per tener conto poi della riduzione di portata tracimante dovuta alla presenza di un'eventuale berma è stato introdotto un coefficiente γ_b per il cui calcolo si rimanda alla letteratura di riferimento (Waal e Van der Meer, (1992); EurOtop, 2007).

Un'ulteriore coefficiente riduttivo è stato introdotto per tenere conto dell'effetto della profondità al piede dell'opera sull'altezza d'onda che investe la struttura, γ_v .

Infine attraverso il coefficiente γ_β si tiene conto dell'incidenza del moto ondoso al momento dell'impatto dell'onda con la struttura.

3 PROCEDURA SPERIMENTALE

Il presente capitolo descrive la procedura sperimentale e la strumentazione utilizzata per eseguire 107 esperimenti consistenti nella generazione di onde incidenti irregolari che si propagano su un pendio impermeabile e liscio con pendenza $1/5$, posizionato su una spiaggia a dolce pendenza. Gli esperimenti sono stati condotti presso il *Center for Applied Coastal Research (CACR)* - Delaware University -USA- e sono consistiti in 78 prove di tracimazione di una struttura costiera, nelle quali il livello d'acqua veniva incrementato, ma mantenuto inferiore alla cresta della diga e 29 prove riguardanti il fenomeno combinato di tracimazione e inondazione nelle quali il livello d'acqua è stato incrementato fino ad inondare la cresta della struttura. Nei paragrafi che seguono sono descritti in dettaglio gli esperimenti e la procedura sperimentale adottata.

3.1 Apparato sperimentale

Gli esperimenti sono stati condotti nella canaletta del *Center for Applied Coastal Research (CACR)* dell'Università del Delaware negli USA. La canaletta utilizzata è lunga 33 m , larga 0.6 m e alta 1.5 m e può essere schematizzata come mostrato in Figura 3.1.

All'interno di essa è stata simulata una spiaggia impermeabile a dolce pendenza installando, un pendio liscio con pendenza $1/14.8$ e lunghezza orizzontale di 1.29 m , ad una distanza di 9.06 m dal generatore d'onda e a seguire un pendio liscio e impermeabile con pendenza $1/34.2$ e lunghezza orizzontale 10.69 m (Figura 3.2). La struttura costiera vera e propria era

costituita da una diga con una pendenza $1/5$, lunghezza orizzontale 1.74 m e avente una cresta larga 0.3 m come mostrato in Figura 3.2. La cresta della struttura era posta ad un'altezza di 68.5 cm misurati rispetto al fondo orizzontale della canaletta.

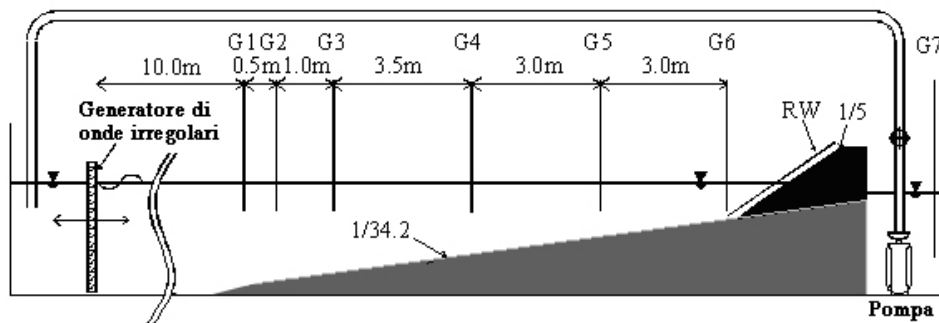


Figura 3.1 Apparato Sperimentale

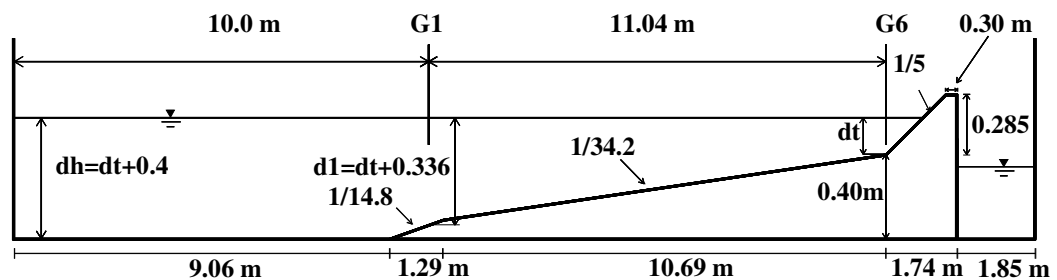


Figura 3.2: dimensioni dell'apparato sperimentale

A tergo del paramento lato terra della diga è stato costruito un bacino di raccolta lungo 1.85 m e largo 0.6 m utilizzato per convogliare e misurare la portata che tracimava e inondava la struttura (Figura 3.2).

Per tenere il livello d'acqua nella canaletta pressoché costante durante gli esperimenti, all'interno del bacino di raccolta è stata installata una pompa sommersa collegata ad un tubo per effettuare il ricircolo della portata necessaria allo scopo. Per limitare i disturbi dovuti al flusso di ricircolo in canaletta, la portata di ricircolo veniva inviata nella zona della canaletta posta dietro il generatore d'onda, (Figura 3.1). Per ottenere la misura della quantità d'acqua pompata, è stato collegato al tubo per il ricircolo un misuratore di portata.

Per misurare la serie temporale dell'oscillazione della superficie libera rispetto al livello marino sono state installate in canaletta sette sonde (G1 – G7). Mentre per la misura delle serie temporali dell'elevazione della superficie libera sul pendio 1/5 è stato utilizzato un misuratore di risalita dell'onda (RW) posto ad una distanza verticale di 2 cm parallelamente al pendio. Le posizioni delle sonde e le distanze tra esse sono mostrate in Figura 3.1.

Le sonde G1–G3 sono state utilizzate per separare le componenti d'onda incidente e riflessa e per stimare il coefficiente di riflessione r al di fuori dalla zona dei frangenti come spiegato in Kobayashi et al. (1990)

Le sonde G4-G6 sono servite per la misura delle grandezze relative alla trasformazione dell'onda sul pendio 1/34.2.

La sonda G7 è stata utilizzata per registrare la variazione temporale del livello d'acqua nel bacino di raccolta. Le serie temporali registrate dalla sonda G7 sono state utilizzate per la stima delle portate di tracimazione e inondazione.

Il misuratore di risalita dell'onda (RW), installato ad una distanza verticale $\delta_r = 2 \text{ cm}$ dalla diga di pendenza 1/5, è stato utilizzato per misurare le oscillazioni della superficie libera sul paramento lato mare della struttura. La Figura 3.3 mostra la disposizione delle sonde G1-G7 all'interno della canaletta.



Figura 3.3: Disposizione delle sonde G1-G7 in canaletta

Il sistema di riferimento adottato nel presente studio considera la coordinata orizzontale x positiva verso terra, con $x = 0$ in corrispondenza della sonda G1. La coordinata verticale z è positiva verso l'alto, con $z = 0$ in corrispondenza del valore minimo del pelo libero misurato rispetto al fondo, (52 cm) considerato durante gli esperimenti di tracimazione (Figura 3.4)

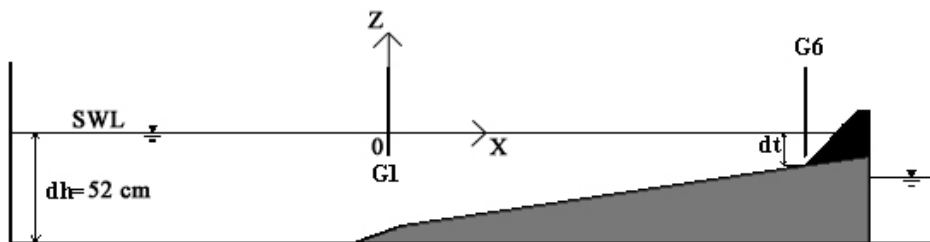


Figura 3.4: Sistema di riferimento adottato per condurre gli esperimenti

Il pelo libero iniziale (SWL) nella canaletta è più basso della quota in sommità della diga.

In Figura 3.2, dh =profondità d'acqua (m) di fronte al generatore d'onda misurata rispetto al fondo orizzontale della canaletta; dt =profondità d'acqua (m) al piede della diga di inclinazione 1/5; e d_1 =profondità d'acqua (m) in corrispondenza della sonda G1. L'origine $z = 0$ è stata scelta in modo tale che l'elevazione del fondo sia $z_b = -0.456 m$ a $x = 0$, $z_b = -0.12 m$ al piede della diga di inclinazione 1/5, alla distanza $x = 11.0 m$, e $z_b = 0.165 m$ sulla cresta della diga in corrispondenza di $x = 12.5 - 12.8 m$.

3.2 Taratura degli strumenti

Il misuratore di portata, le sette sonde posizionate in canaletta, G1-G7, e il misuratore di risalita dell'onda, RW, sono stati tarati prima degli esperimenti per assicurare l'affidabilità della strumentazione.

3.2.1 Taratura del misuratore di portata

Il misuratore di portata è stato calibrato una sola volta prima di iniziare gli esperimenti. A tal fine è stata avviata la pompa installata nel bacino di raccolta utilizzando una portata d'acqua nota ed è stato annotato il voltaggio, visualizzato dal misuratore. La variazione del livello d'acqua nel bacino di raccolta è stata misurata dalla sonda G7. La variazione di portata nel bacino di raccolta può essere scritta come $M = dV_b/dt = A(-d\eta/dt)$, dove M = portata

pompata funzione della variazione di volume, V_b = volume d'acqua all'interno del bacino di raccolta, A = area del bacino di raccolta ($A=1.1 \text{ m}^2$ come mostrato in Figura 3.2), e η = livello d'acqua istantaneo all'interno del bacino di raccolta.

La portata pompata M è stata confrontata con la portata R registrata dal misuratore. La Figura 3.5 mostra l'andamento temporale di R ed η per gli 8 test utilizzati per la taratura; la portata pompata è stata tenuta sotto controllo aprendo e chiudendo la valvola connessa alla pompa.

Per trovare legge di correlazione tra R ed $M = A(-d\eta/dt)$, per ogni test di taratura, sono stati calcolati la media dei valori di R , letti sul misuratore e la diminuzione costante nel tempo del livello d'acqua nel bacino di raccolta ($-d\eta/dt$).

Com'è possibile osservare in Figura 3.6, l'equazione $M = 1.16R$ fornisce la migliore correlazione.

La relazione ottenuta è stata utilizzata per calcolare la portata di ricircolo della pompa M a partire dal flusso di portata misurata R .

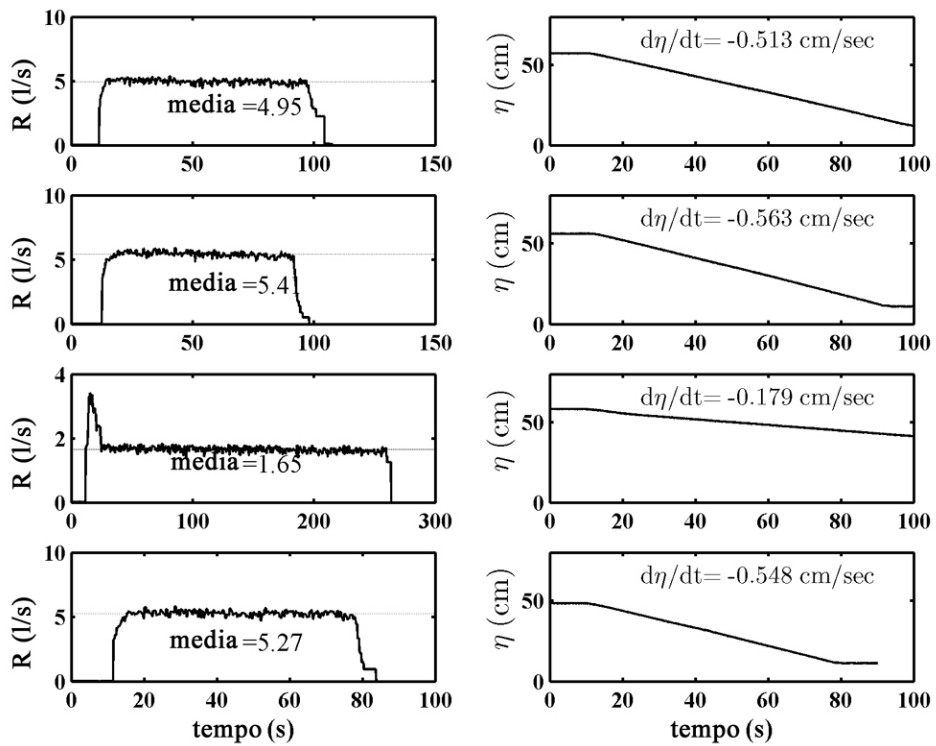


Figura 3.5 (a): Andamento temporale dei valori di portata letti dal misuratore (R) e della variazione di livello d'acqua all'interno del bacino di raccolta per 4 test di taratura

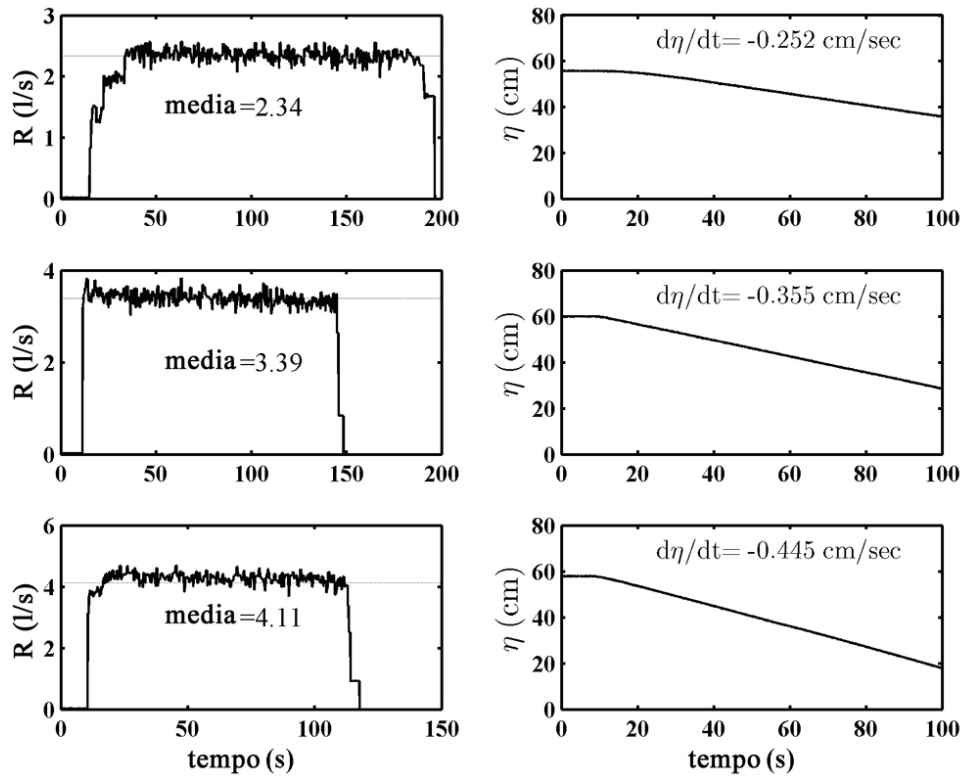


Figura 3.5 (b): Andamento temporale dei valori di portata letti dal misuratore (R) e della variazione di livello d'acqua all'interno del bacino di raccolta per 4 test di taratura

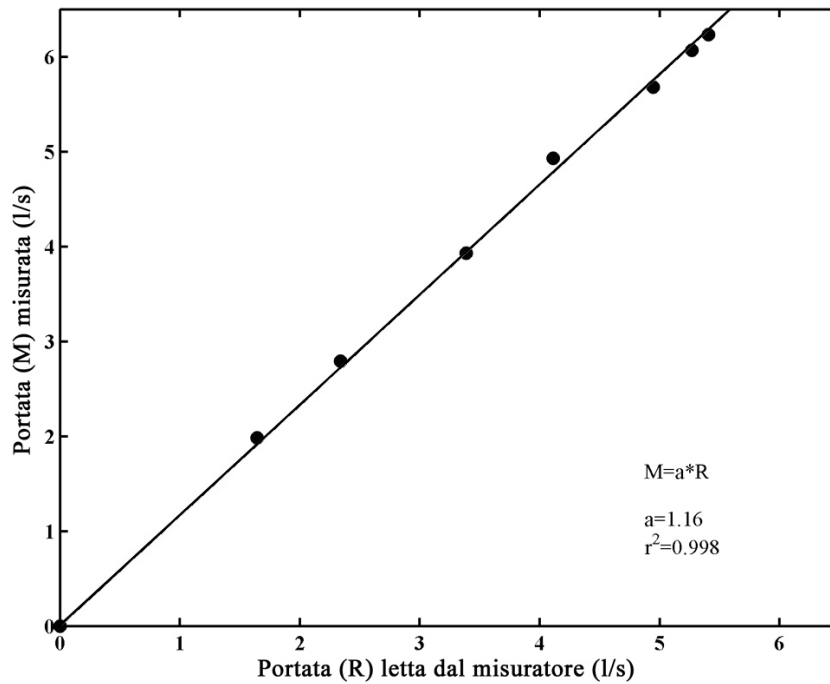


Figura 3.6: Correlazione tra i valori di portata letti dal misuratore e i valori pompati e misurati.

3.2.2 Taratura delle sonde e del misuratore di risalita dell'onda

Per la taratura le sonde G1-G7 sono state mosse verso l'alto e verso il basso nell'acqua considerando passi spaziali di 1 cm nell'intervallo di -15 cm e +15 cm rispetto al livello marino, utilizzando un motore controllato da un software scritto in *LABVIEW*. Il software installato nel computer controllava il motore di tutte e sette le sonde posizionate in canaletta e registrava il voltaggio di ogni sonda per ogni spostamento di 1 cm. Il legame corretto tra l'elevazione della sonda e il voltaggio era lineare durante la taratura di ognuna delle sonde. Nei casi in cui questo legame non è risultato lineare la procedura di calibrazione veniva ripetuta. Ognuna delle relazioni ottenute con la calibrazione è stata

applicata alla corrispondente serie temporale del voltaggio di ogni sonda dal programma il cui output era la serie temporale dell'elevazione della superficie libera in canaletta.

Per ottenere la corretta taratura del misuratore di risalita dell'onda, installato sul pendio di inclinazione $1/5$, è stato variato il livello d'acqua all'interno della canaletta con passi spaziali di $1,5-2\text{ cm}$ e, per ogni valore, è stato registrato il corrispondente voltaggio. Il misuratore di risalita è stato tarato contemporaneamente alle altre sonde ma, poiché la resistenza con cui esso era realizzato era più lunga di quella utilizzata per le sonde, è stato aggiunto in serie, uno strumento per l'acquisizione dei dati tale da sfruttare l'intera lunghezza della resistenza. Di conseguenza è stata utilizzata una funzione del terzo ordine per la taratura del misuratore di risalita dell'onda. La curva di calibrazione ottenuta, che riportava sulle ascisse i valori del voltaggio e sulle ordinate i corrispondenti valori del livello d'acqua, è stata utilizzata per convertire i valori del voltaggio registrati dal misuratore di risalita dell'onda nei corrispondenti valori di livello di risalita d'onda sul pendio.

La Figura 3.7 mostra un esempio di curva di taratura del terzo ordine ottenuta per il misuratore di risalita dell'onda.

La taratura del misuratore di risalita dell'onda è stata effettuata ogni giorno prima di iniziare gli esperimenti, mentre la taratura delle sonde G1-G7 è stata effettuata prima di ogni esperimento.

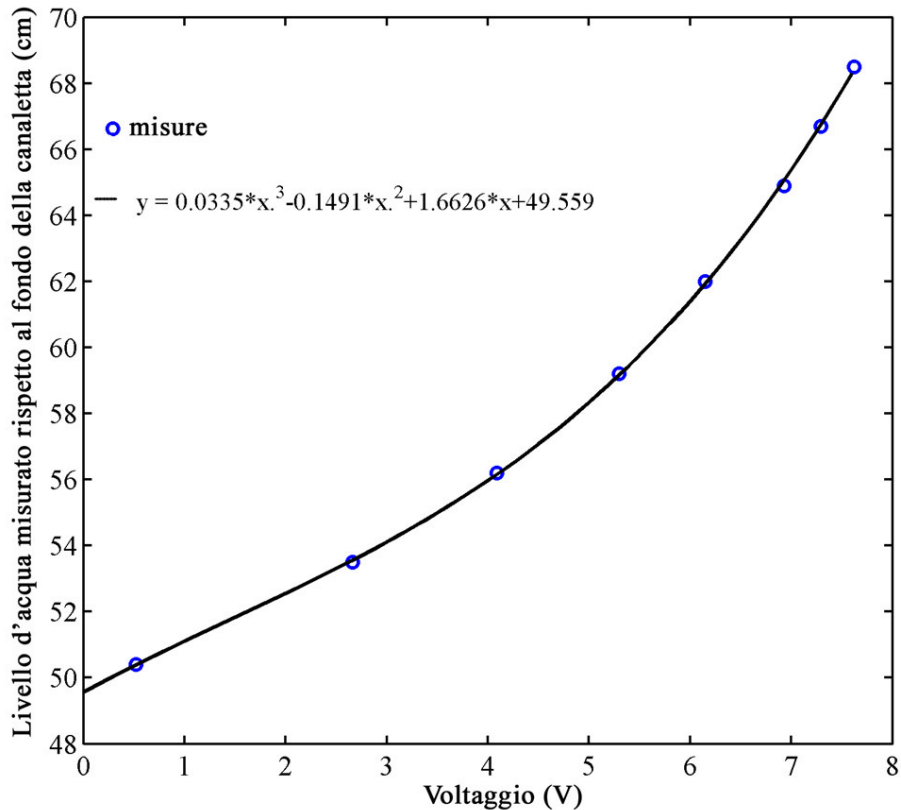


Figura 3.7: Esempio di curva di taratura per il misuratore di risalita dell'onda

3.3 Esperimenti di trascinamento

La procedura utilizzata per condurre i 78 esperimenti di trascinamento dell'onda è spiegata nel presente paragrafo.

Dopo la taratura del misuratore di risalita dell'onda, la canaletta è stata riempita fino a raggiungere un fissato livello d'acqua. Dopo pochi minuti il livello d'acqua diventava stazionario ed era possibile effettuare la calibrazione delle sette sonde poste in canaletta come spiegato nel paragrafo precedente. Il livello d'acqua è stato incrementato fino al valore corrispondente all'elevazione della cresta della struttura. In particolare la profondità d'acqua

minima considerata corrisponde a $dh = 52 \text{ cm}$, mentre l'elevazione della cresta della struttura corrisponde a $dh = 68.5 \text{ cm}$ misurati rispetto al fondo della canaletta.

Dopo aver tarato le sonde, sono state generate delle onde irregolari che riproducevano uno spettro di tipo TMA utilizzando un generatore d'onda a pistone perforato del tipo mostrato in Figura 3.8.



Figura 3.8: Generatore di onde irregolari utilizzato durante gli esperimenti

L'altezza d'onda quadratica media H_{rms} e l'altezza d'onda significativa H_{mo} dello spettro sono definite come $H_{rms} = \sqrt{8}\sigma_\eta$ e $H_{mo} = 4\sigma_\eta$. I valori misurati della deviazione standard delle oscillazioni della superficie libera σ_η e del periodo di picco T_p dello spettro, in corrispondenza della sonda G1, sono compresi nell'intervallo di valori da 0.84 cm a 4.58 cm e 1.33 s a 2.5 s , rispettivamente.

Il livello d'acqua in canaletta misurato rispetto all'origine (S), corrispondente a $z = 0$, è stato variato da 0 m a 0.165 m ; questi valori corrispondono ad una profondità d'acqua al piede della struttura $dt = 0.12 \text{ m}$ e $dt = 0.285 \text{ m}$ rispettivamente, come si vede in Figura 3.2.

Le onde generate si propagavano lungo la canaletta, risalivano sul pendio di inclinazione $1/5$ e tracimavano sulla cresta della struttura. La portata d'acqua tracimante è stata raccolta nella vaschetta costruita a tergo della struttura e fatta ricircolare, utilizzando il sistema pompa-tubo, nella zona della canaletta dietro il generatore d'onda (Figura 3.1). La pompa entrava in funzione automaticamente nel momento in cui il livello d'acqua nella vasca di raccolta raggiungeva un certo livello. Nei casi in cui la portata di tracimazione risultava eccessiva, la pompa veniva avviata manualmente per tenere il livello d'acqua in canaletta costante durante l'esperimento e in modo da ridurre l'eccessivo accumulo d'acqua iniziale all'interno del bacino di raccolta.

Per ogni esperimento sono state generate onde irregolari per un tempo di 400 s . La frequenza di campionamento delle serie temporali registrate dalle sonde G1-G7, dal misuratore di risalita dell'onda e dal misuratore di portata era di 50 Hz . Le componenti d'onda incidente e riflessa sono state separate utilizzando le registrazioni delle serie temporali ottenute con le sonde G1, G2, G3. Tutte le sonde installate hanno registrato per 400 s l'oscillazione della superficie libera; il tempo di transizione iniziale, corrispondente ai primi 40 s di ogni serie temporale, è stato rimosso in quanto in questo tempo si avevano solo piccole oscillazioni della superficie libera. I dati registrati nei rimanenti 360 s sono stati analizzati per ottenere la media, $\bar{\eta}$, e la deviazione standard, σ_{η} , dell'elevazione della superficie libera η misurata rispetto al livello.

La Tabella 3.1 riporta i valori misurati dalle sonde G1-G6 della media $\bar{\eta}$ e della deviazione standard σ_{η} dell'oscillazione della superficie libera e i valori

misurati in corrispondenza della sonda G1 dell'incremento di livello marino S , della profondità d'acqua d_1 , del periodo di picco dello spettro T_p e del coefficiente di riflessione r , per i 78 esperimenti di tracimazione. Gli esperimenti sono stati numerati dal più piccolo valore dell'incremento di livello marino ($S = 0$) al più grande ($S = 0.165 \text{ m}$). E' da notare che, in Tabella 3.1, con "NA" si intende "Non affidabile", per indicare la non attendibilità del dato dovuto ad un istantaneo malfunzionamento degli strumenti di laboratorio.

In Tabella 3.2 sono mostrati i valori misurati dal misuratore di risalita. In particolare N_i =numero totale di onde incidenti, calcolato utilizzando il metodo dello *zero up-crossing*; $\bar{\eta}_r$ =livello di risalita medio misurato sul pendio 1/5; σ_r =misura della deviazione standard della risalita media dell'onda; N_o =numero di eventi di tracimazione contati manualmente; P_o =probabilità che si verifichi tracimazione ottenuta come $P_o = N_i/N_o$; e q =portata di tracimazione media per unità di larghezza della cresta della struttura che si verifica in 360 s. I valori misurati della portata di tracimazione media q sono stati ottenuti misurando il volume d'acqua pompato e ricircolato e la variazione di volume d'acqua nel bacino di raccolta durante 360 s. La portata di tracimazione per unità di larghezza della struttura e la probabilità di tracimazione della cresta della struttura misurate per i test di tracimazione variano negli intervalli di valori di 0-71.6 cm^2/s e 0.0-1.0, rispettivamente. In Tabella 3.2 con NM si intende "Non Misurato".

Esperimento N°	G1						G2		G3		G4		G5		G6	
	d_1 cm	S cm	T_p sec	r	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm
1	45.6	0.0	1.37	0.33	-0.04	2.64	-0.02	2.40	-0.02	2.67	-0.04	2.59	-0.03	2.55	0.09	2.42
2	45.6	0.0	1.98	0.29	-0.23	4.16	-0.14	4.16	-0.28	4.22	-0.24	4.02	-0.14	3.70	0.27	3.08
3	45.6	0.0	2.31	0.31	-0.32	4.58	-0.31	4.58	-0.36	4.64	NA	4.47	-0.13	3.71	0.38	3.03
4	45.6	0.0	1.4	NA	-0.01	1.96	NA	NA	-0.01	1.98	-0.03	1.99	-0.05	2.00	0.03	2.03
5	45.6	0.0	2.05	0.39	-0.12	3.27	-0.09	2.70	-0.13	3.29	-0.15	3.23	-0.13	3.11	0.16	2.74
6	45.6	0.0	2.35	0.34	-0.15	3.67	0.02	3.43	-0.19	3.76	NA	3.76	-0.21	3.42	0.12	2.90
7	45.6	0.0	1.36	0.32	0.00	1.41	-0.01	1.35	0.00	1.39	-0.03	1.37	-0.02	1.41	0.00	1.55
8	45.6	0.0	1.97	0.34	-0.08	2.25	-0.07	2.26	-0.08	2.27	-0.19	2.32	-0.14	2.46	-0.03	2.43
9	45.6	0.0	2.34	0.36	-0.12	2.82	-0.12	2.70	-0.12	2.87	-0.15	2.74	-0.16	2.54	-0.01	2.26
10	47.6	2.0	1.43	0.26	-0.04	2.35	-0.02	2.35	-0.05	2.36	-0.07	2.32	-0.10	2.31	-0.05	2.37
11	47.6	2.0	2.05	0.3	-0.36	3.88	-0.32	3.87	-0.35	3.82	NA	3.77	-0.21	3.49	0.00	3.07
12	47.6	2.0	2.22	0.33	-0.60	4.56	-0.53	4.46	-0.68	4.59	-0.51	4.36	-0.44	3.92	-0.14	3.20
13	47.6	2.0	1.45	0.26	-0.03	1.90	0.00	1.88	-0.03	1.88	-0.08	1.89	-0.06	1.96	-0.05	1.99
14	47.6	2.0	1.98	0.33	-0.31	2.89	-0.29	2.84	-0.29	3.00	NA	3.13	-0.32	3.02	-0.25	2.91
15	47.6	2.0	2.12	0.34	-0.38	3.68	-0.35	3.68	-0.42	3.65	NA	3.73	-0.22	3.32	-0.20	2.88
16	47.6	2.0	1.4	0.31	0.00	1.35	0.01	1.31	-0.01	1.32	-0.14	1.32	-0.02	1.33	-0.02	1.43
17	47.6	2.0	2.01	0.36	-0.23	2.07	-0.22	2.06	-0.24	2.11	-0.28	2.17	-0.29	2.22	-0.26	2.46
18	47.6	2.0	2.32	0.38	-0.30	2.69	-0.29	2.69	-0.32	2.68	-0.38	2.79	-0.39	2.64	-0.34	2.55
19	49.6	4.0	1.33	0.24	-0.10	2.35	-0.10	2.35	-0.13	2.38	-0.12	2.36	-0.16	2.33	-0.16	2.36
20	49.6	4.0	1.95	0.28	-0.66	3.79	-0.62	3.76	-0.73	3.84	-1.00	3.85	-0.61	3.56	-0.39	3.37
21	49.6	4.0	2.22	0.34	-0.81	4.50	-0.79	4.49	-0.81	4.62	NA	4.34	-0.71	4.01	-0.56	3.34
22	49.6	4.0	1.34	0.27	-0.05	1.72	-0.05	1.72	-0.06	1.71	-0.07	1.74	-0.08	1.71	-0.06	1.77
23	49.6	4.0	2.02	0.3	-0.76	3.08	-0.71	3.10	-0.75	3.08	-0.79	3.17	-0.79	3.22	-0.66	3.13
24	49.6	4.0	2.45	0.36	-0.64	3.42	-0.57	3.49	-0.64	3.52	NA	3.65	-0.66	3.44	-0.48	3.12
25	49.6	4.0	1.43	0.33	0.00	1.23	0.00	1.22	0.00	1.21	-0.01	1.23	-0.01	1.25	-0.04	1.27
26	49.6	4.0	2.03	0.35	-0.37	2.15	-0.35	2.10	-0.38	2.20	-0.40	2.21	-0.41	2.26	-0.42	2.56
27	49.6	4.0	2.5	0.39	-0.61	2.41	-0.56	2.48	-0.61	2.41	-0.61	2.56	-0.61	2.49	-0.62	2.61

Tabella 3.1 (a): Statistica dell'oscillazione della superficie libera misurata dalle sonde G1-G6 e valori misurati dalla sonda G1 dell'incremento di livello marino S , della profondità d'acqua d_1 , del periodo di picco dello spettro T_p e del coefficiente di riflessione r . Esperimenti 1 - 27

Esperimento N°	G1						G2		G3		G4		G5		G6	
	d_1 cm	S cm	T_p sec	r	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm
28	51.6	6.0	1.4	NA	-0.21	2.34	-0.21	NA	-0.22	2.33	-0.21	2.32	-0.21	2.25	-0.29	2.18
29	51.6	6.0	2.03	0.39	-0.71	3.82	-0.69	NA	-0.71	3.89	-0.69	3.96	-0.68	3.83	-0.52	3.61
30	51.6	6.0	2.28	0.42	-0.76	4.56	-0.75	NA	-0.75	4.64	NA	4.61	-0.68	4.31	-0.52	3.65
31	51.6	6.0	1.4	NA	-0.08	1.80	-0.09	NA	-0.10	1.79	-0.14	1.76	-0.10	1.70	-0.10	1.65
32	51.6	6.0	1.96	0.4	-0.57	3.03	-0.55	NA	-0.58	3.02	-0.64	3.00	-0.60	3.14	-0.54	3.16
33	51.6	6.0	2.42	0.43	-0.71	3.45	-0.68	NA	-0.72	3.46	-0.73	3.51	-0.72	3.36	-0.70	3.07
34	51.6	6.0	1.37	NA	-0.03	1.24	-0.03	NA	-0.03	1.23	-0.03	1.23	-0.03	1.22	-0.02	1.15
35	51.6	6.0	2.01	0.45	-0.67	1.99	-0.63	NA	-0.65	2.03	-0.66	2.08	-0.66	2.20	-0.66	2.36
36	51.6	6.0	2.28	0.46	-0.61	2.42	-0.59	NA	-0.62	2.45	-0.63	2.55	-0.64	2.53	-0.61	2.64
37	53.6	8.0	1.37	0.24	-0.39	2.25	-0.35	NA	-0.42	2.22	-0.38	2.21	-0.47	2.16	-0.48	2.04
38	53.6	8.0	1.97	0.29	-0.60	3.74	-0.56	NA	-0.59	3.70	-0.68	3.62	-0.58	3.74	-0.52	3.50
39	53.6	8.0	2.42	0.32	-0.78	4.08	-0.69	NA	-0.80	4.03	-0.60	4.16	-0.77	3.96	-0.64	3.69
40	53.6	8.0	1.4	0.26	-0.25	1.66	-0.25	1.65	-0.23	1.69	-0.30	1.65	-0.51	1.66	-0.24	1.55
41	53.6	8.0	1.88	0.32	-0.62	2.78	-0.56	2.84	-0.63	2.73	-0.66	2.92	-0.64	3.00	-0.60	3.02
42	53.6	8.0	2.17	0.32	-0.61	3.33	-0.49	3.30	-0.59	3.30	-0.62	3.52	-0.62	3.30	-0.56	3.17
43	53.6	8.0	1.38	0.33	-0.04	1.13	-0.05	1.12	-0.06	1.15	-0.07	1.14	-0.05	1.14	0.02	1.05
44	53.6	8.0	1.96	0.38	-0.61	2.02	-0.58	1.95	-0.63	2.00	-0.65	2.06	-0.63	2.10	-0.60	2.19
45	53.6	8.0	2.38	0.4	-0.51	2.32	-0.45	2.30	-0.53	2.29	-0.53	2.42	-0.54	2.40	-0.51	2.56
46	55.6	10.0	1.36	0.24	-0.41	2.17	-0.39	2.14	-0.40	2.15	-0.42	2.19	-0.42	2.15	-0.43	1.89
47	55.6	10.0	2.05	0.28	-0.55	3.44	-0.53	3.30	-0.57	3.39	-0.58	3.37	-0.54	3.40	-0.51	3.20
48	55.6	10.0	1.96	0.3	-0.69	4.05	-0.62	4.01	-0.72	4.06	1.50	4.11	-0.87	3.94	-0.61	3.48
49	55.6	10.0	1.36	0.27	-0.43	1.58	-0.41	1.51	-0.43	1.57	-0.43	1.55	-0.41	1.53	-0.40	1.36
50	55.6	10.0	1.94	0.3	-0.55	2.73	-0.47	2.69	-0.55	2.71	-0.59	2.79	NA	2.87	-0.54	2.69
51	55.6	10.0	2.4	0.34	-0.62	3.13	-0.53	3.16	-0.63	3.12	-0.64	3.29	-0.59	3.17	-0.65	2.98
52	55.6	10.0	1.32	0.36	-0.08	1.13	-0.05	1.11	-0.08	1.13	-0.05	1.10	NA	1.06	-0.07	0.98
53	55.6	10.0	1.97	0.37	-0.45	1.93	-0.40	1.92	-0.44	1.95	-0.49	2.03	-0.45	2.06	-0.45	2.01
54	55.6	10.0	2.34	0.4	-0.48	2.19	-0.44	2.15	-0.47	2.22	-0.53	2.29	-0.48	2.32	-0.46	2.33

Tabella 3.1 (b): Statistica dell'oscillazione della superficie libera misurata dalle sonde G1-G6 e valori misurati dalla sonda G1 dell'incremento di livello marino S , della profondità d'acqua d_1 , del periodo di picco dello spettro T_p e del coefficiente di riflessione r . Esperimenti 28 - 54

Esperimento N°	G1						G2		G3		G4		G5		G6	
	d_1 cm	S cm	T_p sec	r	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm
55	57.6	12.0	1.36	0.38	-0.26	1.11	-0.27	1.13	-0.27	1.10	-0.39	1.12	-0.36	1.13	-0.24	0.94
56	57.6	12.0	2.05	0.39	-0.31	1.76	-0.32	1.70	-0.32	1.77	-0.40	1.74	-0.32	1.83	-0.33	1.66
57	57.6	12.0	2.18	0.39	-0.51	2.08	-0.56	2.08	-0.48	2.10	-0.49	2.17	-0.48	2.14	-0.49	2.07
58	57.6	12.0	1.39	0.29	-0.33	1.58	-0.32	1.58	-0.33	1.59	-0.33	1.59	-0.31	1.55	-0.33	1.35
59	57.6	12.0	2.02	0.29	-0.64	2.56	-0.63	2.57	-0.65	2.59	-0.64	2.63	-0.67	2.69	-0.63	2.46
60	57.6	12.0	2.14	0.32	-0.56	2.93	-0.63	2.91	-0.55	2.90	-0.59	2.94	NA	2.96	-0.55	2.80
61	57.6	12.0	1.35	0.26	-0.43	2.13	-0.43	2.08	-0.43	2.11	-0.43	2.10	-0.55	2.10	-0.39	1.87
62	59.6	14.0	1.64	0.41	-0.58	0.93	-0.59	0.92	-0.57	0.95	-0.60	0.93	-0.59	0.96	-0.62	0.88
63	59.6	14.0	1.94	0.34	-0.37	1.56	-0.33	1.57	-0.37	1.55	-0.39	1.62	-0.37	1.70	-0.41	1.59
64	59.6	14.0	2.13	0.37	-0.43	1.74	-0.41	1.76	-0.41	1.70	-0.44	1.73	-0.41	1.81	-0.45	1.82
65	59.6	14.0	1.63	0.29	-0.36	1.38	-0.37	1.40	-0.37	1.35	-0.38	1.37	-0.37	1.37	-0.39	1.26
66	59.6	14.0	2.05	0.29	-0.36	2.11	-0.37	2.10	-0.37	2.15	-0.39	2.09	-0.39	2.20	-0.41	2.15
67	59.6	14.0	1.36	0.25	-0.28	1.70	-0.30	1.72	-0.28	1.71	-0.32	1.68	-0.28	1.71	-0.33	1.61
68	61.1	15.5	1.34	0.33	-0.63	0.94	-0.63	0.95	-0.63	0.94	-0.61	0.90	-0.65	0.92	-0.65	0.86
69	61.1	15.5	1.96	0.31	-0.66	1.48	-0.67	1.50	-0.69	1.47	-0.66	1.47	-0.63	1.60	-0.69	1.46
70	61.1	15.5	1.62	0.27	-0.61	1.24	-0.61	1.25	-0.61	1.24	-0.62	1.20	-0.61	1.23	-0.64	1.16
71	61.1	15.5	1.94	0.24	-0.41	2.09	-0.42	2.11	-0.42	2.07	-0.43	2.09	-0.35	2.20	-0.44	2.05
72	61.1	15.5	1.63	0.23	-0.41	1.72	-0.41	1.72	-0.41	1.71	-0.42	1.66	-0.45	1.66	-0.44	1.57
73	62.1	16.5	1.32	0.24	-0.22	0.84	-0.21	0.85	-0.22	0.83	-0.23	0.81	-0.22	0.81	-0.23	0.76
74	62.1	16.5	1.97	0.25	-0.45	1.40	-0.48	1.44	-0.46	1.39	-0.48	1.42	-0.48	1.50	-0.48	1.36
75	62.1	16.5	2.29	0.27	-0.33	1.53	-0.34	1.56	-0.32	1.53	-0.35	1.56	-0.35	1.61	-0.36	1.59
76	62.1	16.5	1.59	0.2	-0.19	1.22	-0.18	1.25	-0.17	1.22	-0.17	1.21	-0.17	1.21	-0.18	1.12
77	62.1	16.5	1.67	0.2	-0.45	1.66	-0.46	1.67	-0.45	1.65	-0.47	1.61	-0.47	1.60	-0.49	1.52
78	62.1	16.5	1.91	0.2	-0.31	1.99	-0.31	2.02	-0.33	1.97	-0.33	1.94	-0.31	2.02	-0.36	1.90

Tabella 3.1 (c): Statistica dell'oscillazione della superficie libera misurata dalle sonde G1-G6 e valori misurati dalla sonda G1 dell'incremento di livello marino S , della profondità d'acqua d_1 , del periodo di picco dello spettro T_p e del coefficiente di riflessione r . Esperimenti 55 - 78

Esperimento N°	N_i	Misuratore di risalita		N_o	P_o (N_o/N_i)	q (cm^2/s)
		$\bar{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)			
1	258	1.09	3.14	32	0.12	0.26
2	211	1.29	5.27	96	0.45	2.20
3	208	1.37	5.57	96	0.46	1.96
4	265	0.90	2.13	22	0.08	0.11
5	215	1.47	3.58	51	0.24	1.27
6	199	1.63	4.34	44	0.22	2.13
7	257	0.17	1.62	0	0.00	0.00
8	212	0.91	3.15	27	0.13	0.89
9	202	1.11	3.57	38	0.19	1.40
10	268	0.91	2.59	32	0.12	0.64
11	222	1.70	4.12	70	0.32	3.29
12	206	1.67	5.19	45	0.22	6.84
13	269	0.53	2.18	18	0.07	0.27
14	212	1.14	3.94	72	0.34	3.95
15	204	1.38	4.63	79	0.39	5.59
16	260	0.22	1.60	4	0.02	0.03
17	212	0.66	3.21	61	0.29	2.30
18	197	1.04	4.14	72	0.37	4.71
19	263	1.18	2.67	NM	NM	2.06
20	217	1.61	4.34	NM	NM	10.40
21	212	1.84	5.34	NM	NM	13.19
22	272	1.02	2.05	NM	NM	0.65
23	211	1.10	3.97	NM	NM	8.57
24	205	1.44	4.85	NM	NM	11.08
25	264	0.33	1.53	NM	NM	0.02
26	208	0.70	3.24	176	0.85	5.77
27	206	0.69	3.88	167	0.81	6.98
28	263	0.82	2.42	67	0.25	3.16
29	208	1.90	4.34	153	0.74	18.75
30	200	2.37	5.34	131	0.66	25.40
31	261	0.54	2.06	45	0.17	1.23
32	203	1.58	4.03	140	0.69	15.17
33	198	1.72	4.89	133	0.67	17.06
34	274	0.44	1.63	19	0.07	0.29
35	208	0.46	3.35	103	0.50	7.13
36	198	0.97	4.08	100	0.51	11.17

Tabella 3.2 (a): Statistica della risalita dell'onda sul pendio 1/5 ottenuta con il misuratore di risalita e valori misurati del numero totale di onde incidenti N_i ; del numero di eventi di tracimazione N_o ; della probabilità di tracimazione P_o e della portata di tracimazione media per unità di larghezza della cresta della struttura q (esperimenti 1-36)

Esperimento N°	N_i	Misuratore di risalita		N_o	P_o (N_o/N_i)	q (cm^2/s)
		$\bar{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)			
37	254	0.94	2.56	114	0.45	5.85
38	211	2.28	4.38	173	0.82	29.78
39	197	2.22	5.19	168	0.85	36.76
40	263	0.54	2.05	72	0.27	2.62
41	216	1.60	3.99	140	0.65	21.05
42	216	1.56	4.47	147	0.68	28.42
43	271	0.41	1.42	24	0.09	0.51
44	208	0.40	3.12	112	0.54	9.74
45	203	0.82	3.69	127	0.63	14.12
46	258	0.84	2.35	138	0.53	9.40
47	219	1.51	3.80	171	0.78	36.60
48	206	1.48	4.61	191	0.93	48.71
49	272	0.22	1.86	81	0.30	3.72
50	212	1.13	3.45	168	0.79	26.32
51	210	1.17	4.31	173	0.82	34.63
52	255	0.22	1.41	40	0.16	1.09
53	214	0.52	2.85	119	0.56	12.39
54	207	0.61	3.46	125	0.60	17.46
55	256	0.09	1.46	91	0.36	3.32
56	216	0.48	2.60	149	0.69	16.42
57	203	0.47	3.17	151	0.74	23.53
58	264	0.38	1.91	154	0.58	7.81
59	213	0.66	3.21	171	0.80	34.79
60	212	0.74	3.67	172	0.81	41.10
61	267	0.65	2.34	170	0.64	13.33
62	263	-0.48	1.40	142	0.54	6.10
63	212	0.29	2.46	172	0.81	24.02
64	198	0.16	2.84	176	0.89	28.91
65	255	0.15	1.88	183	0.72	12.86
66	219	0.48	2.89	196	0.89	40.03
67	262	0.49	2.10	207	0.79	21.56

Tabella 3.2 (b): Statistica della risalita dell'onda sul pendio 1/5 ottenuta con il misuratore di risalita e valori misurati del numero totale di onde incidenti N_i ; del numero di eventi di tracimazione N_o ; della probabilità di tracimazione P_o e della portata di tracimazione media per unità di larghezza della cresta della struttura q (esperimenti 37-67)

Esperimento N°	N_i	Misuratore di Risalita		N_o	P_o (N_o/N_i)	q (cm^2/s)
		$\bar{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)			
68	253	-0.51	1.26	194	0.77	10.00
69	203	-0.44	2.04	179	0.88	33.46
70	263	-0.38	1.53	214	0.81	18.50
71	208	0.03	2.42	199	0.96	57.44
72	252	0.10	1.79	222	0.88	33.51
73	259	-0.39	1.08	253	0.98	20.35
74	204	-0.51	1.89	212	1.00	43.87
75	203	-0.43	2.15	215	1.00	51.39
76	261	-0.19	1.41	256	0.98	33.82
77	255	-0.41	1.60	238	0.93	42.56
78	218	-0.47	2.04	212	0.97	71.64

Tabella 3.2 (c): Statistica della risalita dell'onda sul pendio 1/5 ottenuta con il misuratore di risalita e valori misurati del numero totale di onde incidenti N_i ; del numero di eventi di tracimazione N_o ; della probabilità di tracimazione P_o e della portata di tracimazione media per unità di larghezza della cresta della struttura q (esperimenti 68-78)

3.4 Esperimenti di tracimazione e inondazione combinati

Gli esperimenti che considerano la combinazione dei fenomeni di tracimazione e inondazione sono stati condotti in maniera del tutto simile agli esperimenti di tracimazione.

Dopo la calibrazione del misuratore di risalita dell'onda, il livello d'acqua all'interno della canaletta è stato incrementato fino a superare l'elevazione della cresta della struttura. Il bacino di raccolta è stato riempito fino ad ottenere un livello d'acqua tale da innescare il moto della pompa in modo da ricircolare una certa portata d'acqua in canaletta fino ad avere l'inondazione della struttura in assenza di onde. Una volta ottenuta la stabilità del livello d'acqua in canaletta sono state calibrate le sonde G1-G7.

La portata di ricircolo della pompa è stata regolata aprendo e chiudendo manualmente la valvola della pompa ma è stato molto difficile determinare in modo preciso il livello d'acqua esatto in canaletta prima di ogni esperimento.

Dopo circa 800s dall'avvio della pompa, all'interno della canaletta si stabilivano condizioni di moto uniforme e si avviava dunque il generatore di onde irregolari. Sono stati condotti 29 esperimenti di tracimazione e inondazione combinati. Le sonde G1-G7, il misuratore di risalita dell'onda e il contatore di flusso di portata hanno registrato le serie temporali dell'oscillazione della superficie libera come per gli esperimenti di tracimazione.

La Tabella 3.3 e la Tabella 3. riportano i risultati delle misure condotte per i 29 esperimenti; in particolare i valori misurati dalle sonde G1-G6 della media $\bar{\eta}$ e della deviazione standard σ_{η} dell'oscillazione della superficie libera e i valori misurati in corrispondenza della sonda G1 dell'incremento di livello marino S , della profondità d'acqua d_1 , del periodo di picco dello spettro T_p e del coefficiente di riflessione r . Gli esperimenti sono stati numerati dal più piccolo valore dell'incremento di livello marino ($S = 17.2 \text{ cm}$) al più grande ($S = 19.4 \text{ cm}$). Il valore di S in Tabella 3.3 corrisponde all'incremento di livello marino misurato rispetto a $z=0$ in corrispondenza della sonda G1 prima dell'avvio del generatore di onde irregolari. I valori della sommergenza R_c per questo gruppo di esperimenti sono compresi tra $R_c = -0.7 \text{ cm}$ e $R_c = -2.9 \text{ cm}$. A causa dello spazio limitato tra il livello d'acqua e il carrello di supporto delle sonde non è stato possibile effettuare esperimenti con livelli d'acqua di fronte la struttura, maggiori.

I valori misurati della deviazione standard σ_{η} in corrispondenza della sonda G1 sono compresi nell'intervallo 0.73-2.23 cm per tutti i 29 esperimenti.

In Tabella 3. sono mostrati i valori ottenuti con il misuratore di risalita. Il numero di eventi di tracimazione (N_o) è assunto uguale al numero d'onde

incidenti (N_i), è stato infatti osservato che, durante gli esperimenti di tracimazione e inondazione, tutte le onde incidenti tracimavano e inondavano la cresta della struttura. La probabilità P_o di avere eventi di tracimazione è quindi uguale ad 1 per tutti i 29 esperimenti. La Tabella 3.4 riporta inoltre i valori misurati sul pendio 1/5 del livello di risalita medio $\bar{\eta}_r$ e della deviazione standard della risalita media dell'onda σ_r . La portata di tracimazione e inondazione q per unità di larghezza della cresta è compresa nell'intervallo di valori 24.2-107.48 cm^2/s .

Esperimento N°	G1						G2		G3		G4		G5		G6	
	d_1 cm	S cm	T_p s	r	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm	$\bar{\eta}$ cm	σ_η cm
79	62.8	17.2	2.03	0.30	-1.91	1.58	-1.91	1.62	-1.93	1.59	-1.88	1.58	-1.89	1.70	-1.91	1.57
80	62.8	17.2	1.69	0.23	-1.23	1.37	-1.22	1.39	-1.29	1.36	-1.23	1.34	-1.20	1.33	-1.23	1.27
81	62.8	17.2	1.89	0.34	-2.48	2.09	-2.51	2.05	-2.52	2.06	-2.46	2.05	-2.44	2.23	-2.52	2.21
82	63.0	17.4	1.62	0.22	-0.66	0.89	-0.65	0.89	-0.69	0.88	-0.66	0.85	-0.64	0.86	-0.65	0.82
83	63.1	17.5	1.88	0.27	-1.59	1.48	-1.58	1.50	-1.60	1.49	-1.62	1.44	-1.56	1.55	-1.59	1.41
84	63.1	17.5	1.64	0.22	-1.03	1.22	-1.02	1.24	-1.06	1.22	-1.00	1.18	-0.98	1.21	-1.02	1.14
85	63.1	17.5	1.97	0.28	-2.67	2.23	-2.65	2.27	-2.67	2.24	-2.61	2.21	-2.62	2.35	-2.64	2.27
86	63.3	17.7	1.61	0.18	-0.58	0.81	-0.56	0.82	-0.53	0.80	-0.51	0.76	-0.56	0.77	-0.57	0.73
87	63.6	18.0	1.57	0.14	-0.28	0.79	-0.28	0.82	-0.28	0.79	-0.28	0.76	-0.24	0.76	-0.27	0.73
88	63.6	18.0	1.69	0.16	-0.69	1.19	-0.66	1.14	-0.71	1.18	-0.69	1.15	-0.65	1.15	-0.65	1.15
89	63.6	18.0	1.88	0.25	-2.26	2.07	-2.16	1.98	-2.28	2.06	-2.24	2.03	-2.24	2.18	-2.27	2.08
90	63.7	18.1	1.87	0.22	-1.19	1.41	-1.11	1.32	-1.19	1.40	-1.17	1.35	-1.15	1.46	-1.18	1.32
91	63.7	18.1	1.65	0.15	-0.27	0.81	-0.26	0.83	-0.27	0.80	-0.27	0.78	-0.25	0.77	-0.26	0.74
92	64.1	18.5	1.96	0.19	-0.74	1.30	-0.70	1.25	-0.76	1.31	-0.75	1.27	-0.72	1.35	-0.73	1.27
93	64.1	18.5	1.56	0.13	-0.45	1.17	-0.41	1.12	-0.47	1.15	-0.45	1.10	-0.42	1.11	-0.44	1.06
94	64.1	18.5	1.88	0.21	-1.76	1.87	-1.68	1.77	-1.79	1.83	-1.76	1.81	-1.60	1.94	-1.78	1.85
95	64.4	18.8	1.59	0.11	-0.37	1.19	-0.38	1.22	-0.37	1.18	-0.37	1.13	-0.35	1.14	-0.36	1.08
96	64.4	18.8	1.93	0.17	-0.57	1.23	-0.54	1.19	-0.59	1.24	-0.58	1.18	-0.55	1.22	-0.58	1.16
97	64.4	18.8	1.65	0.13	-0.29	1.13	-0.28	1.09	-0.33	1.12	-0.32	1.08	-0.30	1.07	-0.31	1.04
98	64.4	18.8	2.06	0.20	-1.50	1.97	-1.44	1.88	-1.54	1.97	-1.52	1.91	-1.49	2.05	-1.53	1.94
99	64.7	19.1	1.57	0.10	-0.04	0.79	-0.07	0.80	-0.08	0.78	-0.06	0.74	-0.04	0.74	-0.10	0.70
100	64.8	19.2	1.97	0.13	-0.36	1.34	-0.35	1.38	-0.40	1.34	-0.40	1.29	-0.33	1.37	-0.45	1.31
101	64.8	19.2	1.64	0.10	-0.07	0.73	-0.08	0.74	-0.10	0.72	-0.10	0.69	-0.08	0.68	-0.08	0.65
102	64.9	19.3	1.63	0.12	-0.54	1.60	-0.51	1.63	-0.55	1.59	-0.55	1.54	-0.54	1.54	-0.62	1.49
103	65.0	19.4	1.62	0.10	-0.04	0.73	-0.03	0.74	-0.04	0.72	-0.04	0.69	-0.02	0.68	-0.08	0.66
104	65.0	19.4	2.03	0.13	-0.35	1.16	-0.35	1.18	-0.36	1.16	-0.36	1.12	-0.35	1.19	-0.41	1.16
105	65.0	19.4	1.58	0.11	-0.17	1.12	-0.16	1.13	-0.19	1.12	-0.19	1.06	-0.17	1.06	-0.22	1.02
106	65.0	19.4	1.95	0.15	-1.03	1.80	-1.03	1.83	-1.04	1.83	-1.05	1.76	-0.88	1.87	-1.07	1.77
107	65.0	19.4	1.60	0.09	-0.05	0.72	-0.02	0.73	-0.04	0.71	-0.04	0.67	-0.04	0.67	-0.08	0.65

Tabella 3.3: Statistica dell'oscillazione della superficie libera misurata dalle sonde G1-G6 e valori misurati dalla sonda G1 dell'incremento di livello marino S , della profondità d'acqua d_1 , del periodo di picco dello spettro T_p e del coefficiente di riflessione r . Esperimenti 79 - 107

Esperimenti N°	N_i	Misuratore di Risalita		P_o (N_o/N_i)	q (cm^2/s)
		$\bar{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)		
79	213	-1.66	2.05	1	33.13
80	256	-1.19	1.46	1	27.15
81	217	-1.62	2.80	1	26.27
82	264	-0.74	1.02	1	24.20
83	210	-1.46	1.78	1	40.32
84	266	-0.98	1.32	1	33.08
85	217	-2.08	2.60	1	48.79
86	263	-0.53	0.86	1	29.61
87	261	-0.35	0.75	1	42.66
88	257	-0.68	1.08	1	46.46
89	214	-1.77	2.21	1	58.89
90	211	-1.11	1.52	1	52.10
91	261	-0.33	0.75	1	44.30
92	210	-0.50	1.26	1	66.37
93	261	-0.42	0.90	1	62.74
94	213	-1.31	1.88	1	69.06
95	262	-0.30	0.90	1	82.36
96	211	-0.73	1.05	1	73.53
97	263	-0.11	0.81	1	73.17
98	214	-1.12	1.83	1	84.18
99	257	-0.01	0.50	1	94.70
100	212	-0.36	1.11	1	105.63
101	271	-0.01	0.51	1	87.07
102	253	-0.31	1.09	1	104.11
103	260	0.11	0.51	1	98.76
104	212	-0.18	0.97	1	100.89
105	257	-0.04	0.79	1	102.41
106	206	-0.81	1.62	1	107.48
107	260	0.10	0.51	1	99.18

Tabella 3.4: Statistica della risalita dell'onda sul pendio 1/5 ottenuta con il misuratore di risalita e valori misurati del numero totale di onde incidenti N_i ; della probabilità di tracimazione P_o e della portata di tracimazione media per unità di larghezza della cresta della struttura q (esperimenti 79-107)

La Figura 3.10 mostra l'andamento della portata di tracimazione e inondazione q_o misurata durante gli esperimenti in funzione del tirante H_1 misurato in

corrispondenza della sonda G1 per tutti i 107 esperimenti condotti. Il tirante idrico H in generale è ottenuto come $H = (S + \bar{\eta} - z_c)$ con S = incremento di livello marino misurato rispetto al livello d'acqua di partenza corrispondente a $z = 0$; $\bar{\eta}$ = oscillazione media misurata rispetto al livello marino di riferimento (SWL); e z_c = elevazione della cresta della struttura misurata rispetto a $z = 0$. $z_c = 16.53 \text{ cm}$ per tutti gli esperimenti condotti. Le due possibili situazioni per il calcolo di H sono mostrate in Figura 3.9.

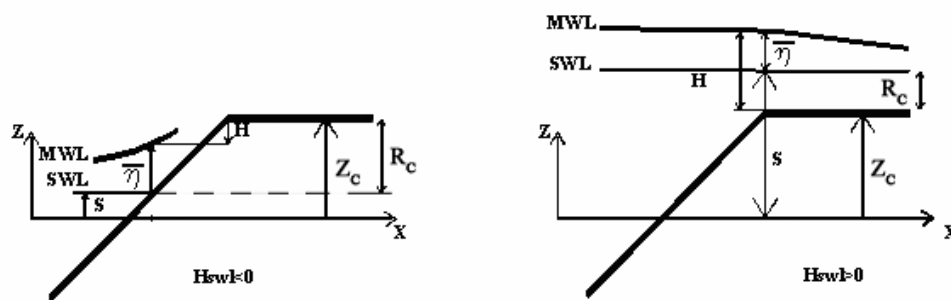


Figura 3.9: Possibili situazioni per il calcolo di H .

La portata combinata di tracimazione e inondazione q_o aumenta rapidamente con l'incremento dei valori positivi di H_1 . La Figura 3.10 evidenzia quindi l'importanza del contributo dovuto alla presenza di onde nel calcolo della portata di tracimazione e inondazione di una struttura q_o all'aumentare del valore del tirante H_1 .

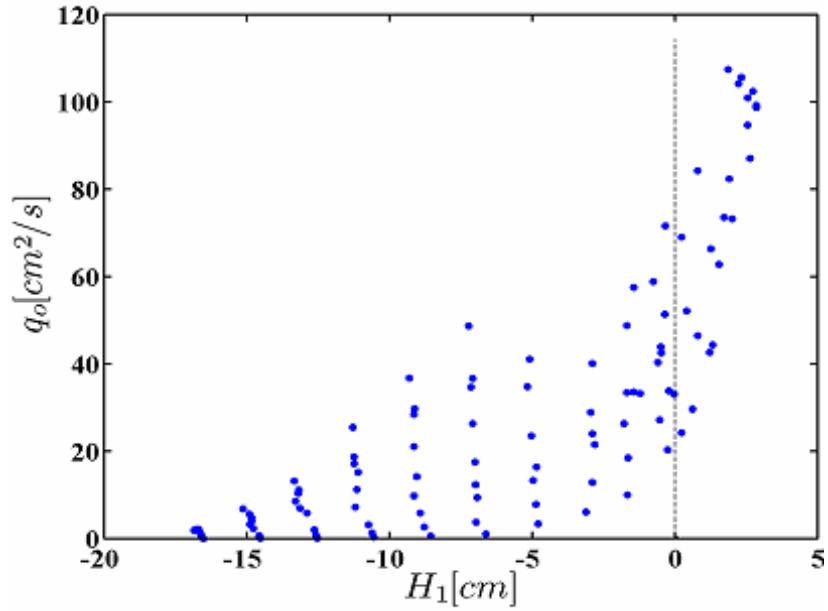


Figura 3.10: andamento della portata di tracimazione e inondazione q_o misurata in funzione del tirante H_1

3.5 Probabilità di tracimazione

I valori della probabilità di tracimazione misurati $P_o = N_i/N_o$ sono stati confrontati con i valori ottenuti utilizzando la formula proposta da Kobayashi e de los Santos (2007) data dall'Equazione (3.1), di cui si parlerà nel capitolo seguente:

$$P_o = \exp(-2R_*^x) \quad (3.1)$$

dove

$$R_* = \frac{z_c - (\overline{\eta_r} + S)}{R_{1/3} - (\overline{\eta_r} + S)} \quad \text{e} \quad R_{1/3} = (\overline{\eta_r} + S) + e\sigma_r. \quad (3.2)$$

I parametri e e κ dell'equazione (3.1) sono stati tarati utilizzando i valori misurati della probabilità di tracimazione P_o .

Sono state considerate le combinazioni tra valori $e=3, 4, 4.5$ e 5 e ($\kappa = 2 + 0.5/R_*^3$) utilizzando la distribuzione di Weibull; ($\kappa = 2$) utilizzando la distribuzione di Rayleigh, per ricavare quella che desse il miglior accordo tra i valori misurati e calcolati di P_o . I grafici relativi alle diverse combinazioni di e e κ sono mostrati nelle Figure 3.11; 3.12; 3.13; 3.14.

La formula adottata, per il calcolo della probabilità di tracimazione è basata sui valori $e=4$ e $\kappa = 2$. Si è visto infatti che la combinazione di questi valori fornisce il miglior accordo tra i valori misurati e calcolati di probabilità di tracimazione.

Questa semplice formula è stata introdotta nel modello numerico CSHOREP *time-averaged*. I risultati ottenuti con il modello numerico sono stati confrontati con i risultati sperimentali come sarà discusso nel Capitolo 5.

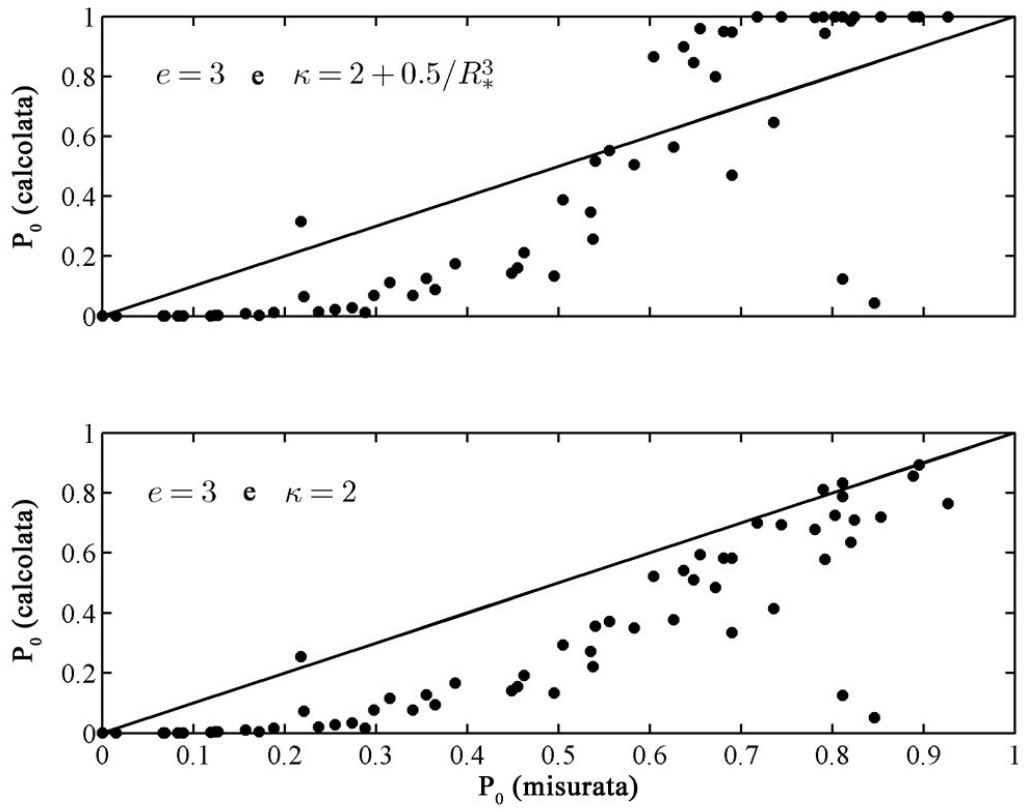


Figura 3.11: Confronto tra i valori di probabilità di traccimazione misurati e calcolati basati sul valore $e = 3$ per $\kappa = 2 + 0.5/R_*^3$ e $\kappa = 2$.

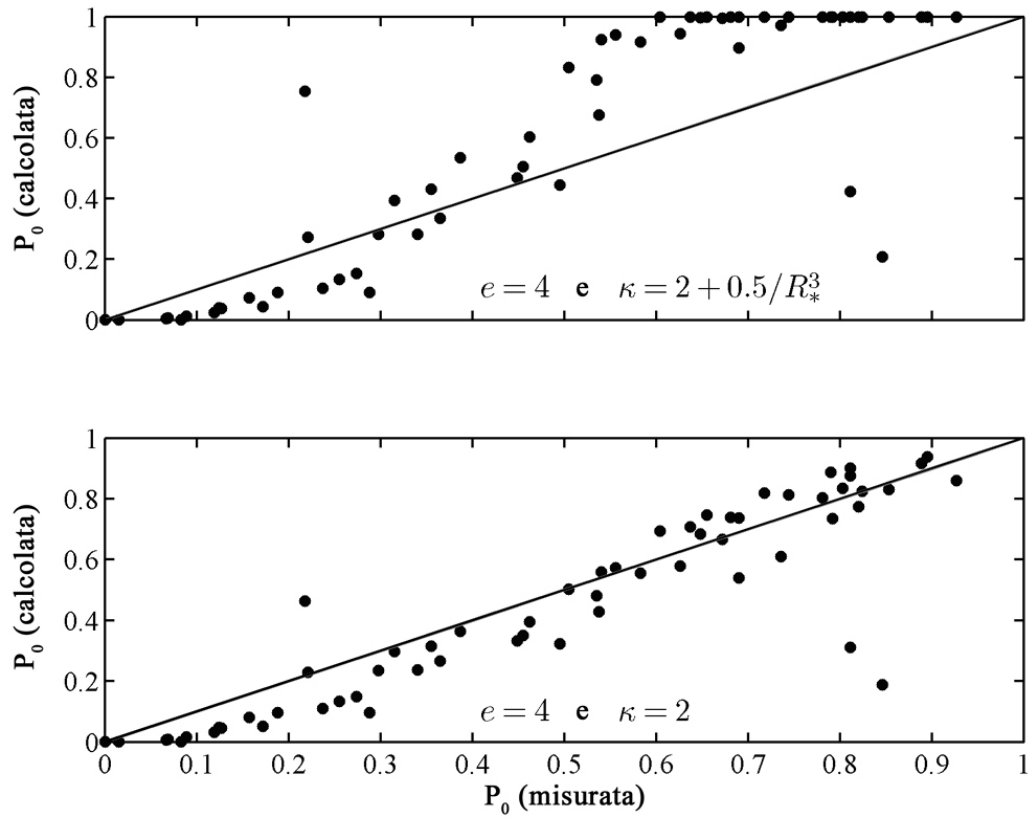


Figura 3.12: Confronto tra i valori di probabilità di traccimazione misurati e calcolati basati sul valore $e = 4$ per $\kappa = 2 + 0.5/R_*^3$ e $\kappa = 2$.

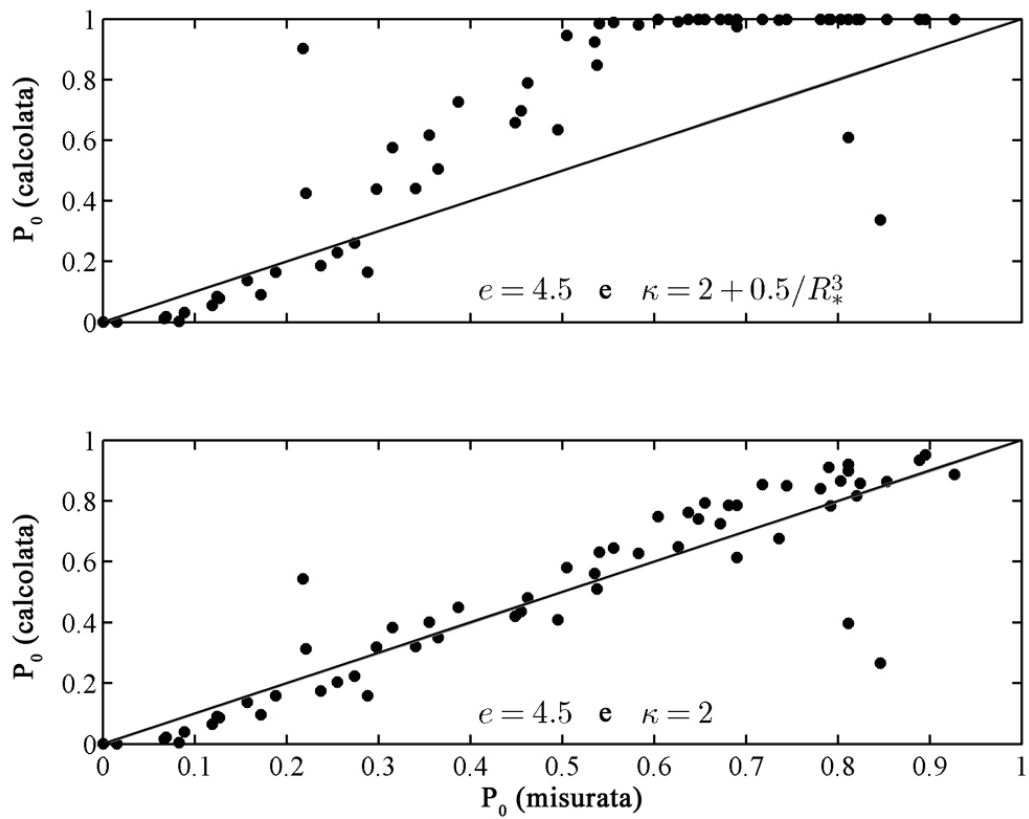


Figura 3.13: Confronto tra i valori di probabilità di traccimazione misurati e calcolati basati sul valore $e = 4.5$ per $\kappa = 2 + 0.5/R_*^3$ e $\kappa = 2$.

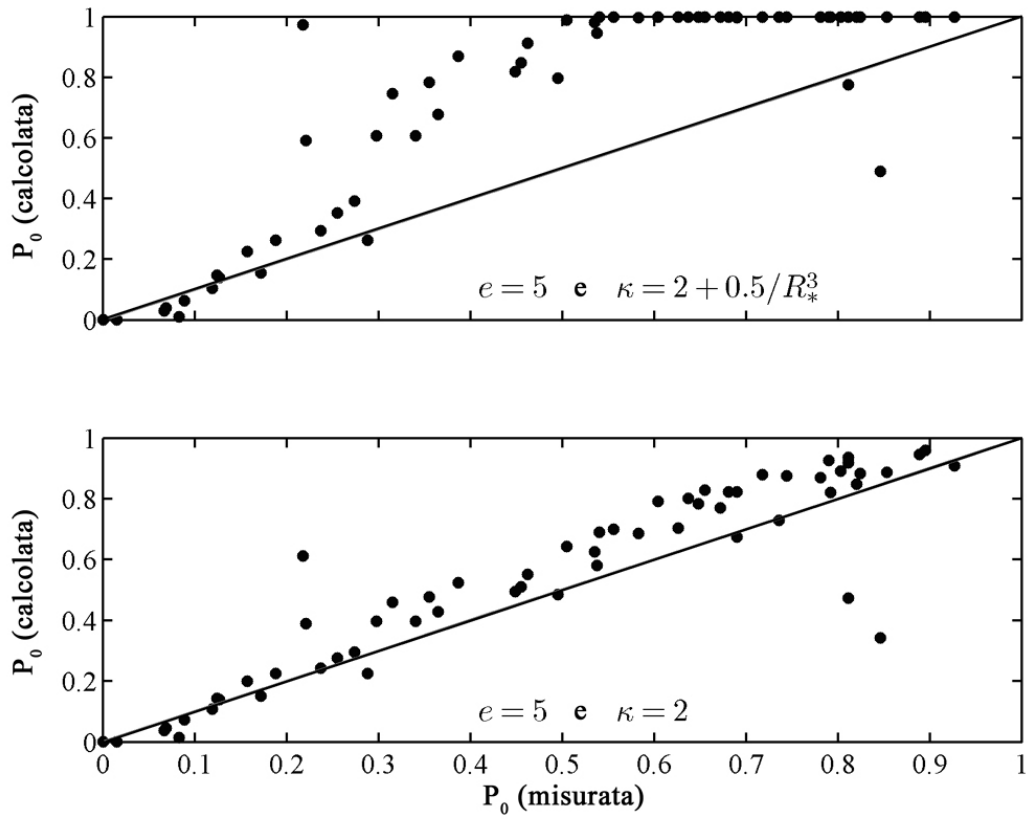


Figura 3.14: Confronto tra i valori di probabilità di traccimazione misurati e calcolati basati sul valore $e = 5$ per $\kappa = 2 + 0.5/R_*^3$ e $\kappa = 2$.

4 IL MODELLO NUMERICO

Nel presente capitolo si descrive il modello numerico CSHOREP, utilizzato per ottenere i valori delle grandezze associate al fenomeno di tracimazione di una diga costiera.

4.1 Introduzione

Il modello numerico CSHOREP è un modello ad una linea (1D) sviluppato per onde irregolari. Le grandezze utilizzate all'interno di esso, che descrivono i fenomeni di tracimazione da parte di onde irregolari di strutture di difesa costiera inclinate, sono integrate rispetto al tempo e mediate rispetto alla profondità. Il modello è costituito da un modello di interazione onda-corrente che simula le modalità di propagazione dell'onda la largo verso riva e da un modello probabilistico per la stima della risalita dell'onda e della conseguente portata di tracimazione.

Il modello di interazione onda-corrente, sviluppato da Kobayashi e de los Santos (2007), basato sulle equazioni di continuità, del moto e di bilancio dell'energia, integrate rispetto al tempo e mediate rispetto alla profondità, è stato esteso, utilizzando la teoria dell'onda lineare, introducendo nel modello il fenomeno legato all'interazione onda-corrente che simula la propagazione del moto ondoso da largo verso riva.

Nei paragrafi che seguono sono descritte le equazioni che governano il fenomeno di risalita, tracimazione e inondazione da parte dell'onda su una struttura di difesa costiera permeabile e inclinata.

4.2 Equazioni del modello di interazione onda-corrente

Il modello numerico descritto nel presente capitolo considera il caso di onde irregolari incidenti perpendicolarmente alla linea di riva e batimetria uniforme in direzione *long-shore*.

Il problema può essere presentato schematicamente osservando la Figura 4.1. in cui la coordinata in direzione *cross-shore*, x , è positiva verso riva, mentre la coordinata verticale, z , è positiva verso l'alto. Si assume che la coordinata z sia uguale a zero in corrispondenza del livello medio mare iniziale (*Datum*). I limiti superiore ed inferiore del rivestimento permeabile della struttura, se presente, sono indicati rispettivamente dai valori di $z = z_b$ e $z = z_p$. Il limite inferiore z_p corrisponde a fondo impermeabile.

La profondità del mare e l'elevazione della superficie marina sono indicati rispettivamente con h ed η e la profondità può essere scritta come $h = (\eta - z_b)$.

La componente orizzontale di velocità della massa fluida, U , è mediata rispetto alla profondità.

Il modello numerico utilizza le equazioni di continuità, del moto e di bilancio dell'energia, integrate rispetto al tempo e mediate rispetto alla profondità, suggerite da Kobayashi et al. (2007) per lo studio dei fenomeni di frangimento e trasmissione dell'onda su struttura sommersa e porosa.

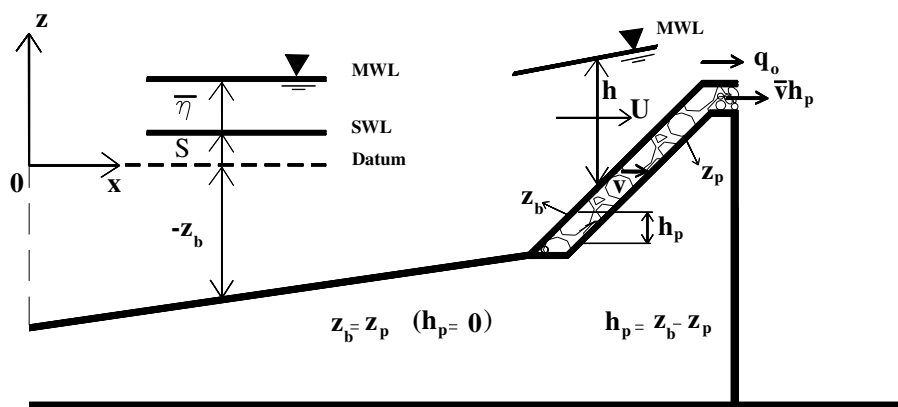


Figura 4.1: rappresentazione schematica delle grandezze considerate nel modello numerico CSHOREP per lo studio dei fenomeni di tracimazione e inondazione di strutture di difesa costiera

Le grandezze rappresentate in Figura 4.1 hanno il significato descritto di seguito:

z_p = elevazione del limite inferiore del rivestimento permeabile della struttura;

z_b = elevazione del limite superiore del rivestimento permeabile della struttura;

$h_p = (z_b - z_p)$ = spessore della mantellata di rivestimento;

S = incremento di livello dovuto alla mareggiata e all'escursione di marea, si assume costante nella regione $x \geq 0$ e viene specificato come input in corrispondenza di $x = 0$;

η = elevazione della superficie marina misurata a partire da S ;

$\bar{\eta}$ = setup o setback dell'onda misurata a partire dal livello S ;

\bar{U} = componente orizzontale della velocità della massa fluida sulla struttura inclinata, integrata rispetto al tempo e mediata rispetto alla profondità;

v = componente orizzontale della velocità, mediata rispetto alla verticale, della portata che attraversa il rivestimento permeabile;

q = portata, mediata rispetto al tempo, trascinante struttura inclinata;

$d = (S - z_b)$ = profondità del fondo misurata tenendo conto dell'incremento di livello S ;

$\bar{h} = (\bar{\eta} + d)$ = profondità media con $\bar{\eta}$ elevazione media della superficie libera.

Al fine di capire come la presenza di correnti può influenzare le caratteristiche dell'onda che si propaga da largo verso riva, la relazione di dispersione, derivata dalla teoria dell'onda lineare, può essere riscritta in presenza di correnti come segue (Dean e Dalrymple 1991):

$$\omega_p = \omega + k \frac{q}{h} \quad \text{e} \quad \omega^2 = kg \tanh(kh) \quad (4.1)$$

con g accelerazione di gravità; ω frequenza angolare basata sul periodo d'onda T ; k numero d'onda; ω_p frequenza angolare assoluta basata sul periodo di picco dello spettro T_p in corrispondenza del limite verso mare localizzato a $x = 0$.

Inoltre la relazione di dispersione per onde in acque basse è approssimata come:

$$\omega^2 = kg \tanh(kh) \approx k^2 gh \quad (4.2)$$

Combinando le equazioni (4.1) e (4.2) si ottiene:

$$\omega_p \approx \omega + \omega \frac{q/h}{\sqrt{gh}} = \omega \left(1 + \frac{q}{h\sqrt{gh}} \right) \quad (4.3)$$

Utilizzando un canale idraulico aperto (Henderson 1966), la portata che inonda la struttura può essere stimata come:

$$q \approx h\sqrt{gh} \quad (4.4)$$

introducendo l'espressione (4.4) la (4.3) diventa:

$$\omega_p = 2\omega \quad \text{o analogamente} \quad T = 2T_p \quad (4.5)$$

che dimostra come, a causa del fenomeno di inondazione della struttura, il periodo dell'onda incrementa il suo valore del doppio indicando il sostanziale effetto dovuto alla presenza di correnti nel fenomeno di tracimazione dell'onda sulla cresta della diga. L'incremento del periodo d'onda comporta un decremento dei valori della frequenza angolare ω , della celerità dell'onda C e della velocità di gruppo di un treno di onde C_g .

$$C = \frac{\omega}{k}; \quad C_g = nC; \quad n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (4.6)$$

Al fine di ricavare il valore del numero d'onda k per assegnati valori di h , ω_p e q , l'equazione (4.1) può essere riscritta come:

$$\omega_p = [kg \tanh(kh)]^{0.5} + k \frac{q}{h} \quad (4.7)$$

Esprimendo il numero d'onda in condizioni di acqua profonde k_o , in assenza di fenomeni di inondazione ($q = 0$) come:

$$k_o = \frac{\omega_p^2}{g} = \frac{(2\pi)^2}{gT_p^2} \quad (4.8)$$

L'equazione (4.7) può essere riscritta come:

$$X \tanh(X) = a(1 - bX)^2 \quad (4.9)$$

dove: $X = kh$; $a = k_o h$; $b = \frac{1}{\omega_p} \frac{q}{h^2}$; e $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$.

Risolviendo iterativamente l'equazione (4.9) è possibile calcolare tutte le quantità connesse al numero d'onda k .

4.2.1 Equazione di continuità mediata rispetto al tempo

Per onde progressive lineari, in condizioni di profondità finita, e presenza di correnti, la deviazione standard della velocità ($U - \bar{U}$) è data da:

$$\sigma_U = C \sigma_* \quad (4.10)$$

dove: σ_U è la deviazione standard della velocità U ; $\sigma_* = \sigma_\eta / h$ e σ_η è la deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η .

La portata associata alle onde che si propagano ortogonalmente alla linea di riva è indicata con q_{waves} , ed è pari alla quantità:

$$q_{waves} = \frac{g \sigma_\eta^2}{C} \quad (4.11)$$

la portata totale dovuta alla combinazione tra onda progressiva lineare e corrente può essere scritta come:

$$q = h\bar{U} + gC^{-1}\sigma_\eta^2 = h\bar{U} + \frac{gh}{C^2}\sigma_U\sigma_\eta \quad (4.12)$$

Le equazioni (4.10) e (4.12) sono utilizzate nel modello numerico per la stima di σ_U e \bar{U} noti C , h , σ_η e q .

In acque basse, la celerità dell'onda è $C \approx \sqrt{gh}$, per cui l'equazione (4.12) diviene:

$$q = h\bar{U} + \sigma_U \sigma_\eta \quad (4.13)$$

che corrisponde all'equazione utilizzata da Kobayashi e de los Santos (2007) nel modello per il calcolo della portata di tracimazione ed infiltrazione su difese costiere inclinate e permeabili.

L'equazione di continuità integrata rispetto al tempo in presenza di rivestimento permeabile sulla struttura può essere scritta come:

$$\frac{\partial}{\partial x}(q + \bar{v}h_p) = 0 \quad (4.14)$$

in cui \bar{v} è la componente orizzontale della velocità, mediata rispetto al tempo associata alla portata che attraversa lo strato di rivestimento permeabile.

L'integrazione dell'equazione (4.14) produce:

$$q + \bar{v}h_p = q_t = q_o + q_s + q_f \quad (4.15)$$

dove le quantità q_t , q_o , q_s , q_f rappresentano:

q_t = portata totale in corrispondenza del limite verso terra della cresta della struttura;

q_o = portata di tracimazione;

q_s = portata che passa attraverso il rivestimento permeabile;

q_f = portata di inondazione.

Combinando le equazioni (4.12) e (4.15) si ottiene:

$$\bar{U} = -\sigma_*^2 \frac{gh}{C} + \frac{q_t - \bar{v}h_p}{h} \quad (4.16)$$

in cui $q_t = q$ nel caso di pendio impermeabile con $h_p = 0$.

4.2.2 Equazione del moto mediata rispetto al tempo

In presenza di correnti, l'equazione del moto mediata rispetto al tempo e al tirante idrico può essere scritta come (Mei 1989):

$$\frac{d}{dx} \left(h^{-1} q^2 + \frac{S_{xx}}{\rho} \right) + gh \frac{d\bar{\eta}}{dx} + \frac{\tau_b}{\rho} = 0 \quad (4.17)$$

dove S_{xx} è la componente del *radiation stress* in direzione *cross-shore*, la cui espressione è:

$$S_{xx} = \rho g \sigma_\eta^2 (2n - 0.5) \quad (4.18)$$

dove ρ è la densità del fluido ed $n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2hh}{\sinh(2kh)} \right]$.

Per *radiation stress* si intende il flusso di quantità di moto netto esercitato dalle onde sulla colonna d'acqua (Longuet-Higgins e Stewart 1964).

La tensione tangenziale al fondo τ_b e la corrispondente energia dissipata dall'onda a causa dell'effetto di attrito al fondo D_f , di cui si discuterà meglio nel prossimo paragrafo, sono espresse utilizzando le formule basate sulla forza di trascinamento suggerite da Kobayashi et al. (2007). Assumendo che U abbia una distribuzione Gaussiana e considerando l'equivalenza tra il tempo e la media probabilistica, è possibile esprimere τ_b e D_f in funzione della velocità media \bar{U} e della deviazione standard σ_U , con $U_* = \bar{U}/\sigma_U$:

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho f_b \sigma_U^2 G_2(U_*) \quad (4.19)$$

$$D_f = \frac{1}{2} \rho f_b \sigma_U^3 G_3(U_*) \quad (4.20)$$

dove f_b è il fattore di attrito al fondo pari a $f_b = 0$ nella zona in cui $z_b = z_p$.
Le funzioni analitiche $G_2(r)$ e $G_3(r)$, funzioni della variabile arbitraria r , sono discusse in Kobayashi et al. (2007) e possono essere approssimate nel modo seguente: $G_2 \approx 1.64r$ e $G_3(r) \approx (1.6 + 2.6r^2)$ per $|r| < 1$.

La velocità media \bar{U} è stimata utilizzando l'equazione di continuità (4.16) mediata rispetto al tempo e integrata lungo la verticale.

Il livello medio della superficie marina $\bar{\eta}$, calcolato attraverso l'equazione (4.17), è influenzato dal *radiation stress* S_{xx} e dalla portata q .

Se la quantità di moto netta esercitata dalle onde sulla colonna d'acqua in direzione *cross-shore* è nulla, $S_{xx} = 0$, e la tensione tangenziale al fondo è nulla, $\tau_b = 0$, l'equazione (4.17) diventa $[\bar{U}^2 / (2g) + \bar{\eta}] = \text{costante}$. Questa equazione è stata utilizzata in caso di corrente in moto permanente che passa su uno stramazzo a larga soglia (Henderson 1966) e dimostra come, in assenza di onde, il livello medio della superficie marina $\bar{\eta}$ decresce muovendosi verso riva, all'aumentare della velocità media \bar{U} .

4.2.3 Equazione di bilancio dell'energia dell'onda

La legge di conservazione dell'energia dell'onda tiene conto della dissipazione di energia subita dall'onda per effetto del frangimento, del passaggio dell'onda attraverso uno strato di massi permeabile e dell'attrito al fondo.

L'equazione dell'energia mediata rispetto al tempo, in assenza di onde, è stata sostituita dall'equazione dell'azione dell'onda che include la presenza di correnti e può essere scritta come (Phillips 1977):

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{\rho g \sigma_{\eta}^2}{\omega} (C_g + h^{-1} q) \right] = - \frac{D_B + D_f + D_r}{\omega} \quad (4.21)$$

dove i termini D_r , D_B e D_f rappresentano l'energia dissipata, rispettivamente, all'interno del rivestimento permeabile della struttura, a causa del frangimento, e a causa dell'attrito al fondo.

Nell'equazione (4.21) il termine $h^{-1}q$ corrisponde alla velocità della corrente; in assenza di correnti, $q=0$, e $\omega = \omega_p$ dall'equazione (4.1). Con queste sostituzioni l'equazione (4.21) si riduce all'equazione di conservazione dell'energia utilizzata da Kobayashi et al. (2007).

L'energia dissipata a causa del frangimento D_B viene stimata utilizzando la formula proposta da Battjes e Stive (1985) modificata da Kobayashi et al.(2007 b) al fine di tener conto degli effetti dovuti alla pendenza del fondale marino. In particolare, l'energia dissipata a causa del frangimento delle onde viene stimata da Battjes e Stive, come:

$$D_B = \left[\frac{\rho g a Q H_B^2}{4T} \right] \quad (4.22)$$

dove H_B è l'altezza d'onda a cui avviene il frangimento utilizzata per la stima della quantità D_B e Q è la frazione di onde soggette al frangimento. In particolare $Q = 0$ se nessuna onda raggiunge il frangimento viceversa, $Q = 1$ se tutte le onde frangono. La frazione di onde soggette a frangimento viene stimata con l'equazione implicita suggerita da Battjes e Stive (1985):

$$\frac{Q-1}{\ln Q} = \left(\frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 \quad (4.23)$$

con

$$H_m = \frac{0.88}{k} \tanh\left(\frac{\gamma kh}{0.88}\right) \quad (4.24)$$

H_m indica la massima altezza che un'onda può raggiungere in corrispondenza di una fissata profondità, \bar{h} , prima di frangere. In particolare, nel caso di acque basse $H_m = \gamma \bar{h}$ con γ parametro di frangimento.

Il parametro a dell'Equazione (4.22) rappresenta il rapporto tra la lunghezza d'onda e la lunghezza di scala orizzontale che dipende dalla pendenza del fondale locale $S_b = dz_b/dx$, alla profondità \bar{h} vicino la linea di riva. Si assume che questo rapporto sia $a \geq 1$ e dato da:

$$a = \frac{(2\pi/k)}{3h/S_b} \geq 1 \quad (4.25)$$

L'effetto della corrente, che influenza il frangimento dell'onda (Sakai and Kobayashi 1990), è introdotto utilizzando il periodo d'onda ottenuto con l'equazione (4.9), nell'equazione (4.22). La presenza di correnti porta ad un incremento del periodo d'onda con conseguente diminuzione di D_B . Inoltre, nelle equazioni (4.24) e (4.25), viene utilizzato il numero d'onda k ottenuto con l'equazione (4.9).

La frazione di energia dissipata all'interno del rivestimento permeabile è calcolata utilizzando la formula sviluppata da Kobayashi et. al. (2007 b) nella quale si assume che la velocità della portata che attraversa lo strato permeabile v segua una distribuzione di tipo Gaussiano:

$$D_r = \rho h_p \left[\alpha \sigma_v^2 (1 + v_*^2) + \beta \sigma_v^3 G_3(v_*) \right] \quad (4.26)$$

in cui σ_v è la deviazione standard della velocità v e G_3 è la stessa funzione utilizzata nell'equazione (4.20) scritta in funzione di $r = v_*$.

I parametri dell'equazione (4.26) sono calcolati utilizzando le seguenti relazioni:

$$v_* = \frac{\bar{v}}{\sigma_v}; \quad \alpha = \alpha_o \left(\frac{1-n_p}{n_p} \right)^2 \frac{v}{D_{n50}^2}; \quad \beta = \left(\beta_1 + \frac{\beta_2}{\sigma_v} \right); \quad (4.27)$$

$$\beta_1 = \frac{\beta_o(1-n_p)}{n_p^3 D_{n50}}; \quad \beta_2 = \frac{7.5\beta_o(1-n_p)}{\sqrt{2}n_p^2 T}$$

dove α_o e β_o sono due parametri empirici calibrati con valori di $\alpha_o = 1000$ e $\beta_o = 5$; n_p è la porosità dello strato permeabile; D_{n50} è il diametro nominale definito come $D_{n50} = (M_{50}/\rho_s)^{1/3}$ con M_{50} massa media dei massi e ρ_s densità dei massi e ν viscosità cinematica dell'acqua.

Considerando il bilancio delle forze locali tra il gradiente orizzontale della pressione idrostatica e la resistenza del flusso all'interno dello strato permeabile di rivestimento, i valori di \bar{v} e σ_v sono calcolati utilizzando le seguenti espressioni:

$$(\alpha + 1.64\beta\sigma_v)\bar{v} = -g \frac{d\bar{\eta}}{dx}; \quad \alpha\sigma_v + 1.9\beta\sigma_v^2 = gkh\sigma_* \quad (4.28)$$

che risolte forniscono i valori di \bar{v} e σ_v per assegnati valori di $k\bar{h}\sigma_*$ e $d\bar{\eta}/dx$.

Poiché negli esperimenti condotti per il presente studio, e discussi nel Capitolo 3, è stato utilizzato un pendio impermeabile, non vi è il contributo dell'energia

dissipata attraverso il rivestimento permeabile di massi, di conseguenza $D_r=0$, e l'equazione (4.21) può essere semplificata come:

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{\rho g \sigma_\eta^2}{\omega} \left(C_s + \frac{q}{h} \right) \right] = - \frac{D_B + D_f}{\omega} \quad (4.29)$$

4.3 Procedura di calcolo

La procedura di calcolo del modello numerico utilizza le equazioni discusse nei paragrafi precedenti. Il calcolo inizia dal nodo corrispondente all'origine del sistema di riferimento e continua muovendosi da largo verso riva assumendo un valore iniziale di portata q . Le equazioni (4.17) e (4.29) sono risolte utilizzando il metodo alle differenze finite utilizzando una distanza costante tra un nodo e il successivo.

La portata q assunta come dato di partenza, è confrontata con la portata di tracimazione e inondazione calcolata con la formula seguente:

$$q = P_o q_{SWL} + H_{SWL} \sqrt{g H_{SWL}} \quad \text{per} \quad H_{SWL} > 0 \quad (4.30)$$

con:

$$H_{SWL} = \bar{\eta} + S - z_c \quad \text{a} \quad x = x_{SWL} \quad (4.31)$$

Nelle equazioni (4.30) e (4.31) P_o è la probabilità che si verifichi tracimazione delle onde incidenti sulla struttura; q_{SWL} è la portata indotta dall'onda in direzione *on-shore*; q_{wave} è la portata ottenuta con l'equazione (4.11) calcolata nel nodo corrispondente a $x = x_{SWL}$ e H_{SWL} altezza della cresta della struttura misurata rispetto al livello medio marino (*MWL*) che tiene conto del valore medio della risalita dell'onda sul pendio, $\bar{\eta}$ a sua volta misurato rispetto

all'incremento di livello S (SWL) in corrispondenza della coordinata orizzontale $x = x_{SWL}$. L'incremento di livello S e l'altezza della cresta della struttura z_c sono misurati a partire dal livello d'acqua di partenza corrispondente a $z = 0$ (*Datum*). La profondità d'acqua $[S - z_b(x)]$ è zero in corrispondenza di $x = x_{SWL}$.

Se il livello marino supera la cresta della struttura, $S > z_c$, e la cresta della struttura è sommersa. La coordinata orizzontale x_{SWL} , in questo caso, è scelta in corrispondenza del bordo del paramento inclinato lato mare della diga e H_{SWL} rappresenta il tirante d'acqua misurato rispetto alla cresta della struttura. La quantità $\sqrt{gH_{SWL}}$ può essere considerata, dunque, la corrispondente velocità.

Nel caso in cui si abbia $H_{SWL} \leq 0$, invece, si assume che non avvenga inondazione della struttura, di conseguenza l'equazione (4.30) si riduce a $q = P_o q_{SWL}$ che corrisponde all'equazione per il calcolo della portata di tracimazione utilizzata da Kobayashi e de los Santos (2007) nel caso di dighe impermeabili. La Figura 4.2 mostra una rappresentazione schematica delle due possibili condizioni del livello d'acqua misurato rispetto alla cresta della struttura.

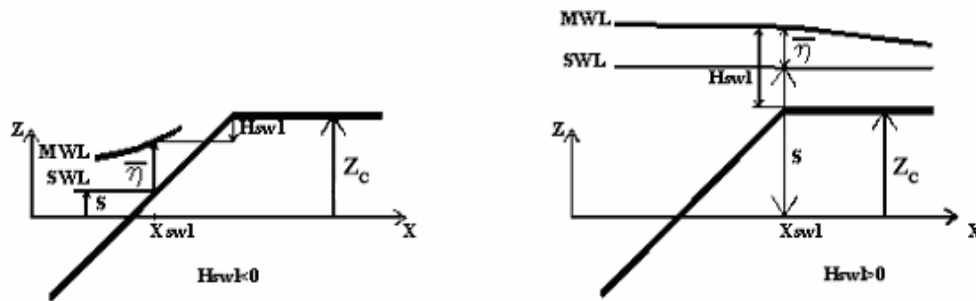


Figura 4.2: Due possibili condizioni di livello d'acqua sulla cresta della struttura

4.4 Modello probabilistico per la stima della portata di tracimazione

Il modello probabilistico, utilizzato nel modello numerico CSHOREP, sviluppato da Kobayashi and de los Santos (2007), per lo studio del fenomeno di risalita di onde irregolari, su una struttura di difesa inclinata e permeabile è stato modificato per includere la stima della probabilità di risalita dell'onda su un pendio impermeabile.

Il modello utilizza i valori di $\bar{\eta}(x)$ e $\sigma_{\eta}(x)$ calcolati nel caso di scarpata impermeabile. Per misurare l'elevazione della superficie libera sul paramento inclinato della diga costiera è stato utilizzato un misuratore di risalita posizionato parallelamente al pendio ad una distanza verticale δ_r come mostrato in Figura 4.3. L'oscillazione media della superficie libera $\bar{\eta}_r$ e la corrispondente deviazione standard, σ_r , vengono stimate utilizzando il metodo schematizzato in Figura 4.3 e discusso a seguire.

Si assume che la probabilità che l'oscillazione della superficie libera η , superi i valori di $\bar{\eta} + \sigma_{\eta}$, $\bar{\eta}$, e $\bar{\eta} - \sigma_{\eta}$, sia uguale alla probabilità che l'elevazione della superficie libera sul pendio inclinato η_r superi $\bar{\eta}_r + \sigma_r$, $\bar{\eta}_r$, e $\bar{\eta}_r - \sigma_r$. In Figura 4.3, le elevazioni z_1, z_2 e z_3 corrispondono ai punti di intersezione del misuratore di risalita dell'onda con i valori di livello di risalita $\bar{\eta} + \sigma$, $\bar{\eta}$, e $\bar{\eta} - \sigma$ rispettivamente. Questi valori sono calcolati utilizzando i valori di $\bar{\eta}(x)$ e $\sigma_{\eta}(x)$ misurati lungo il misuratore di risalita, la cui elevazione rispetto al fondo è pari $[z_b(x) + \delta_r]$.

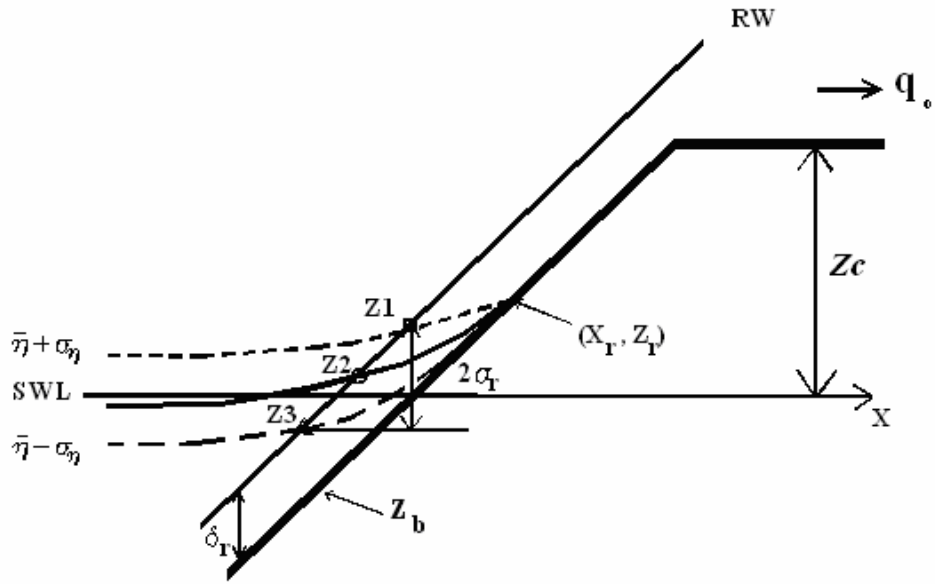


Figura 4.3: Schema del modello probabilistico per il calcolo della risalita dell'onda

Il modello probabilistico assume che i valori di z_1, z_2 e z_3 corrispondono a $z_1 = (\bar{\eta}_r + \sigma_r)$, $z_2 = \bar{\eta}_r$ e $z_3 = (\bar{\eta}_r - \sigma_r)$. La media e la deviazione standard dell'elevazione della superficie libera sul pendio nel tempo $\eta_r(t)$ sono dunque calcolate con le formule seguenti:

$$\bar{\eta}_r = \frac{(z_1 + z_2 + z_3)}{3} \quad ; \quad \sigma_r = \frac{(z_1 - z_3)}{2} \quad (4.32)$$

L'uso di z_1, z_2 e z_3 per il calcolo della risalita media è più affidabile dell'uso di $\bar{\eta}_r = z_2$ poiché l'elevazione z_2 è leggermente più sensibile alla continua variazione spaziale di $\bar{\eta}(x)$.

L'altezza di risalita dell'onda R è definita come l'altezza della cresta dell'onda dovuta alla variazione temporale η_r e misurata rispetto al punto in cui il livello marino interseca il misuratore di risalita posto sul pendio. La serie temporale dell'elevazione della superficie libera sul pendio $1/5$, $[\eta_r(t) - \bar{\eta}_r]$ è stata

analizzata utilizzando il metodo dello *zero-upcrossing* al fine di calcolare il numero di onde incidenti. La stessa procedura è stata utilizzata per l'analisi delle creste d'onda presenti nelle serie temporale dell'oscillazione della superficie libera $\eta(t)$, registrate in canaletta dalle sonde G1-G6 la differenza sta nel fatto che in quest'ultimo caso la cresta dell'onda è definita come l'altezza d'onda misurata sul livello medio marino di riferimento.

Kobayashi e de los Santos (2007) hanno proposto una relazione per il calcolo dei valori della probabilità P_o che la risalita dell'onda su una struttura permeabile, superi l'altezza della cresta della struttura z_c :

$$P_o = \exp(-2R_*^\kappa) ; R_* = \frac{z_c - (\overline{\eta_r} + S)}{R_{1/3} - (\overline{\eta_r} + S)} \quad (4.33)$$

con $R_{1/3} = (\overline{\eta_r} + S) + (2 + \tan \theta)\sigma_r$,

dove il parametro $\kappa = 2 + 0.5/R_*^3$, se viene utilizzata la distribuzione di Weibull, mentre $\kappa = 2$ se si utilizza la distribuzione di Rayleigh; z_c = altezza della cresta della struttura misurata a partire dal livello marino di partenza in corrispondenza di $z = 0$; R_* = altezza della cresta della diga normalizzata; $R_{1/3}$ = altezza di risalita d'onda significativa, misurata rispetto a $z = 0$, definita come l'altezza media del terzo dei valori di risalita dell'onda più alti presenti nella serie temporale; e $\overline{\eta_r}$ e σ_r = media e deviazione standard dell'elevazione della superficie libera sul livello marino misurata dal misuratore di risalita; θ = angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale lato mare della diga.

L'equazione (4.33) è applicabile solo nel caso in cui l'elevazione della cresta della struttura z_c è maggiore dell'elevazione media della superficie libera $(S + \overline{\eta_r})$, comprensiva dell'incremento di livello, misurata a partire dal riferimento $z = 0$. Dunque nel caso in cui si abbia $R_* > 0$

Nel caso in cui risulta $R_* \leq 0$, la probabilità di tracimazione dell'onda si assume uguale ad uno ($P_o = 1$).

I valori di $\overline{\eta}_r$ e σ_r sono ottenuti utilizzando l'equazione (4.32).

Considerando che il misuratore di risalita dell'onda, posizionato sul pendio impermeabile, non tiene conto del fatto che vi è un piccolo strato di risalita, dell'acqua il cui spessore è minore della distanza del misuratore di risalita dell'onda rispetto al pendio, δ_r , l'equazione (4.33) può essere modificata calcolando l'altezza d'onda significativa come $R_{1/3} = (\overline{\eta} + S) + e\sigma_r$ dove $e =$ costante empirica.

I valori di κ ed e , che forniscono il miglior risultato numerico, sono stati tarati utilizzando i valori misurati di P_o , come già detto nel paragrafo 3.5.

La distribuzione di Rayleigh ($\kappa=2$) e il valore di $e=4$ hanno dato il miglior accordo tra la probabilità di tracimazione misurata e calcolata rispetto alla distribuzione di Weibull proposta da Kobayashi e de los Santos (2007) nel caso di dighe costiere con paramento lato mare permeabile. Di conseguenza l'equazione (4.33) è stata modificata nel modello numerico per pendii impermeabili come segue:

$$P_o = \exp(-2R_*^2) ; R_* = \frac{R_c - (\overline{\eta}_r + S)}{4\sigma_r} \quad (4.34)$$

L'equazione (4.34) è applicabile solo a dighe con scarpata impermeabili per le quali si ha che lo strato di risalita dell'onda è notevolmente più alto rispetto al corrispondente pendio permeabile dove parte dell'acqua è soggetta ad infiltrazione.

La procedura per il calcolo della portata di tracimazione è una procedura iterativa. Essa inizia assumendo un valore iniziale nullo di portata di tracimazione $q = 0$. Una volta avviata, la procedura di calcolo utilizza le

equazioni (4.30) e (4.34) per calcolare la portata q . Se il valore calcolato di q è minore di $0.01 \text{ cm}^2/s$, il modello pone questo valore a $q = 0$ e l'iterazione converge. Se il valore calcolato è invece $q \geq 0.01 \text{ cm}^2/s$, il modello restituisce in uscita il valore ottenuto con le equazioni (4.30) e (4.34).

Il semplice metodo iterativo, proposto da Kobayashi e de los Santos (2007), non convergeva per alcuni dei 107 esperimenti di conseguenza esso è stato sostituito con il metodo della bisezione di seguito spiegato. Si suppone che il valore iniziale di portata di tracimazione $q = 0$ corrisponda al minimo valore che la grandezza può assumere, q_{\min} . Il corrispondente valore di q calcolato risulta essere il massimo valore q_{\max} . La procedura di calcolo va avanti quindi considerando il valore $q_o = (q_{\min} + q_{\max})/2$. Se la differenza tra il valore calcolato e quello ipotizzato di q diventa minore dell'1%, l'iterazione converge. Altrimenti, l'intervallo tra q_{\min} e q_{\max} è dimezzato. Il presunto valore di q è considerato come il nuovo valore di q_{\max} o q_{\min} a seconda che il valore calcolato di q sia minore o maggiore del valore presunto. Questo procedimento iterativo converge dopo un certo numero di iterazioni. Il massimo numero di iterazioni per i 107 esperimenti descritti nel Capitolo 3 è 13.

4.5 Formula empirica per il calcolo della portata di tracimazione

Per confrontare i risultati del modello numerico con una formula empirica presente in letteratura il modello utilizza la formula empirica riportata in *TAW technical report* (van der Meer 2002). Questa formula è riportata separatamente per il caso in cui si ha frangimento delle onde e per il caso in cui non si ha frangimento.

Onde soggette al frangimento, $\gamma_b \xi_o \leq 2$:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \theta}} \gamma \xi_o \exp \left[-4.75 \frac{R_c}{H_{mo}} \frac{1}{\xi_o \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v} \right] \quad (4.35)$$

Onde non soggette al frangimento, $\gamma_b \xi_o > 2$:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.2 \exp \left[-2.6 \frac{R_c}{H_{mo}} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta} \right] \quad (4.36)$$

dove $H_{mo} = \sqrt{2}H_{ms}$ =altezza d'onda significativa misurata al piede della struttura; $\tan \theta$ =inclinazione del paramento lato mare della struttura; $\xi_o = \tan \theta / \sqrt{s_o}$ parametro di frangimento; $s_o = 2\pi H_{mo} / (gT_{m-1,o}^2)$; $T_{m-1,o}$ =periodo d'onda spettrale (m_{-1}/m_o) al piede della struttura; $T_p = 1.1T_{m-1,o}$ nel caso di spettri d'onda in cui sia possibile individuare chiaramente il picco; γ_b = fattore che tiene conto della presenza della berma (in assenza di berma $\gamma_b = 1$); γ_β = fattore che tiene conto dell'angolo di incidenza dell'onda (per onde incidenti perpendicolarmente alla struttura $\gamma_\beta = 1$); γ_f =fattore che tiene conto della scabrezza della struttura (per pendii lisci che includono presenza di piccola vegetazione, $\gamma_f = 1.0$); γ_v =fattore che tiene conto della presenza di muri verticali sulla struttura (in assenza di muri verticali $\gamma_v = 1.0$). Si mette in evidenza che le equazione (4.34) e (4.35) sono valide per strutture in cui l'altezza della cresta (R_c) sul livello marino sia maggiore di $0.5H_{mo}$ circa e non tenga conto esplicitamente della risalita dell'onda.

Le condizioni sperimentali descritte nel Capitolo 3, hanno considerato una struttura liscia impermeabile e inclinata sulla quale le onde incidono ortogonalmente, di conseguenza i coefficienti γ_f , γ_b , γ_β , γ_v sono tutti pari a

1. Inoltre essendo $\xi_o = \tan \theta / \sqrt{s_o}$ le equazioni (4.34) e (4.35) possono essere riscritte come:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.067 \sqrt{\frac{\tan \theta}{s_o}} \exp\left[-4.75 \frac{R_c}{H_{mo}} \frac{\sqrt{s_o}}{\tan \theta}\right] \quad \text{per } \xi_o \leq 2 \quad (4.37)$$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.2 \exp\left[-2.6 \frac{R_c}{H_{mo}}\right] \quad \text{per } \xi_o > 2 \quad (4.38)$$

Queste equazioni sono valide solo nel caso di strutture emergenti, per le quali si ha $R_c \geq S$. Nei casi sperimentali in cui la struttura risultava sommersa, ($R_c < S$), il valore di R_c è stato semplicemente sostituito con $R_c = S$.

5 CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI CON IL MODELLO NUMERICO E IL RISULTATO SPERIMENTALE

5.1 Sensitività del modello numerico

La geometria simulata della spiaggia e della diga costiera costruita in laboratorio è stata modellata utilizzando 1279 nodi equispaziati. Il primo nodo in corrispondenza della sonda G1 e localizzato a $x = 0$, l'ultimo nodo in corrispondenza del limite verso terra della cresta della diga e localizzato a distanza $x = 12.8 \text{ m}$ dall'origine.

Il file di input del modello numerico è stato scritto in modo da effettuare il calcolo delle grandezze relative a tutti i 107 esperimenti in un'unica volta. Il tempo impiegato dal modello per ottenere il risultato è stato di circa 10 s.

Per prima cosa il modello numerico è stato utilizzato per verificare quali valori del parametro di frangimento, γ , dell'elevazione del misuratore di risalita, δ_r , e del fattore di attrito al fondo, f_b , dati come input al modello, dessero il miglior accordo tra la portata di tracimazione misurata sperimentalmente e la portata calcolata con il modello. I dati ottenuti dai 107 esperimenti sono stati inseriti nel modello numerico per confrontarne il risultato.

Per la taratura del parametro di frangimento γ sono stati scelti i valori $\gamma = 0.7$ oppure $\gamma = 0.8$ in base a studi precedenti condotti da Kobayashi et al. (2007 b) e Kobayashi e de los Santos (2007). Incrementando γ , il processo di frangimento è ritardato, con conseguente aumento dell'altezza d'onda rappresentata da σ_η . Durante gli esperimenti è stata osservata la presenza di correnti dirette verso riva dovute alla tracimazione e inondazione. Tali correnti

causavano un ritardo del frangimento delle onde. Questo spiega perché il valore di $\gamma=0.8$ fornisce il miglior accordo tra il risultato numerico e la situazione sperimentale simulata .

Il fattore di attrito al fondo f_b è stato posto $f_b = 0$ sulla spiaggia e $f_b = 0$ oppure $f_b = 0.01$ sulla struttura costiera; il valore di f_b può aumentare in acque basse. I valori calcolati della portata di tracimazione q variano di circa il 10% utilizzando $f_b = 0.0$ e 0.01 . Questa differenza è comunque compresa nel grado di accuratezza del modello numerico che considera un fattore di accuratezza pari a 2, come sarà mostrato successivamente.

Il misuratore di risalita dell'onda è stato posizionato ad una distanza verticale dal pendio 1/5 pari a $\delta_r = 2 \text{ cm}$. E' stato osservato durante gli esperimenti, che molte onde frangevano sul pendio 1/5 sul quale era montato il misuratore di risalita dell'onda che consisteva in un filo flessibile, perciò è stato difficile tenere $\delta_r = 2 \text{ cm}$ costante nel corso degli esperimenti. L'elevazione del misuratore di risalita dell'onda potrebbe infatti essersi ridotta durante gli esperimenti. Per fare una verifica il calcolo con il modello numerico è stato condotto anche utilizzando $\delta_r = 1 \text{ cm}$. Il risultato ottenuto per $\delta_r = 1 \text{ cm}$ ha messo in evidenza come la portata q aumentasse di circa il doppio solamente per gli esperimenti in cui la portata q calcolata risultava minore di $5 \text{ cm}^2 / \text{s}$.

I risultati ottenuti con il modello numerico, discussi precedentemente, per i differenti valori di γ , δ_r e f_b sono presentati in Appendice A

Dall'analisi di sensitività e da un raffronto dei diversi casi esaminati i risultati presentati nel presente Capitolo 5 sono basati sui valori $\delta_r = 2 \text{ cm}$, $\gamma = 0.8$ e $f_b = 0$.

Il confronto tra i risultati del modello numerico e i risultati ottenuti sperimentalmente per i 107 test sono sintetizzati nella seguente Tabella 5.1 e spiegati in dettaglio di seguito.

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
1	0.00	40.83	0.0025	0.10	0.01	0.77	2.27	-16.57	0.12	0.26	1.09	3.14
2	0.00	61.60	0.0486	2.99	0.74	1.65	3.02	-16.76	0.46	2.20	1.29	5.27
3	0.00	69.18	0.0872	6.03	2.48	2.00	3.29	-16.85	0.46	1.96	1.37	5.57
4	0.00	37.21	0.0012	0.05	0.01	0.57	2.18	-16.54	0.08	0.11	0.90	2.13
5	0.00	58.59	0.0420	2.46	0.89	1.42	3.00	-16.65	0.24	1.27	1.47	3.58
6	0.00	65.88	0.0748	4.93	2.58	1.75	3.25	-16.68	0.22	2.13	1.63	4.34
7	0.00	28.94	0.0000	0.00	0.00	0.29	1.79	-16.53	0.00	0.00	0.17	1.62
8	0.00	48.50	0.0165	0.80	0.48	0.90	2.73	-16.61	0.13	0.89	0.91	3.15
9	0.00	58.62	0.0486	2.85	2.14	1.32	3.09	-16.65	0.19	1.40	1.11	3.57
10	0.00	42.55	0.0253	1.08	0.09	2.79	2.53	-14.57	0.12	0.64	2.91	2.59
11	0.00	62.75	0.1521	9.55	2.54	3.59	3.33	-14.89	0.32	3.29	3.70	4.12
12	0.00	66.81	0.1858	12.42	4.44	3.77	3.48	-15.13	0.22	6.84	3.67	5.19
13	0.00	37.92	0.0129	0.49	0.07	2.60	2.36	-14.56	0.07	0.27	2.53	2.18
14	0.00	54.76	0.1047	5.73	1.70	3.13	3.15	-14.84	0.34	3.95	3.14	3.94
15	0.00	62.34	0.1541	9.61	3.10	3.53	3.36	-14.91	0.39	5.59	3.38	4.63
16	0.00	27.01	0.0004	0.01	0.01	2.28	1.79	-14.53	0.02	0.03	2.22	1.60
17	0.00	45.93	0.0542	2.49	1.27	2.73	2.86	-14.76	0.29	2.30	2.66	3.21
18	0.00	57.06	0.1278	7.29	4.43	3.17	3.29	-14.83	0.37	4.71	3.04	4.14

Tabella 5.1(a): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 1-18

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
19	0.00	41.45	0.0619	2.57	0.16	4.70	2.51	-12.63	NM	2.06	5.18	2.67
20	0.00	59.84	0.2585	15.47	4.34	5.28	3.42	-13.19	NM	10.40	5.61	4.34
21	0.00	67.06	0.3196	21.43	9.74	5.62	3.61	-13.34	NM	13.19	5.84	5.34
22	0.00	33.58	0.0191	0.64	0.07	4.44	2.15	-12.58	NM	0.65	5.02	2.05
23	0.00	54.47	0.2274	12.38	4.70	4.89	3.38	-13.29	NM	8.57	5.10	3.97
24	0.00	64.47	0.3118	20.10	14.41	5.39	3.65	-13.17	NM	11.08	5.44	4.85
25	0.00	24.90	0.0011	0.03	0.03	4.21	1.66	-12.53	NM	0.02	4.33	1.53
26	0.00	48.14	0.1489	7.17	3.20	4.72	3.03	-12.90	0.85	5.77	4.70	3.24
27	0.00	53.03	0.2177	11.54	11.35	4.80	3.36	-13.14	0.81	6.98	4.69	3.88
28	0.00	43.32	0.1825	7.90	0.79	6.70	2.67	-10.74	0.26	3.16	6.82	2.42
29	0.00	62.63	0.4277	26.79	12.39	7.34	3.53	-11.24	0.74	18.75	7.90	4.34
30	0.00	71.14	0.4820	34.29	23.17	7.74	3.64	-11.29	0.66	25.40	8.37	5.34
31	0.00	36.60	0.0926	3.39	0.39	6.50	2.30	-10.61	0.17	1.23	6.54	2.06
32	0.00	56.85	0.3793	21.56	8.96	7.08	3.39	-11.10	0.69	15.17	7.58	4.03
33	0.00	64.76	0.4529	29.33	26.10	7.34	3.65	-11.24	0.67	17.06	7.72	4.89
34	0.00	24.36	0.0066	0.16	0.07	6.17	1.63	-10.56	0.07	0.29	6.44	1.63
35	0.00	41.83	0.2155	9.01	5.29	6.32	2.91	-11.20	0.50	7.13	6.46	3.35
36	0.00	52.04	0.3403	17.71	13.93	6.79	3.32	-11.14	0.51	11.17	6.97	4.08

Tabella 5.1 (b): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 19 -36

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
37	0.00	38.59	0.2873	11.09	1.78	8.45	2.56	-8.92	0.45	5.85	8.94	2.56
38	0.00	62.83	0.5789	36.37	22.49	9.36	3.43	-9.13	0.82	29.78	10.28	4.38
39	0.00	70.78	0.6318	44.72	52.31	9.55	3.64	-9.31	0.85	36.76	10.22	5.19
40	0.00	31.50	0.1486	4.68	0.85	8.23	2.12	-8.78	0.27	2.62	8.54	2.05
41	0.00	51.82	0.4977	25.79	14.09	8.85	3.25	-9.15	0.65	21.05	9.60	3.99
42	0.00	62.19	0.5806	36.11	30.81	9.27	3.48	-9.14	0.68	28.42	9.56	4.47
43	0.00	21.86	0.0174	0.38	0.18	8.10	1.48	-8.57	0.09	0.51	8.41	1.42
44	0.00	41.02	0.3608	14.80	9.56	8.38	2.86	-9.14	0.54	9.74	8.40	3.12
45	0.00	50.32	0.4804	24.18	27.55	8.81	3.19	-9.04	0.63	14.12	8.82	3.69
46	0.00	34.67	0.4446	15.41	4.40	10.36	2.42	-6.94	0.54	9.40	10.84	2.35
47	0.00	61.62	0.7310	45.04	48.50	11.26	3.33	-7.08	0.78	36.60	11.51	3.80
48	0.00	63.81	0.7417	47.33	45.70	11.34	3.36	-7.22	0.93	48.71	11.48	4.61
49	0.00	26.37	0.2443	6.44	1.85	9.97	1.95	-6.96	0.30	3.72	10.22	1.86
50	0.00	50.79	0.6649	33.77	31.18	10.87	3.13	-7.08	0.79	26.32	11.13	3.45
51	0.00	61.02	0.7322	44.68	72.55	11.17	3.40	-7.15	0.82	34.63	11.17	4.31
52	0.00	20.74	0.0739	1.53	0.52	10.04	1.42	-6.61	0.16	1.09	10.22	1.41
53	0.00	37.94	0.5148	19.53	17.57	10.42	2.65	-6.98	0.56	12.39	10.52	2.85
54	0.00	45.05	0.6118	27.56	40.62	10.67	2.95	-7.01	0.60	17.46	10.61	3.46
55	0.00	18.31	0.2479	4.54	2.49	11.86	1.40	-4.79	0.36	3.32	12.09	1.46
56	0.00	33.24	0.6867	22.83	33.71	12.40	2.38	-4.84	0.69	16.42	12.48	2.60
57	0.00	38.58	0.7549	29.12	53.59	12.47	2.71	-5.04	0.74	23.53	12.47	3.17
58	0.00	24.64	0.5009	12.34	6.63	12.07	1.90	-4.86	0.58	7.81	12.38	1.91
59	0.00	45.67	0.8094	36.96	60.87	12.65	2.99	-5.17	0.80	34.80	12.66	3.21
60	0.00	54.42	0.8519	46.36	84.72	12.97	3.14	-5.09	0.81	41.10	12.74	3.67
61	0.00	30.59	0.6471	19.80	11.35	12.27	2.28	-4.96	0.64	13.33	12.65	2.34

Tabella 5.1 (c): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 37 – 61

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
62	0.00	12.64	0.5052	6.39	13.90	13.50	1.30	-3.11	0.54	6.10	13.52	1.40
63	0.00	25.47	0.8467	21.57	50.60	14.14	2.07	-2.90	0.81	24.02	14.29	2.46
64	0.00	29.55	0.8833	26.10	72.97	14.24	2.30	-2.96	0.89	28.91	14.16	2.84
65	0.00	20.42	0.7700	15.72	26.67	13.97	1.77	-2.89	0.72	12.86	14.15	1.88
66	0.00	37.38	0.9270	34.65	88.83	14.54	2.55	-2.89	0.90	40.03	14.48	2.89
67	0.00	23.09	0.8178	18.88	22.66	14.14	1.88	-2.81	0.79	21.56	14.49	2.10
68	0.00	8.38	0.7860	6.58	23.59	14.92	1.16	-1.66	0.77	10.00	14.99	1.26
69	0.05	19.87	0.9550	19.37	88.88	15.31	2.02	-1.69	0.88	33.46	15.06	2.04
70	0.00	14.34	0.9115	13.07	50.76	15.13	1.62	-1.64	0.81	18.50	15.12	1.53
71	0.42	30.32	0.9901	38.62	131.45	15.87	2.35	-1.44	0.96	57.44	15.53	2.42
72	0.18	22.86	0.9748	24.66	77.57	15.61	2.04	-1.44	0.88	33.51	15.60	1.79
73	0.36	6.59	0.9942	13.22	33.33	16.31	1.02	-0.25	0.98	20.35	16.11	1.08
74	0.63	15.24	0.9983	30.81	94.73	16.34	1.63	-0.48	1.00	43.87	15.99	1.89
75	0.71	21.13	1.0000	39.81	122.70	16.59	1.72	-0.36	1.00	51.40	16.07	2.15
76	0.56	12.45	0.9993	25.62	63.00	16.43	1.32	-0.22	0.98	33.82	16.31	1.41
77	0.68	17.20	0.9997	34.66	91.32	16.45	1.71	-0.48	0.93	42.56	16.09	1.60
78	0.88	26.92	1.0000	52.61	129.37	16.77	1.91	-0.34	0.97	71.64	16.03	2.04
79	0.56	13.43	0.9841	26.25	152.48	15.80	2.05	-1.21	1.00	33.13	15.57	2.05
80	0.56	13.15	0.9959	26.21	105.56	16.24	1.62	-0.54	1.00	27.15	16.04	1.46
81	0.63	16.16	0.9828	31.47	185.16	15.59	2.53	-1.79	1.00	26.27	15.61	2.80
82	0.57	10.19	1.0000	23.49	64.82	16.75	1.06	0.24	1.00	24.20	16.69	1.02
83	0.61	15.14	0.9970	30.19	129.44	16.26	1.76	-0.60	1.00	40.32	16.07	1.78
84	0.62	13.45	1.0000	28.77	90.43	16.61	1.37	-0.03	1.00	33.08	16.55	1.32
85	0.70	19.07	0.9894	37.28	206.96	15.78	2.58	-1.68	1.00	48.79	15.44	2.60
86	0.69	10.19	1.0000	28.05	58.57	17.08	0.92	0.61	1.00	29.61	17.20	0.86

Tabella 5.1 (d): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 62-86

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
87	0.99	10.47	1.0000	41.28	55.25	17.56	0.76	1.22	1.00	42.66	17.68	0.75
88	0.93	16.29	1.0000	44.29	90.88	17.29	1.12	0.80	1.00	46.46	17.34	1.08
89	0.81	22.67	0.9994	45.49	181.46	16.39	2.13	-0.76	1.00	58.89	16.26	2.21
90	0.88	19.03	1.0000	44.69	121.63	17.04	1.39	0.41	1.00	52.10	17.01	1.52
91	1.06	11.09	1.0000	45.47	39.83	17.64	0.75	1.33	1.00	44.30	17.79	0.75
92	1.25	21.42	1.0000	65.01	117.53	17.66	1.12	1.26	1.00	66.37	18.03	1.26
93	1.34	17.23	1.0000	66.09	80.01	17.84	0.93	1.55	1.00	62.74	18.11	0.90
94	1.01	25.37	1.0000	57.37	162.53	17.05	1.66	0.24	1.00	69.06	17.22	1.88
95	1.53	17.20	1.0000	76.60	83.71	18.10	0.85	1.91	1.00	82.36	18.50	0.90
96	1.50	20.49	1.0000	78.12	109.34	17.99	1.02	1.72	1.00	73.54	18.10	1.05
97	1.57	16.49	1.0000	78.19	82.97	18.15	0.82	2.00	1.00	73.17	18.72	0.81
98	1.28	30.71	1.0000	75.90	190.04	17.51	1.58	0.80	1.00	84.18	17.71	1.83
99	1.84	9.89	1.0000	87.78	54.13	18.46	0.56	2.56	1.00	94.70	19.11	0.50
100	1.91	22.87	1.0000	105.34	121.62	18.44	1.04	2.33	1.00	105.63	18.86	1.11
101	1.87	9.02	1.0000	89.15	32.88	18.49	0.53	2.62	1.00	87.07	19.21	0.51
102	1.89	25.46	1.0000	107.00	115.13	18.41	1.12	2.22	1.00	104.11	18.97	1.09
103	2.04	8.85	1.0000	99.95	32.87	18.64	0.54	2.86	1.00	98.76	19.53	0.51
104	2.00	19.31	1.0000	108.08	71.00	18.55	0.94	2.55	1.00	100.89	19.25	0.97
105	2.07	15.87	1.0000	109.31	77.07	18.63	0.84	2.72	1.00	102.41	19.39	0.79
106	1.76	31.55	1.0000	104.76	161.24	18.21	1.32	1.87	1.00	107.48	18.61	1.62
107	2.03	8.54	1.0000	99.19	31.77	18.63	0.53	2.85	1.00	99.18	19.53	0.51

Tabella 5.1 (e): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 87-107

5.2 Confronto tra i parametri statistici di risalita e tracimazione dell'onda

La Figura 5.1 mette a confronto i valori del livello d'acqua medio ($\overline{\eta_r} + S$) calcolati con il modello numerico e registrati durante gli esperimenti dal misuratore di risalita dell'onda, tutti i valori sono riferiti a $z = 0$. L'elevazione della cresta della diga misurata rispetto al livello medio (MWL), ($z_c - \overline{\eta_r} - S$), (Figura 4.2) è stata utilizzata nell'equazione (4.34) per il calcolo della probabilità di tracimazione. ed $x_c = 16.5 \text{ cm}$ per tutti gli esperimenti. L'accordo tra i dati in Figura 5.1 è eccellente, questo è dovuto principalmente al fatto che i valori di oscillazione media $\overline{\eta_r}$ derivanti dalla presenza delle onde che causano inondazione della struttura sono piccoli rispetto all'incremento di livello S che negli esperimenti condotti tiene conto della presenza di mareggiate e della marea. Il modello numerico sottostima ($\overline{\eta_r} + S$) nei casi in cui ($\overline{\eta_r} + S$) supera il valore di $z_c = 16.5 \text{ cm}$.

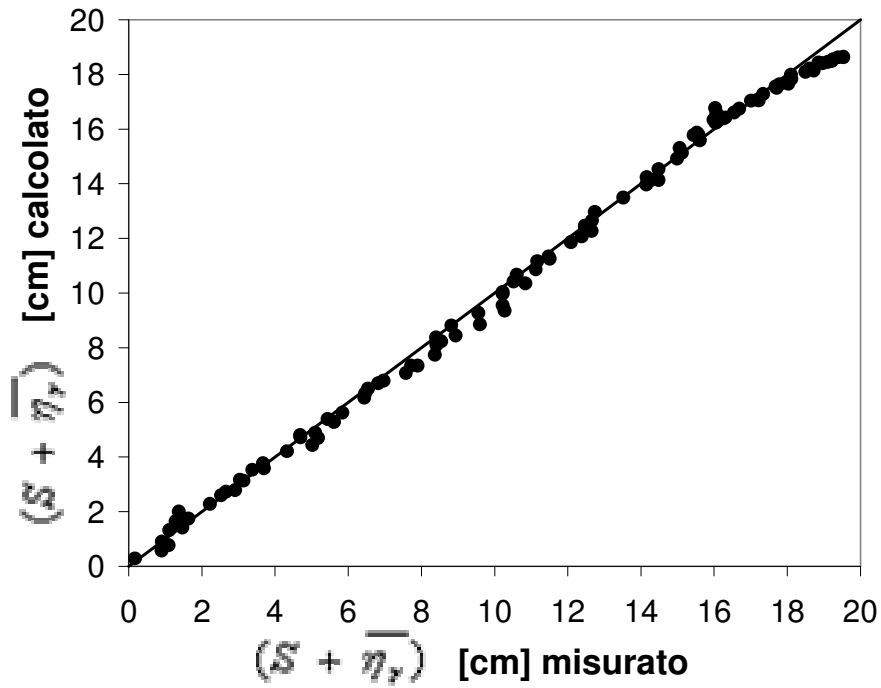


Figura 5.1: Confronto tra i valori del livello $(S + \overline{\eta_r})$ misurati sperimentalmente e calcolati con il modello numerico

La Figura 5.2 mostra il confronto tra i valori calcolati e misurati della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera lungo il misuratore di risalita dell'onda, posto sulla scarpata con pendenza 1/5, indicati con σ_r e σ_m rispettivamente. Nell'equazione (4.34) i valori di σ_r sono stati utilizzati per normalizzare la quantità $(z_c - \overline{\eta_r} - S)$. Considerando un intervallo di errore del 30 %, la previsione del modello numerico è abbastanza buona fino a valori di $\sigma_m = 2.5 \text{ cm}$ circa.

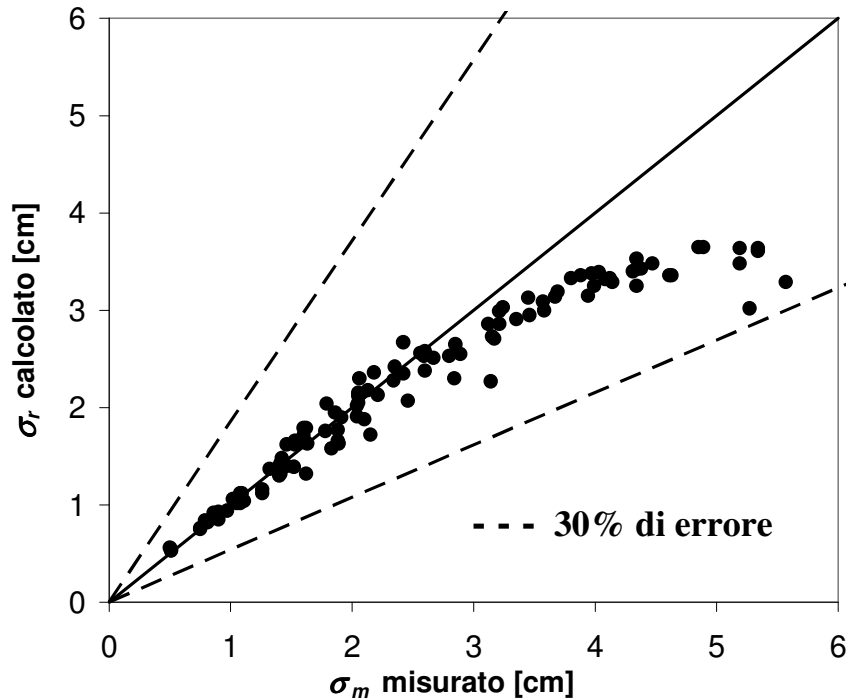


Figura 5.2: Confronto tra i valori della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera misurati sperimentalmente dal misuratore di risalita dell'onda σ_m e calcolati con il modello numerico σ_r .

La Figura 5.3 raffronta i valori di probabilità di tracimazione P_o calcolati con i valori misurati di P_o . Si ricorda che la probabilità di avere eventi di tracimazione, rappresentata dalla percentuale di onde che tracimano sulla diga rispetto al numero totale di onde incidenti misurate in corrispondenza della sonda G1, è stata misurata visivamente. Alcune delle onde incidenti frangevano sulla scarpata con pendenza 1/5 e generavano un sottile strato di risalita d'acqua che poteva non essere considerato come evento di tracimazione. Di conseguenza per ogni evento il conteggio visuale è stato in qualche modo soggettivo. Questo spiega il non perfetto accordo tra i valori misurati e calcolati di P_o riportati in Figura 5.3.

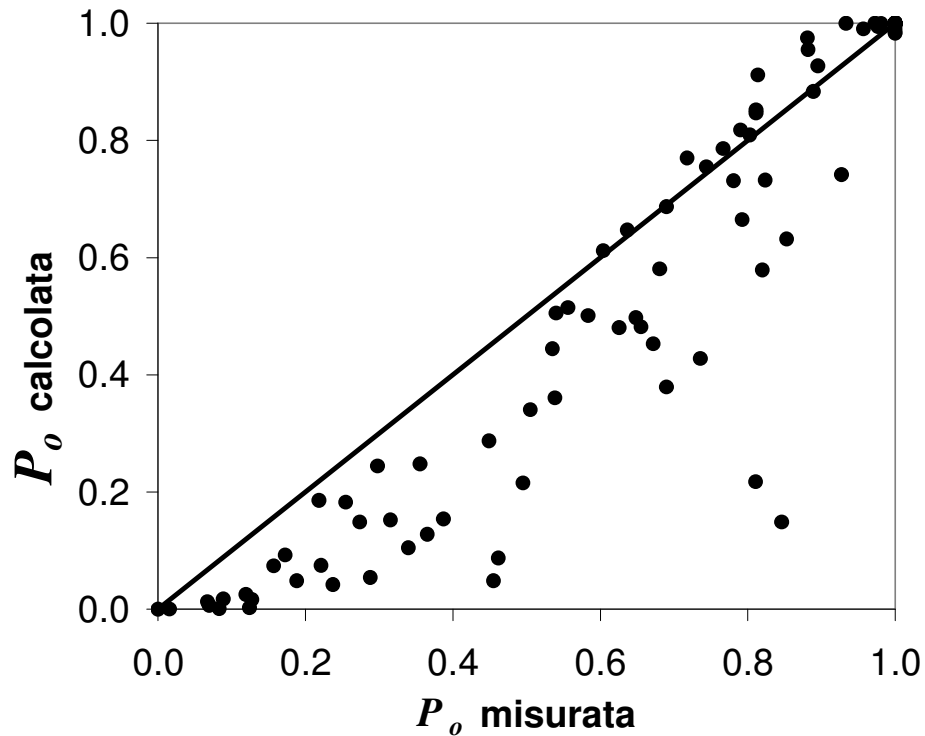


Figura 5.3: Confronto tra i valori della probabilità di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati con il modello numerico

I valori calcolati e misurati della portata di tracimazione e inondazione sono messi a confronto in Figura 5.4. L'accordo tra i valori calcolati q_o e misurati q_m è migliore per portate maggiori dove è dominante la presenza del fenomeno di inondazione. La formula proposta nell'equazione (4.30) per il calcolo della portata di tracimazione su strutture impermeabili, $q_o = P_o q_{swl}$, che di fatto è una modifica della formula sviluppata da Kobayashi and de los Santos (2007) per il caso di strutture permeabili, non dà una previsione molto accurata nel caso di piccole portate di tracimazione. La stessa fornisce invece un buon accordo nel caso in cui si consideri anche il contributo dovuto all'inondazione della diga costiera ottenuto attraverso la formula per il calcolo dell'inondazione di una diga a larga soglia in condizione di moto permanente.

Tuttavia, nel confrontare i risultati si è riscontrato un fattore di accordo tra i valori pari a 2.

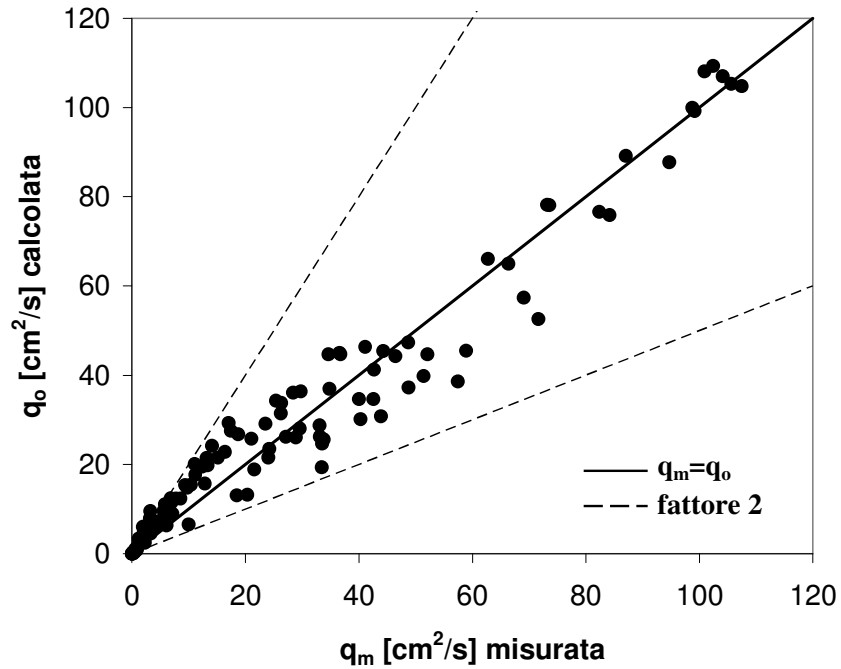


Figura 5.4: Confronto tra i valori di portata di tracimazione misurati sperimentalmente, q_m e calcolati con il modello numerico, q_o

La Figura 5.5 riporta il confronto tra i risultati ottenuti per la portata di tracimazione utilizzando le formule empiriche date dalle equazioni (4.37) e (4.38) e inserita nel modello, per il calcolo della portata di tracimazione q_e , con i valori ottenuti dalle misure sperimentali di q_m .

Il confronto tra i risultati ottenuti ha messo in evidenza come per bassi valori di portata ($q_m < 20 \text{ cm}^2/\text{s}$) l'adattamento tra risultato empirico e misurato in Figura 5.5 è sufficientemente buono. Per valori di portata maggiori, la formula empirica tende a sovrastimare la portata di tracimazione. L'accordo tra i dati è

invece molto scarso per gli esperimenti di inondazione dal momento che la formula empirica inserita nel modello numerico non è valida nel caso di strutture sommerse.

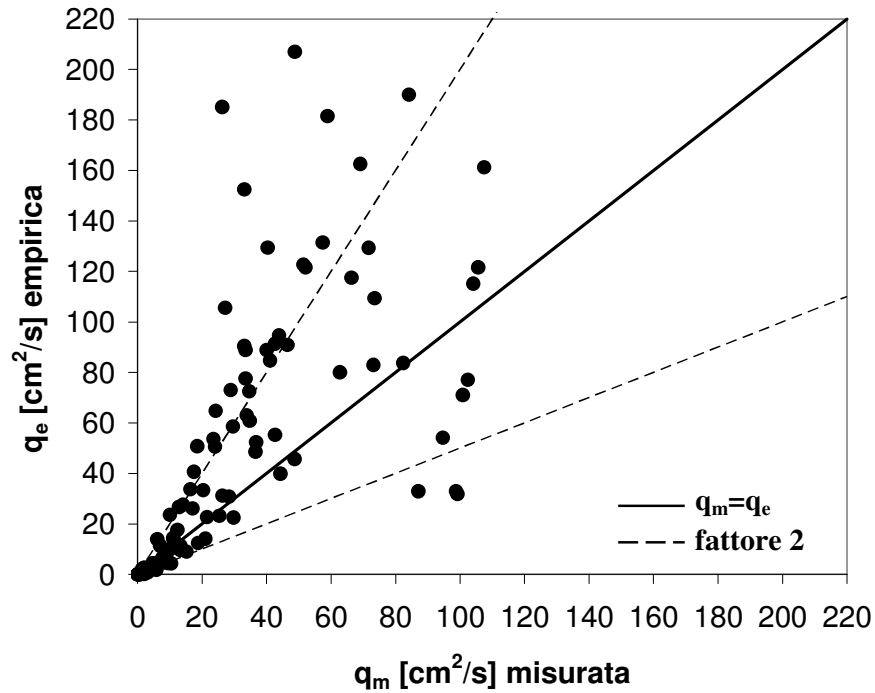


Figura 5.5: Confronto tra i valori di portata di trascinamento misurati sperimentalmente q_m e calcolati con il modello numerico utilizzando una formula empirica

5.3 Confronto tra le grandezze nella propagazione dell'onda da largo a riva

I valori, calcolati con il modello numerico, della variazione *cross-shore* di $\bar{\eta}$, σ_η , \bar{U} e σ_U insieme ai valori di η e σ_η misurati dalle sonde G1-G6 durante

gli esperimenti sono stati rappresentati graficamente per tutti i 107 esperimenti condotti e riportati in Appendice B.

A titolo di esempio si riportano nelle Figure 5.6–5.9 i grafici relativi agli esperimenti di tracimazione 2 e 41 e i grafici relativi agli esperimenti di inondazione 94 e 103.

L'elevazione del fondo z_b e il livello d'acqua medio $(\bar{\eta} + S)$, misurato rispetto al riferimento $z=0$ sono rappresentati nello stesso grafico. L'accordo tra i valori calcolati dal modello e i valori misurati di $(\bar{\eta} + S)$ e σ_η per le sonde G1-G3 è eccellente. Questo è dovuto al fatto che i valori misurati in corrispondenza di $x=0$ sono stati dati al modello numerico come dati di ingresso.

I limiti, nelle Figure 5.6 e 5.7, corrispondono all'origine e al limite verso terra del dominio di calcolo. In corrispondenza del limite verso terra la profondità d'acqua media è $h=0.14 \text{ cm}$, nel caso della Figura 5.6, e $h=0.56 \text{ cm}$, nel caso della Figura 5.7. I valori di portata di tracimazione calcolati con il modello numerico sono $q_o=3 \text{ cm}^2/s$ per l'esperimento 2 e $q_o=26 \text{ cm}^2/s$ per l'esperimento 41. Il livello medio d'acqua $(\bar{\eta} + S)$ aumenta muovendosi verso terra a causa dell'incremento della risalita dell'onda nella sua propagazione da largo verso riva. La deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera, σ_η , non varia molto in direzione *on-shore* fino al piede della scarpata 1/5.

L'altezza d'onda, rappresentata da σ_η , subisce un decremento apprezzabile in particolar modo sulla scarpata di pendenza 1/5 a causa del frangimento dell'onda sulla stessa. In corrispondenza del piede della diga $H_{mo} = 4\sigma_\eta = 9.8 \text{ cm}$; $H_{mo}/h = 0.79$ nel caso dell'esperimento 2 e $H_{mo} = 11.7 \text{ cm}$ e $H_{mo}/h = 0.6$ nel caso dell'esperimento 41.

La velocità media \bar{U} e la deviazione standard σ_U della velocità di oscillazione dell'onda sono state calcolate utilizzando le equazioni (4.10) e (4.16). La corrente di ritorno verso largo \bar{U} (rappresentata dai valori negativi) è piccola sulla spiaggia e aumenta sul pendio 1/5, fino a diventare *onshore* a causa della presenza del flusso di inondazione.

La deviazione standard σ_U aumenta gradualmente sulla spiaggia e rapidamente sul paramento inclinato della diga, principalmente a causa della diminuzione della profondità d'acqua, muovendosi verso terra. La rapida diminuzione di $\sigma_U = C(\sigma_\eta/h)$ in prossimità della cresta della struttura è dovuta alla diminuzione della velocità di fase C , poiché la quantità σ_η/h si mantiene approssimativamente costante in acque molto basse (Kobayashi et al. 1998).

I limiti delle Figure 5.8 e 5.9 corrispondono all'origine e al limite verso terra del dominio di calcolo. In corrispondenza del limite verso terra, corrispondente alla cresta della diga la profondità d'acqua è $h = 1.3 \text{ cm}$, nel caso della Figura 5.8, e $h = 2.1 \text{ cm}$, nel caso della Figura 5.9. Le portate che inondano la struttura calcolate con il modello numerico sono $q_o = 57 \text{ cm}^2/s$ per l'esperimento 94 e $q_o = 100 \text{ cm}^2/s$ per l'esperimento 103.

L'andamento dei valori calcolati del livello medio mostra la presenza di una modesta risalita dell'onda dovuta al decremento di livello, sulla cresta della diga, associato al flusso di inondazione.

La deviazione standard σ_η aumenta sulla scarpata di pendenza 1/5 a causa dello *shoaling*, dove si ha, al piede della diga, $H_{mo} = 8.2 \text{ cm}$ e $H_{mo}/h = 0.28$ per l'esperimento 94 e $H_{mo} = 3 \text{ cm}$ e $H_{mo}/h = 0.1$ per l'esperimento 103. I valori calcolati di σ_η rimangono pressoché costanti sulla cresta sommersa della struttura poiché alcune onde frangevano forzatamente sul paramento lato mare del pendio come spiegato in Kobayashi et al. (2007).

I valori di velocità media \bar{U} calcolati sono quasi nulli eccetto che nella zona in prossimità della cresta della struttura in cui si hanno profondità d'acqua molto basse. In questa zona, \bar{U} aumenta così come aumenta σ_U e l'interazione onda-corrente inclusa nel modello numerico adottato assume una certa rilevanza.

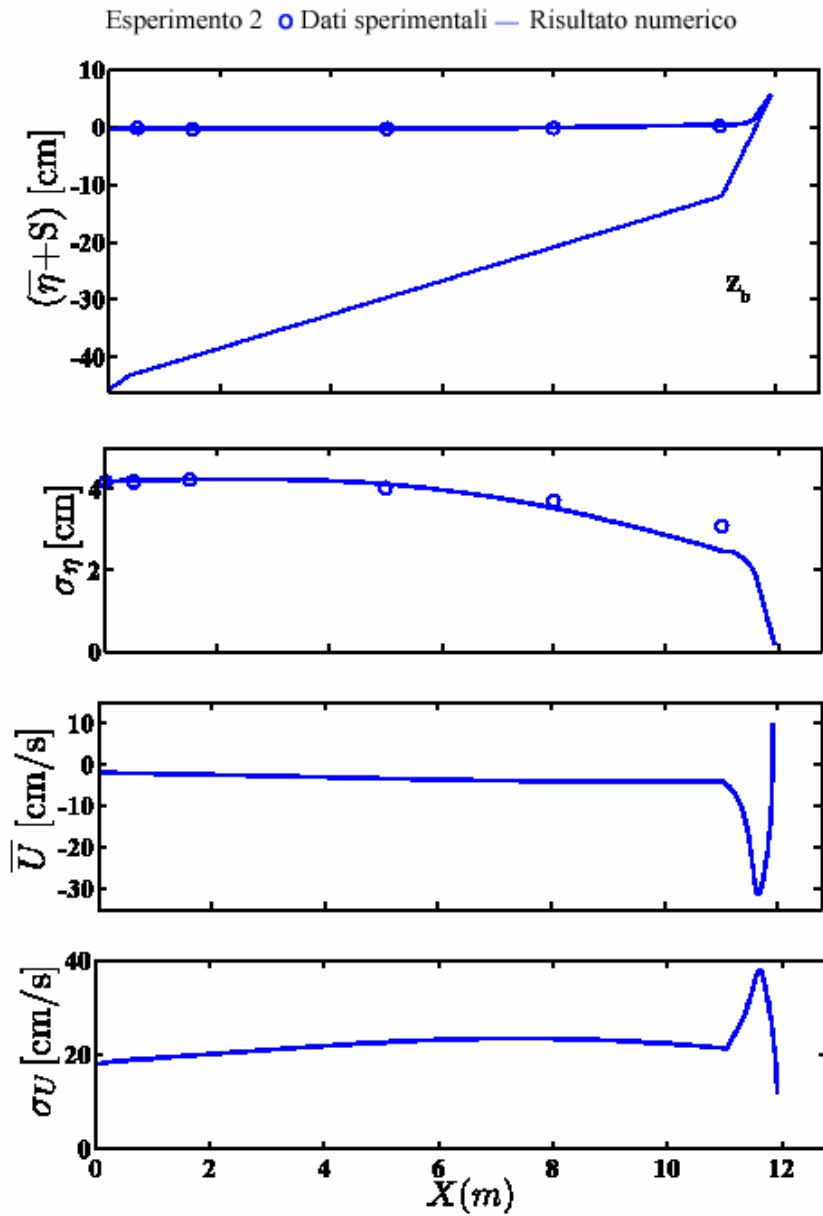


Figura 5.6: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 2

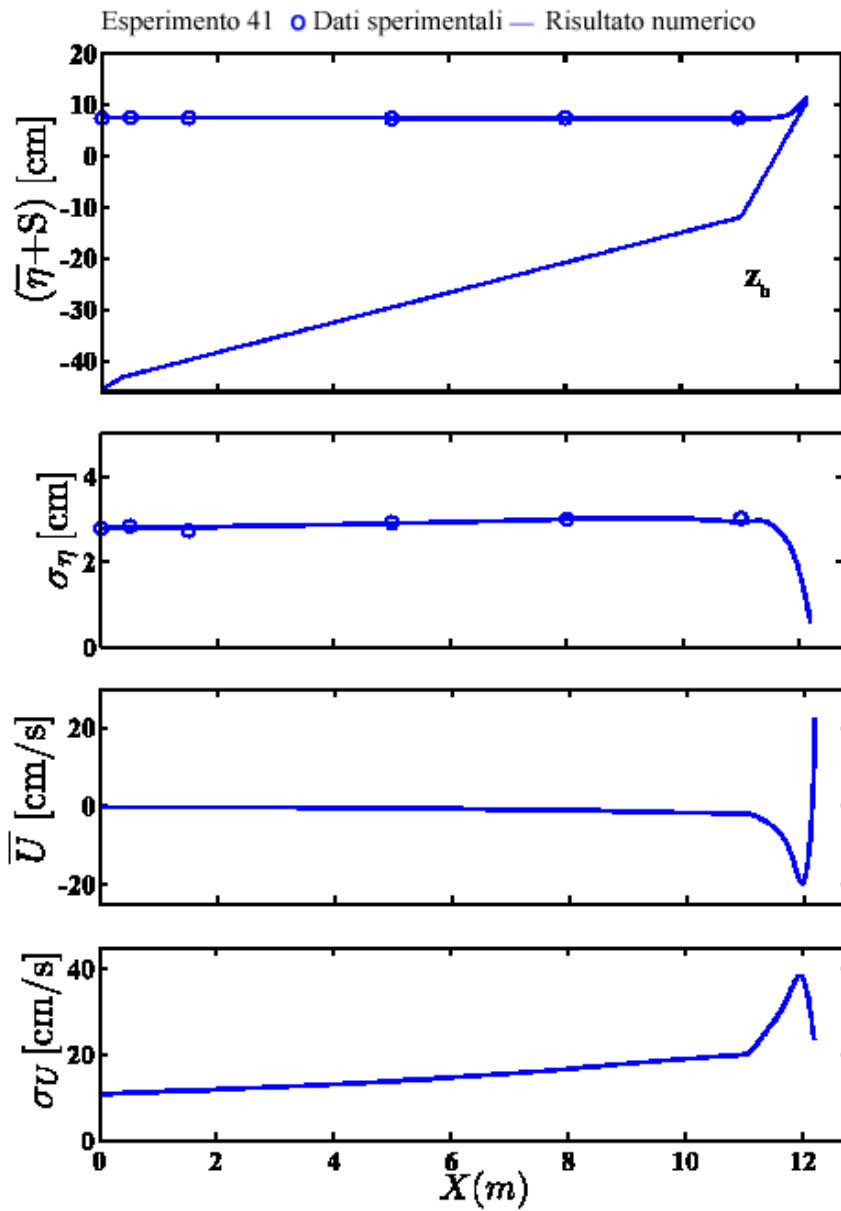


Figura 5.7: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U .
Esperimento 41

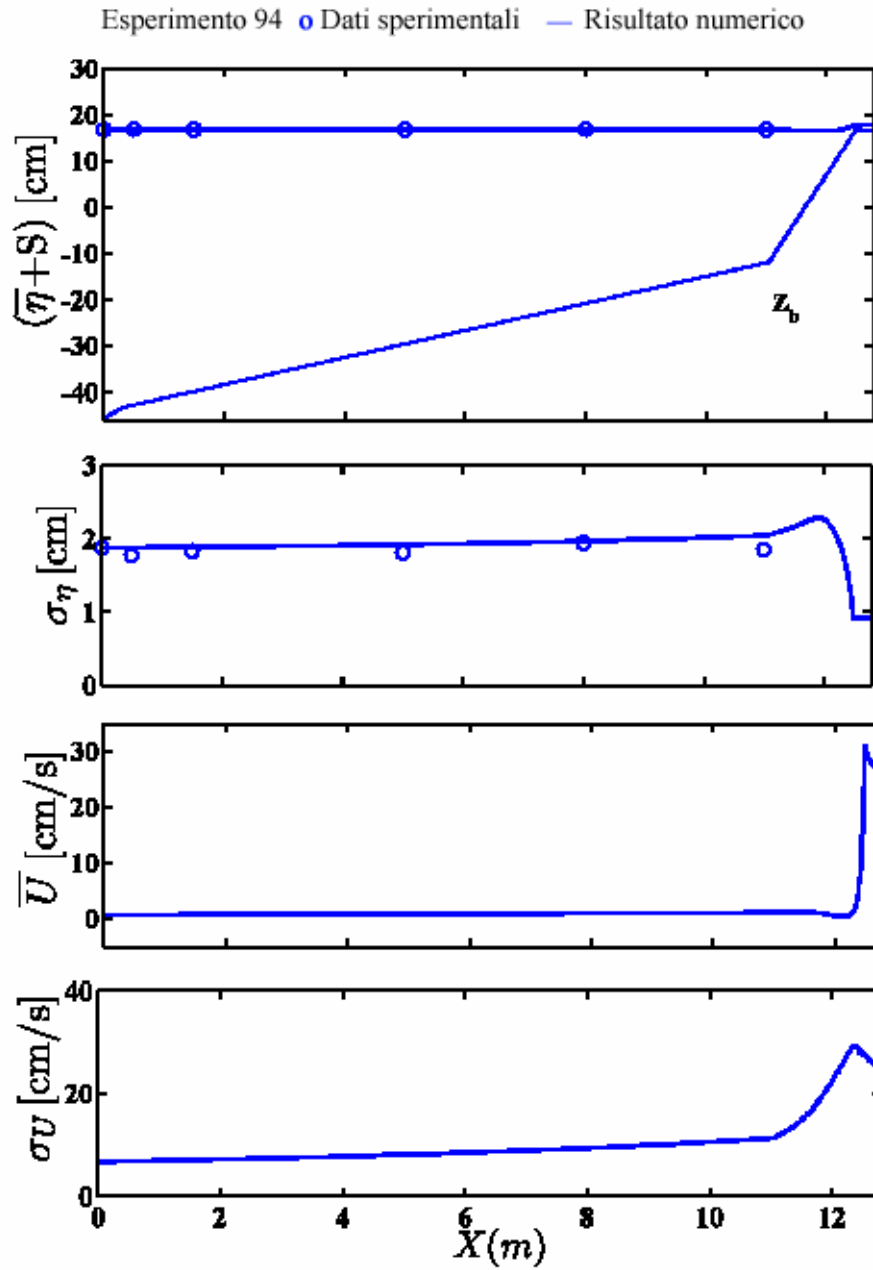


Figura 5.8: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 94

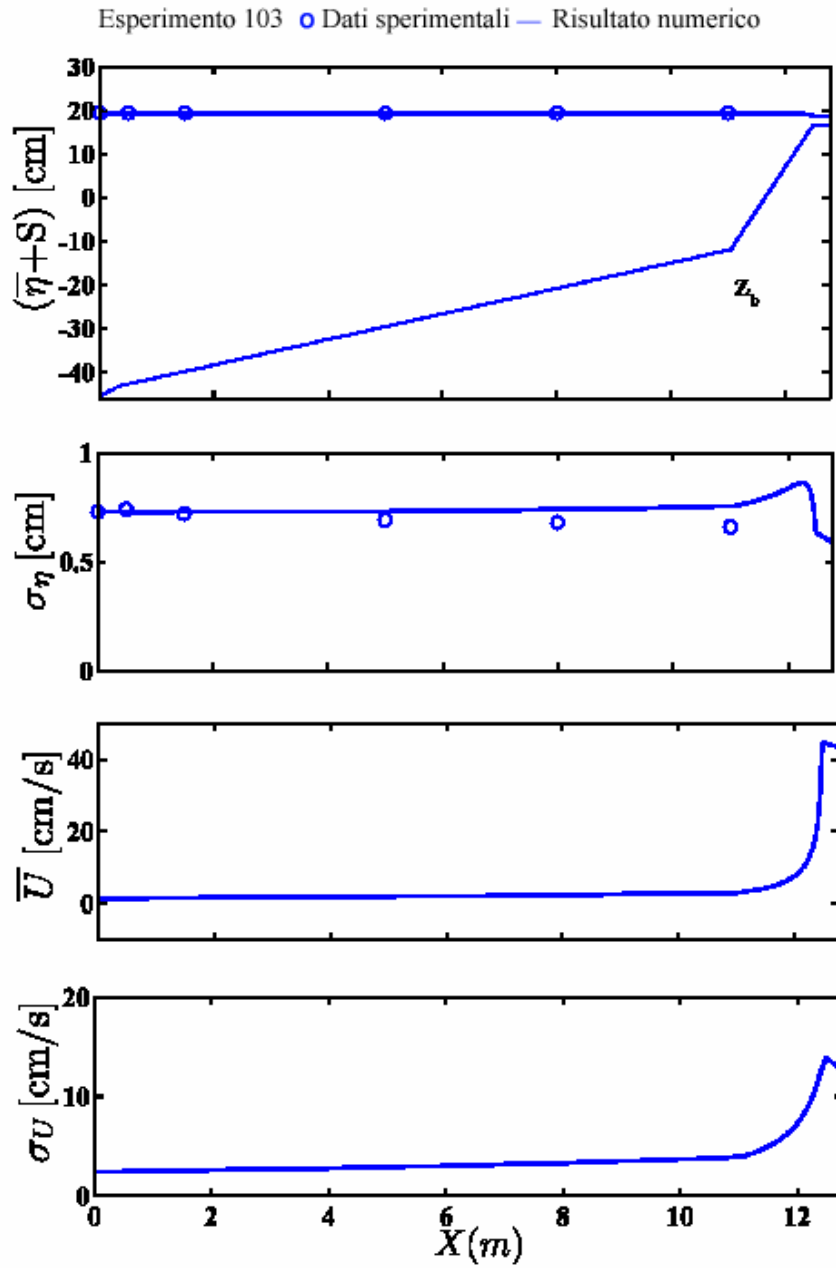


Figura 5.9: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 103

6 APPLICAZIONE E VERIFICA DELLE FORMULE EMPIRICHE ESISTENTI IN LETTERATURA

Il presente capitolo contiene la descrizione di quattro formule empiriche selezionate dalla letteratura esistente e applicabili alla tipologia di struttura simulata in laboratorio e la verifica delle suddette formule utilizzando i dati sperimentali. E' riportato, inoltre, il confronto tra le formule selezionate e i dati misurati in laboratorio.

Le formule empiriche selezionate dalla letteratura e applicabili al caso sperimentale analizzato sono:

- La formula di Owen (1980)
- La formula di van der Meer (2002) riportata sul *Technical Report wave runup, wave overtopping*
- La formula di Schüttrumpf (2001)
- La formula suggerita da EurOtop (2007), per il calcolo della portata di tracimazione e inondazione

Esse sono state applicate considerando in caso di struttura costiera liscia e impermeabile con paramento lato mare inclinato, avente pendenza 1/5.

6.1 La formula di Owen (1980)

Owen (1980) ha proposto una relazione empirica di tipo esponenziale che lega la portata di tracimazione media adimensionale, Q , alla sommergenza adimensionale R . L'autore ha eseguito una serie di esperimenti in laboratorio

considerando differenti tipologie di strutture di difesa soggette a diverse condizioni ondose. Le strutture sperimentali erano costituite da argini a cresta piatta, e in alcuni casi vi era anche la presenza di una berma piatta.

Nel metodo di Owen, l'altezza d'onda significativa è rappresentata da un'altezza d'onda equivalente che si verifica dopo il frangimento. Quest'ultima corrisponde ad un'altezza d'onda tale da dare il corretto valore della portata di tracimazione, come confermato da alcuni esperimenti su modello fisico in cui vi è un numero significativo di onde frangenti (Besley, 1999).

La formula di Owen per diga costiera liscia e impermeabile è:

$$Q = \frac{q}{gH_s T_m} = a \exp\left(-b \frac{R_c}{T_m \sqrt{gH_s}}\right) \quad (6.1)$$

con

$$R = \frac{R_c}{T_m \sqrt{gH_s}} \quad (6.2)$$

L'equazione (6.1) utilizza per il calcolo della portata Q il periodo medio T_m ed ha il limite di considerare solamente spettri d'onda con un solo picco, non molto larghi e non molto stretti. Inoltre l'altezza d'onda significativa H_s corrisponde a $H_{1/3}$, calcolata come il terzo delle altezze d'onda più alte e non all'altezza d'onda significativa spettrale H_{m0} , anche se le due grandezze differiscono solo in condizioni di acque basse.

La Tabella 6.1 riporta i valori dei coefficienti adimensionali a e b utilizzati nella formula di Owen, derivati empiricamente in base alla pendenza del paramento lato mare della struttura costiera.

Owen ricavò la relazione analitica 6.1 misurando sperimentalmente i dati relativi a differenti tipologie di strutture costiere con paramento inclinato.

Rispetto alla formula di van der Meer, di cui si discuterà nel prossimo paragrafo, che è applicabile a differenti tipologie di struttura, il metodo di Owen è riferito in maniera più specifica alla tipologia di struttura considerata.

Pendenza del paramento	<i>a</i>	<i>b</i>
1:1	0.00794	20.1
1:1.5	0.00884	19.9
1:2	0.00939	21.6
1:2.5	0.01030	24.5
1:3	0.01090	28.7
1:3.5	0.01120	34.1
1:4	0.01160	41.0
1:4.5	0.01200	47.7
1:5	0.01310	55.6

Tabella 6.1. Valori dei coefficienti empirici *a* e *b* utilizzati nella formula di Owen

La struttura costiera, considerata negli esperimenti discussi nel Capitolo 3, è costituita da un paramento lato mare di inclinazione 1/5 di conseguenza i valori dei coefficienti *a* e *b* utilizzati per l'applicazione della formula di Owen sono $a = 0.01310$; $b = 55.6$.

6.2 La formula di van der Meer (2002)

La formula di Van der Meer (2002) selezionata è riportata sul *Technical Report Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes* (2002). Essa è basata su precedenti studi (van der Meer and Janssen, 1995), e tiene conto del tipo di frangimento dell'onda. In particolare l'autore considera i casi di onde frangenti sul paramento inclinato lato mare della struttura (plunging) e onde non frangenti sul paramento inclinato lato mare della struttura (surging). Le

formule proposte dipendono quindi dal tipo di frangimento dell'onda ξ_{m0} e, per il caso di struttura costiera inclinata e impermeabile sono:

onde frangenti (plunging) $\xi_{m0} \leq 2$:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \theta}} \gamma \xi_{m0} \exp \left[-4.75 \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_{m0} \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v} \right] \quad (6.3)$$

con:

$$R = \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma \xi_{m0}} \quad (6.4)$$

onde non frangenti (surging) $\xi_{m0} > 2$:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.2 \exp \left[-2.6 \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta} \right] \quad (6.5)$$

con:

$$R = \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma} \quad (6.6)$$

Nelle Equazioni (6.3)-(6.6) l'altezza d'onda significativa è calcolata come $H_{m0} = 4\sigma$ e il periodo d'onda T_{m0} , è ottenuto utilizzando la relazione $T_p = 1.1T_{m0}$.

Il parametro di frangimento ξ_{m0} è pari a:

$$\xi_{m0} = \frac{s_o}{\sqrt{\tan \alpha}} = \frac{2\pi H_{m0}}{gT_{m0}} \frac{1}{\sqrt{\tan \alpha}} \quad (6.7)$$

con $\tan \alpha = 0.2$ per il tipo di struttura considerato.

I coefficienti γ_b , γ_f , γ_β e γ_v , che tengono conto dell'influenza della berma, dell'attrito al fondo, dell'angolo di incidenza dell'onda e della profondità al piede della struttura, sono tutti pari a 1 nel caso sperimentale analizzato, come spiegato nel Capitolo 2.

6.3 La formula di Schüttrumpf (2001)

La quasi totalità delle formule esistenti in letteratura per il calcolo della portata di tracimazione di una diga di difesa costiera, non sono applicabili se il livello d'acqua di fronte alla struttura è pari alla altezza della sommità della struttura e quindi se si è caso di sommergenza nulla ($R_c = 0$).

Schüttrumpf et al. (2001) sostengono che i modelli esistenti per il calcolo della portata media di tracimazione di una diga costiera suggeriti da van der Meer and Janssen (1995) e Van Gent (1999) non sono applicabili nel caso in cui la condizione al contorno sia $R_c = 0$.

Schüttrumpf (2001) ha condotto una serie di esperimenti in condizioni di sommergenza positiva, $R_c > 0$, e nulla, $R_c = 0$, ricavando le seguenti formule per calcolare la portata di tracimazione:

Sommergenza positiva

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.0537 \xi_{m0} \exp\left(-5.5 \frac{R_c}{R_{u,2\%}}\right) \quad \xi_{m0} < 2 \quad (6.8)$$

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \left(0.136 - \frac{0.226}{\xi_{m0}^3}\right) \exp\left(-5.5 \frac{R_c}{R_{u,2\%}}\right) \quad \xi_{m0} \geq 2$$

con:

$$R = \frac{R_c}{R_{u,2\%}} \quad (6.9)$$

Come è evidente dalle equazioni (6.8), il coefficiente a è funzione del tipo di frangimento, espresso attraverso il numero di Irribarren ξ_{m0} pari a $\xi_{m0} = \frac{s_o}{\sqrt{\tan \alpha}} = \frac{2\pi H_{m0}}{gT_{m0}} \frac{1}{\sqrt{\tan \alpha}}$, con $\tan \alpha = 0.2$ per la struttura costiera considerata.

Inoltre $R_{u,2\%} = \xi_{m0} \times H_{m0}$ è l'altezza di risalita dell'onda superata dal 2% delle onde incidenti.

La formula di Schüttrumpf utilizza, per il calcolo della portata di tracimazione, l'altezza d'onda significativa $H_{m0} = 4\sigma$ e il periodo d'onda T_{m0} calcolato conoscendo i valori del periodo di picco, T_p , ed utilizzando la relazione $T_p = 1.1T_{m0}$.

Nel caso in la sommergenza sia nulla ($R_c = 0$), e quindi il livello d'acqua di fronte alla struttura sia uguale alla sommità della cresta della struttura le formule di Schüttrumpf si riducono a:

Sommergenza nulla:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.0537\xi_{m0} \quad \xi_{m0} < 2 \quad (6.10)$$

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.136 - \frac{0.226}{\xi_{m0}^3} \quad \xi_{m0} \geq 2$$

I risultati ottenuti da Schüttrumpf (2001) sono stati verificati ed estesi per analizzare i parametri statistici legati al fenomeno di tracimazione attraverso

modelli a piccola scala da (Oumeraci et al., 1999) e modelli a larga scala da (Oumeraci et al., 2001).

6.4 Il fenomeno combinato di tracimazione e inondazione delle dighe costiere, la formula suggerita da EurOtop (2007)

Se il livello marino di fronte alla struttura supera la sommità della cresta della struttura la sommergenza è negativa ($R_c < 0$), e una cospicua quantità d'acqua inonda la struttura dirigendosi oltre la cresta della stessa e allagando le zone a terra da essa protette. In presenza di onde incidenti sulla struttura di difesa la stessa sarà soggetta al fenomeno combinato di tracimazione e inondazione.

La conseguente portata sarà quindi ottenuta dalla somma di due contributi; un contributo dovuto alla portata di tracimazione (q_{tr}) e un contributo dovuto alla portata che inonda la struttura (q_{in}) EurOtop (2007).

$$q = q_{tr} + q_{in} \quad (6.11)$$

Per calcolare il contributo di portata dovuto all'inondazione della struttura in caso di sommergenza negativa ($R_c < 0$) EurOtop (2007) suggerisce la seguente Equazione (6.12) che è la ben nota formula per il calcolo della portata che transita su uno stramazzo a larga soglia:

Sommergenza negativa $R_c < 0$:

$$q_{in} = 0.6\sqrt{g| - R_c^3 |} \quad (6.12)$$

Nei casi in cui si abbia $R_c \leq 0$ la portata derivante dall'effetto combinato tra i fenomeni di tracimazione e inondazione di una struttura di difesa costiera può essere calcolata dunque con le equazioni (EurOtop 2007):

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.6|R|^{1.5} + 0.0537\xi_{m0} \quad \xi_{m0} < 2 \quad (6.13)$$

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.6|R|^{1.5} + 0.136 - 0.226\xi_{m0}^{-3} \quad \xi_{m0} \geq 2$$

con:

$$R = \frac{R_c}{H_{m0}} \quad (6.14)$$

Nel caso particolare in cui sia $R_c = 0$ le equazioni (6.13) si riducono alle equazioni (6.10) suggerite da Schüttrumpf.

6.5 Confronto tra il risultato sperimentale e il risultato empirico

Nei paragrafi che seguono sono descritti i risultati ottenuti dal confronto tra i valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e i valori ottenuti applicando ai dati sperimentali le formule di Owen (1980), di van der Meer (2002) e di Schüttrumpf (2001).

Per effettuare un confronto tra i valori di portata di tracimazione e inondazione sperimentali ed empirici, nel caso di sommergenza negativa, è stata invece utilizzata la formula suggerita da EurOtop (2007).

6.5.1 Confronto del risultato sperimentale con il risultato ottenuto applicando la formula di Owen (1980)

Per verificare l'adattamento della formula di Owen ai dati sperimentali sono stati considerati gli esperimenti di tracimazione 1-72. Per tali esperimenti, infatti, il valore della sommergenza è positivo $R_c > 0$.

La Tabella 6.2 riporta i valori sperimentali della sommergenza, R_c , dell'altezza d'onda significativa H_s , del periodo di picco T_p e medio T_m e le portate di tracimazione misurate sperimentalmente e ottenute applicando la formula di Owen (Equazione 6.1) ai dati sperimentali.

La Figura 6.1 mostra il confronto tra i valori di portata di tracimazione misurati sperimentalmente e i valori di portata calcolati utilizzando l'Equazione 6.1 suggerita da Owen (1982) per i 72 esperimenti in cui si aveva sommergenza positiva ($R_c > 0$). La linea continua indica il perfetto accordo tra i valori.

E' evidente un discreto adattamento della formula di Owen alla maggior parte dei dati sperimentali. Per bassi valori di portata, compresi tra $q=0 \text{ cm}^2/\text{s}$ e $q= 7 \text{ cm}^2/\text{s}$ circa la formula di Owen fornisce una sottostima. Le portate maggiori vengono invece sovrastimate, ma vi è comunque un fattore di accordo pari a 2.

N° Esperimento	R_c (cm)	H_s (cm)	T_p (s)	T_m (s)	$q_{misurata}$ (cm²/s)	q_{owen} (cm²/s)
1	16.53	9.67	1.37	1.3	0.26	0.11
2	16.53	12.33	1.98	1.6	2.20	1.37
3	16.53	14.03	2.31	1.8	1.96	4.18
4	16.53	8.34	1.4	1.2	0.11	0.03
5	16.53	10.44	2.05	1.5	1.27	0.47
6	16.53	10.50	2.35	1.6	2.13	0.75
7	16.53	6.70	1.36	1.2	0.00	0.01
8	16.53	10.09	1.97	1.5	0.89	0.41
9	16.53	8.77	2.34	1.3	1.40	0.07
10	14.53	9.55	1.43	1.3	0.64	0.19
11	14.53	13.19	2.05	1.5	3.29	2.23
12	14.53	13.08	2.22	1.6	6.84	3.12
13	14.53	7.98	1.45	1.2	0.27	0.06
14	14.53	11.66	1.98	1.5	3.95	1.64
15	14.53	10.39	2.12	1.5	5.59	0.89
16	14.53	5.79	1.4	1.2	0.03	0.01
17	14.53	10.72	2.01	1.5	2.30	1.13
18	14.53	10.42	2.32	1.4	4.71	0.62
19	12.53	9.72	1.33	1.3	2.06	0.52
20	12.53	13.19	1.95	1.6	10.40	5.73
21	12.53	12.26	2.22	1.6	13.19	4.47
22	12.53	7.14	1.34	1.2	0.65	0.11
23	12.53	12.60	2.02	1.6	8.57	5.16
24	12.53	12.57	2.45	1.5	11.08	3.70
25	12.53	5.07	1.43	1.2	0.02	0.02
26	12.53	9.33	2.03	1.3	5.77	0.58
27	12.53	9.42	2.5	1.4	6.98	0.96
28	10.53	9.17	1.4	1.2	3.16	0.83
29	10.53	14.32	2.03	1.6	18.75	14.49
30	10.53	16.80	2.28	1.6	25.40	19.98
31	10.53	6.93	1.4	1.2	1.23	0.30
32	10.53	13.51	1.96	1.7	15.17	16.25
33	10.53	12.50	2.42	1.7	17.06	11.59
34	10.53	4.57	1.37	1.2	0.29	0.05
35	10.53	10.19	2.01	1.7	7.13	7.29
36	10.53	11.15	2.28	1.7	11.17	7.95

Tabella 6.2 (a): Clima ondoso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di Owen (1980) per gli esperimenti di tracimazione (Esperimenti 1-36)

N° Esperimento	R_c (cm)	H_s (cm)	T_p (s)	T_m (s)	$q_{misurata}$ (cm ² /s)	q_{owen} (cm ² /s)
37	8.53	8.45	1.37	1.2	5.85	1.70
38	8.53	14.09	1.97	1.6	29.78	22.78
39	8.53	14.34	2.42	1.8	36.76	35.97
40	8.53	6.06	1.4	1.2	2.62	0.53
41	8.53	13.06	1.88	1.6	21.05	20.03
42	8.53	13.20	2.17	1.5	28.42	15.81
43	8.53	4.11	1.38	1.1	0.51	0.08
44	8.53	9.29	1.96	1.6	9.74	8.56
45	8.53	10.70	2.38	1.5	14.12	9.42
46	6.53	7.67	1.36	1.2	9.40	3.61
47	6.53	14.06	2.05	1.7	36.60	49.84
48	6.53	14.03	1.96	1.7	48.71	45.60
49	6.53	5.36	1.36	1.2	3.72	1.27
50	6.53	11.27	1.94	1.7	26.32	32.30
51	6.53	12.11	2.4	1.4	34.63	20.17
52	6.53	3.76	1.32	1.1	1.09	0.23
53	6.53	8.74	1.97	1.6	12.39	15.49
54	6.53	9.55	2.34	1.5	17.46	15.11
55	4.53	3.64	1.36	1.2	3.32	1.68
56	4.53	7.02	2.05	1.4	16.42	14.46
57	4.53	8.27	2.18	1.6	23.53	29.62
58	4.53	6.00	1.39	1.1	7.81	4.29
59	4.53	10.71	2.02	1.4	34.79	33.34
60	4.53	13.04	2.14	1.7	41.10	76.87
61	4.53	7.13	1.35	1.1	13.33	6.52
62	2.53	3.27	1.64	1.2	6.10	6.35
63	2.53	6.40	1.94	1.4	24.02	32.41
64	2.53	7.34	2.13	1.4	28.91	40.38
65	2.53	4.95	1.63	1.1	12.86	11.15
66	2.53	10.17	2.05	1.4	40.03	66.87
67	2.53	6.29	1.36	1.1	21.56	17.45
68	1.03	3.16	1.34	1.1	10.00	17.54
69	1.03	5.48	1.96	1.5	33.46	62.76
70	1.03	4.38	1.62	1.1	18.50	27.95
71	1.03	8.35	1.94	1.4	57.44	95.54
72	1.03	6.26	1.63	1.3	33.51	56.74

Tabella 6.2 (b): Clima ondosso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di Owen (1980) per gli esperimenti di tracimazione (Esperimenti 37-72)

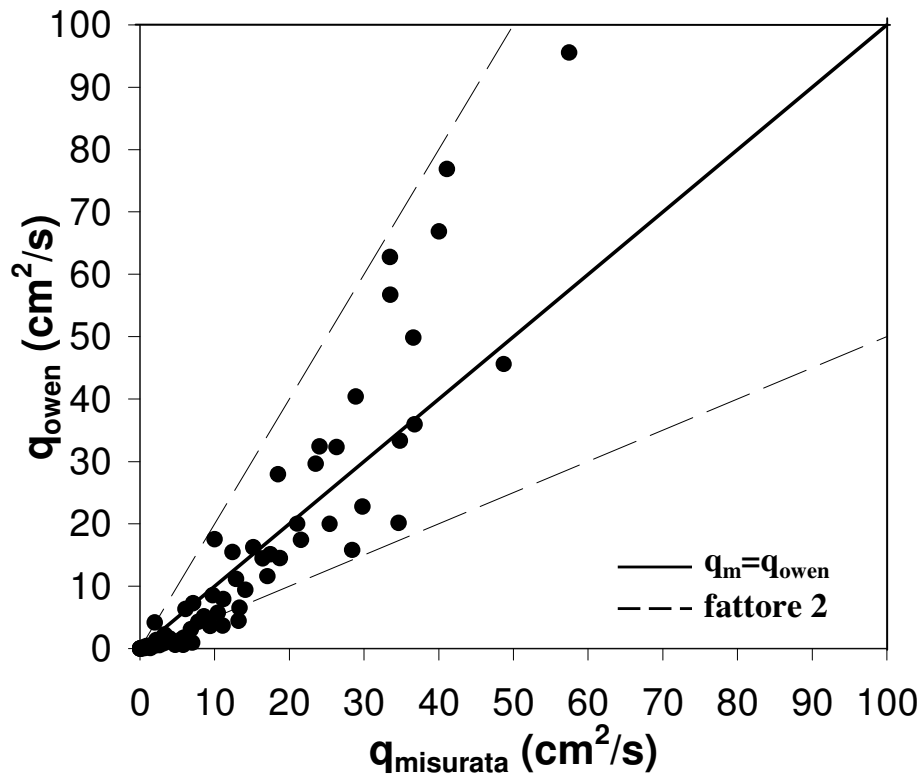


Figura 6.1: Confronto tra la portata di tracimazione misurata sperimentalmente e la portata di tracimazione calcolata con la formula di Owen nel caso di sommergenza positiva $R_c > 0$

6.5.2 Confronto del risultato sperimentalmente con il risultato ottenuto applicando la formula di van der Meer(2002)

La Tabella 6.3 riporta i valori sperimentalmente della sommergenza, R_c , dell'altezza d'onda significativa H_{m0} e del periodo di picco T_p e medio T_{m0} , e le portate di tracimazione misurate, sperimentalmente e ottenute applicando

la formula di van der Meer (2002) (Equazioni 6.3 e 6.4) ai dati sperimentali. Per il gruppo di esperimenti 1-72.

La Figura 6.2 mostra il confronto tra i valori di portata di tracimazione sperimentali e i valori di portata di tracimazione calcolati utilizzando la formula di van der Meer (2002). La linea continua indica il perfetto accordo tra i valori.

Anche in questo caso si nota un buon accordo tra i valori. L'adattamento è migliore rispetto alla formula di Owen ma anche la formula di van der Meer porta a sovrastimare la portata di tracimazione nel caso in cui si abbiano valori maggiori della stessa e a sottostimare i valori di portata minori. In ogni caso la maggior parte dei dati presenta un fattore di accordo pari a 2.

N° Esperimento	R_c (cm)	H_{m0} (cm)	T_p (s)	T_{m0} (s)	$q_{misurata}$ (cm ² /s)	$q_{van_der_meer}$ (cm ² /s)
1	16.53	9.66	1.37	1.25	0.26	0.04
2	16.53	12.31	1.98	1.80	2.20	1.80
3	16.53	12.11	2.31	2.10	1.96	4.06
4	16.53	8.12	1.4	1.27	0.11	0.02
5	16.53	10.97	2.05	1.86	1.27	1.48
6	16.53	11.59	2.35	2.14	2.13	3.87
7	16.53	6.22	1.36	1.24	0.00	0.00
8	16.53	9.71	1.97	1.79	0.89	0.73
9	16.53	9.04	2.34	2.13	1.40	1.66
10	14.53	9.49	1.43	1.30	0.64	0.15
11	14.53	12.28	2.05	1.86	3.29	3.92
12	14.53	12.82	2.22	2.02	6.84	6.65
13	14.53	7.95	1.45	1.32	0.27	0.07
14	14.53	11.62	1.98	1.80	3.95	2.73
15	14.53	11.53	2.12	1.93	5.59	3.84
16	14.53	5.72	1.4	1.27	0.03	0.01
17	14.53	9.83	2.01	1.83	2.30	1.70
18	14.53	10.21	2.32	2.11	4.71	4.20
19	12.53	9.46	1.33	1.21	2.06	0.22
20	12.53	13.46	1.95	1.77	10.40	7.20
21	12.53	13.35	2.22	2.02	13.19	12.52
22	12.53	7.09	1.34	1.22	0.65	0.07
23	12.53	12.53	2.02	1.84	8.57	6.93
24	12.53	12.50	2.45	2.23	11.08	15.86
25	12.53	5.06	1.43	1.30	0.02	0.02
26	12.53	10.23	2.03	1.85	5.77	3.92
27	12.53	10.43	2.5	2.27	6.98	10.84
28	10.53	8.70	1.4	1.27	3.16	0.63
29	10.53	14.42	2.03	1.85	18.75	17.96
30	10.53	14.59	2.28	2.07	25.40	28.34
31	10.53	6.58	1.4	1.27	1.23	0.21
32	10.53	12.65	1.96	1.78	15.17	11.25
33	10.53	12.29	2.42	2.20	17.06	23.68
34	10.53	4.61	1.37	1.25	0.29	0.04
35	10.53	9.43	2.01	1.83	7.13	5.71
36	10.53	10.56	2.28	2.07	11.17	13.15

Tabella 6.3 (a): Clima ondoso e valori della portata di traccimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di van der Meer (2002) per gli esperimenti di traccimazione (Esperimenti 1-36)

N° Esperimento	R_c (cm)	H_{m0} (cm)	T_p (s)	T_{m0} (s)	$q_{misurata}$ (cm²/s)	$q_{van_der_meer}$ (cm²/s)
37	8.53	8.17	1.37	1.25	5.85	1.26
38	8.53	13.99	1.97	1.79	29.78	26.15
39	8.53	14.76	2.42	2.20	36.76	55.96
40	8.53	6.19	1.4	1.27	2.62	0.55
41	8.53	12.08	1.88	1.71	21.05	15.83
42	8.53	12.69	2.17	1.97	28.42	29.25
43	8.53	4.21	1.38	1.25	0.51	0.11
44	8.53	8.74	1.96	1.78	9.74	8.43
45	8.53	10.25	2.38	2.16	14.12	25.04
46	6.53	7.58	1.36	1.24	9.40	2.87
47	6.53	12.78	2.05	1.86	36.60	43.39
48	6.53	13.91	1.96	1.78	48.71	44.91
49	6.53	5.45	1.36	1.24	3.72	1.08
50	6.53	10.77	1.94	1.76	26.32	26.13
51	6.53	11.93	2.4	2.18	34.63	58.80
52	6.53	3.92	1.32	1.20	1.09	0.30
53	6.53	8.03	1.97	1.79	12.39	14.65
54	6.53	9.31	2.34	2.13	17.46	34.35
55	4.53	3.75	1.36	1.24	3.32	1.49
56	4.53	6.62	2.05	1.86	16.42	24.04
57	4.53	8.27	2.18	1.98	23.53	42.45
58	4.53	5.39	1.39	1.26	7.81	4.24
59	4.53	9.85	2.02	1.84	34.79	47.60
60	4.53	11.22	2.14	1.95	41.10	68.32
61	4.53	7.47	1.35	1.23	13.33	8.25
62	2.53	3.52	1.64	1.49	6.10	11.03
63	2.53	6.35	1.94	1.76	24.02	44.58
64	2.53	7.29	2.13	1.94	28.91	65.97
65	2.53	5.03	1.63	1.48	12.86	20.58
66	2.53	8.62	2.05	1.86	40.03	78.22
67	2.53	6.45	1.36	1.24	21.56	20.21
68	1.03	3.44	1.34	1.22	10.00	20.66
69	1.03	5.83	1.96	1.78	33.46	77.24
70	1.03	4.62	1.62	1.47	18.50	43.06
71	1.03	8.20	1.94	1.76	57.44	115.13
72	1.03	6.29	1.63	1.48	33.51	64.53

Tabella 6.3 (b): Clima ondoso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di van der Meer (2002) per gli esperimenti di tracimazione (Esperimenti 37-72)

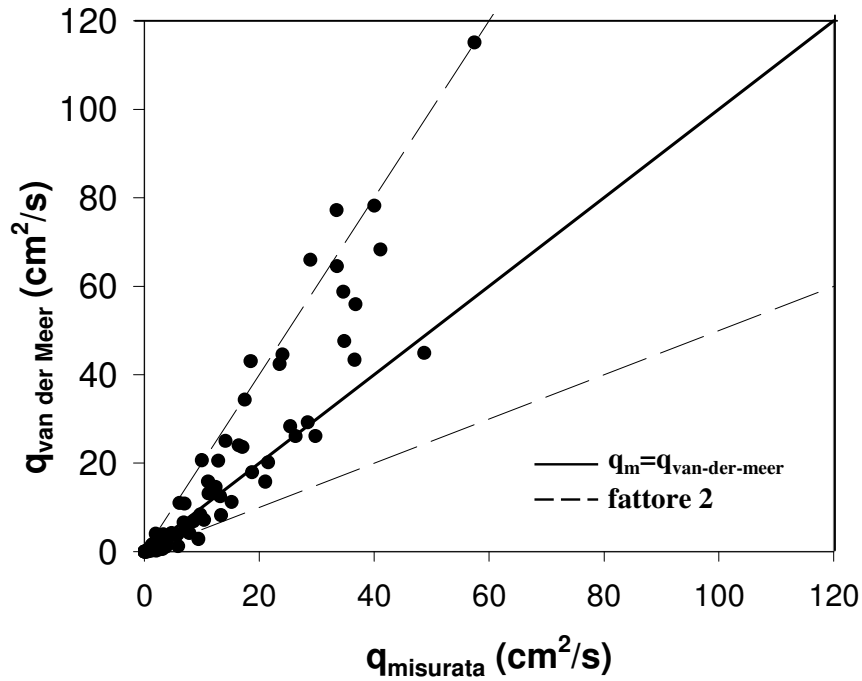


Figura 6.2: Confronto tra la portata di tracimazione misurata sperimentalmente e la portata di tracimazione calcolata con la formula di van der Meer nel caso di sommergenza positiva $R_c > 0$

6.5.3 Confronto del risultato sperimentalmente con il risultato ottenuto applicando la formula di Schüttrumpf

Le formule proposte da Schüttrumpf (2001) sono applicabili in caso di sommergenza positiva $R_c > 0$ (Equazioni 6.8) e nulla $R_c = 0$ (Equazioni 6.10) come spiegato nel paragrafo 6.3. Nell'applicare le formule di Schüttrumpf sono stati quindi considerati gli esperimenti in cui si avevano tali condizioni di sommergenza ($R_c \geq 0$) (esperimenti 1-78).

La Tabella 6.4 riporta i valori sperimentalmente della sommergenza, R_c , dei parametri caratteristici delle onde incidenti (altezza d'onda significativa H_{m0} ,

e periodo di picco e medio T_p e T_{m0}) utilizzati, e i valori di portata di tracimazione sperimentali e calcolati utilizzando la formula proposta da Schüttrumpf.

La Figura 6.3 mostra il confronto tra i valori sperimentali della portata di tracimazione e i valori ottenuti utilizzando le Equazioni 6.8 e 6.10 suggerite da Schüttrumpf per i casi in cui $R_c > 0$ e $R_c = 0$.

L'accordo tra i valori è meno buono rispetto ai casi precedenti delle formule di Owen e Van der Meer e in generale Schüttrumpf porta a sottostimare la portata di tracimazione per il gruppo di esperimenti preso in esame, pur avendo il vantaggio, rispetto alle altre due formule di considerare anche il caso di sommergenza nulla.

N° Esperimento	R_c (cm)	H_{m0} (cm)	T_p (s)	T_{m0} (s)	$q_{misurata}$ (cm ² /s)	$q_{schüttrumpf}$ (cm ² /s)
1	16.53	9.66	1.37	1.25	0.26	0.00
2	16.53	12.31	1.98	1.80	2.20	0.29
3	16.53	12.11	2.31	2.10	1.96	0.74
4	16.53	8.12	1.4	1.27	0.11	0.00
5	16.53	10.97	2.05	1.86	1.27	0.24
6	16.53	11.59	2.35	2.14	2.13	0.70
7	16.53	6.22	1.36	1.24	0.00	0.00
8	16.53	9.71	1.97	1.79	0.89	0.11
9	16.53	9.04	2.34	2.13	1.40	0.27
10	14.53	9.49	1.43	1.30	0.64	0.02
11	14.53	12.28	2.05	1.86	3.29	0.72
12	14.53	12.82	2.22	2.02	6.84	1.30
13	14.53	7.95	1.45	1.32	0.27	0.01
14	14.53	11.62	1.98	1.80	3.95	0.48
15	14.53	11.53	2.12	1.93	5.59	0.71
16	14.53	5.72	1.4	1.27	0.03	0.00
17	14.53	9.83	2.01	1.83	2.30	0.28
18	14.53	10.21	2.32	2.11	4.71	0.79
19	12.53	9.46	1.33	1.21	2.06	0.03
20	12.53	13.46	1.95	1.77	10.40	1.45
21	12.53	13.35	2.22	2.02	13.19	2.70
22	12.53	7.09	1.34	1.22	0.65	0.01
23	12.53	12.53	2.02	1.84	8.57	1.39
24	12.53	12.50	2.45	2.23	11.08	3.53
25	12.53	5.06	1.43	1.30	0.02	0.00
26	12.53	10.23	2.03	1.85	5.77	0.74
27	12.53	10.43	2.5	2.27	6.98	2.33
28	10.53	8.70	1.4	1.27	3.16	0.10
29	10.53	14.42	2.03	1.85	18.75	4.10
30	10.53	14.59	2.28	2.07	25.40	6.82
31	10.53	6.58	1.4	1.27	1.23	0.03
32	10.53	12.65	1.96	1.78	15.17	2.45
33	10.53	12.29	2.42	2.20	17.06	5.63
34	10.53	4.61	1.37	1.25	0.29	0.00
35	10.53	9.43	2.01	1.83	7.13	1.17
36	10.53	10.56	2.28	2.07	11.17	2.95
37	8.53	8.17	1.37	1.25	5.85	0.22
38	8.53	13.99	1.97	1.79	29.78	6.40
39	8.53	14.76	2.42	2.20	36.76	14.82

Tabella 6.4 (a): Clima ondoso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di Schüttrumpf (2001) per gli esperimenti di tracimazione in caso di sommergenza positiva $R_c > 0$ e nulla $R_c = 0$. (Esperimenti 1-39)

N° Esperimento	R_c (cm)	H_{m0} (cm)	T_p (s)	T_{m0} (s)	$q_{misurata}$ (cm ² /s)	$q_{schüttrumpf}$ (cm ² /s)
40	8.53	6.19	1.4	1.27	2.62	0.09
41	8.53	12.08	1.88	1.71	21.05	3.69
42	8.53	12.69	2.17	1.97	28.42	7.28
43	8.53	4.21	1.38	1.25	0.51	0.02
44	8.53	8.74	1.96	1.78	9.74	1.86
45	8.53	10.25	2.38	2.16	14.12	6.20
46	6.53	7.58	1.36	1.24	9.40	0.58
47	6.53	12.78	2.05	1.86	36.60	11.59
48	6.53	13.91	1.96	1.78	48.71	11.99
49	6.53	5.45	1.36	1.24	3.72	0.20
50	6.53	10.77	1.94	1.76	26.32	6.68
51	6.53	11.93	2.4	2.18	34.63	16.25
52	6.53	3.92	1.32	1.20	1.09	0.05
53	6.53	8.03	1.97	1.79	12.39	3.57
54	6.53	9.31	2.34	2.13	17.46	9.10
55	4.53	3.75	1.36	1.24	3.32	0.30
56	4.53	6.62	2.05	1.86	16.42	6.49
57	4.53	8.27	2.18	1.98	23.53	11.99
58	4.53	5.39	1.39	1.26	7.81	0.96
59	4.53	9.85	2.02	1.84	34.79	13.48
60	4.53	11.22	2.14	1.95	41.10	19.88
61	4.53	7.47	1.35	1.23	13.33	1.97
62	2.53	3.52	1.64	1.49	6.10	3.01
63	2.53	6.35	1.94	1.76	24.02	13.47
64	2.53	7.29	2.13	1.94	28.91	20.45
65	2.53	5.03	1.63	1.48	12.86	5.87
66	2.53	8.62	2.05	1.86	40.03	24.40
67	2.53	6.45	1.36	1.24	21.56	5.69
68	1.03	3.44	1.34	1.22	10.00	6.46
69	1.03	5.83	1.96	1.78	33.46	25.77
70	1.03	4.62	1.62	1.47	18.50	14.00
71	1.03	8.20	1.94	1.76	57.44	38.82
72	1.03	6.29	1.63	1.48	33.51	21.28
73	0.000	3.05	1.32	1.20	20.35	15.37
74	0.000	5.46	1.97	1.79	43.87	41.10
75	0.000	6.35	2.29	2.08	51.39	55.25
76	0.000	4.49	1.59	1.45	33.82	27.31
77	0.000	6.08	1.67	1.52	42.56	38.81
78	0.000	7.58	1.91	1.74	71.64	55.35

Tabella 6.4 (b): Clima ondoso e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati utilizzando la formula di Schüttrumpf (2001) per gli esperimenti di tracimazione in caso di sommergenza positiva $R_c > 0$ e nulla $R_c = 0$. (Esperimenti 40-78)

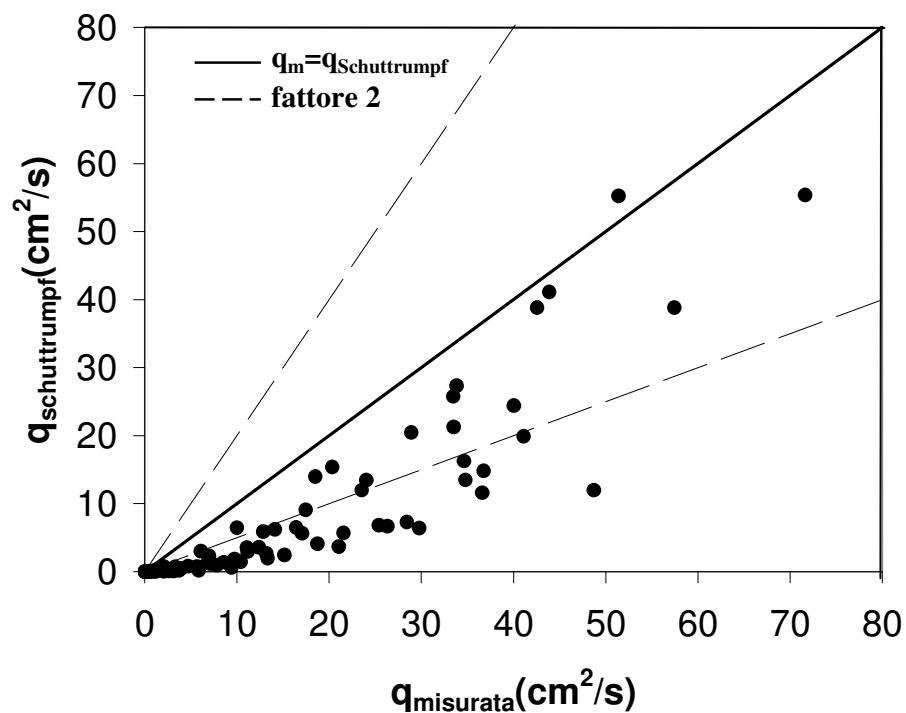


Figura 6.3: Confronto tra la portata di tracimazione misurata sperimentalmente e la portata di tracimazione calcolata con la formula di Schüttrumpf nel caso di sommergenza positiva e nulla $R_c \geq 0$

6.5.4 Confronto tra il risultato sperimentalmente e il risultato ottenuto applicando la formula suggerita da EurOtop (2007) per il caso di sommergenza negativa $R_c < 0$

Le formule empiriche proposte da EurOtop (2007), (Equazioni 6.13) per il caso di combinazione tra i fenomeni di tracimazione e inondazione di strutture costiere in situazione di sommergenza negativa, $R_c < 0$ sono state applicate utilizzando i valori di altezza d'onda e periodo ottenuti sperimentalmente (Esperimenti 79-107).

La Tabella 6.5 riporta i valori della sommergenza, R_c , dell'altezza d'onda significativa, H_{m0} , del periodo di picco, T_p e medio T_{m0} e i valori sperimentali e calcolati empiricamente della portata di tracimazione e inondazione, $q_{misurata}$ e $q_{EurOtop}$.

N° Esperimento	R_c (cm)	H_{m0} (cm)	T_p (s)	T_{m0} (s)	$q_{misurata}$ (cm ² /s)	$q_{EurOtop}$ (cm ² /s)
79	-0.696	6.28	2.03	1.85	33.13	59.62
80	-0.696	5.09	1.69	1.54	27.15	43.76
81	-0.696	8.83	1.89	1.72	26.27	74.69
82	-0.896	3.27	1.62	1.47	24.20	36.19
83	-0.996	5.65	1.88	1.71	40.32	59.28
84	-0.996	4.55	1.64	1.49	33.08	47.20
85	-0.996	9.09	1.97	1.79	48.79	87.14
86	-1.196	2.93	1.61	1.46	29.61	42.34
87	-1.496	2.93	1.57	1.43	42.66	51.83
88	-1.496	4.59	1.69	1.54	46.46	64.06
89	-1.496	8.31	1.88	1.71	58.89	94.08
90	-1.596	5.30	1.87	1.70	52.10	75.74
91	-1.596	2.95	1.65	1.50	44.30	56.05
92	-1.996	5.08	1.96	1.78	66.37	91.03
93	-1.996	4.24	1.56	1.42	62.74	78.29
94	-1.996	7.41	1.88	1.71	69.06	106.22
95	-2.276	4.33	1.59	1.45	82.36	90.86
96	-2.296	4.63	1.93	1.75	73.53	99.46
97	-2.296	4.15	1.65	1.50	73.17	91.53
98	-2.296	7.78	2.06	1.87	84.18	126.63
99	-2.596	2.81	1.57	1.43	94.70	95.23
100	-2.696	5.25	1.97	1.79	105.63	122.73
101	-2.696	2.62	1.64	1.49	87.07	98.78
102	-2.756	5.95	1.63	1.48	104.11	123.05
103	-2.896	2.64	1.62	1.47	98.76	108.30
104	-2.896	4.63	2.03	1.85	100.89	127.86
105	-2.896	4.08	1.58	1.44	102.41	117.26
106	-2.896	7.10	1.95	1.77	107.48	145.50
107	-2.896	2.58	1.6	1.45	99.18	107.77

Tabella 6.5: Clima ondosso, valori della sommergenza e valori della portata di tracimazione misurati sperimentalmente e calcolati con la formula di EurOtop (2007) per gli esperimenti di tracimazione e inondazione in caso di sommergenza negativa $R_c < 0$ (Esperimenti 79-107)

La Figura 6.4 mostra il confronto tra i valori sperimentali e i valori calcolati con la formula di EurOtop della portata di tracimazione e inondazione di una diga costiera. E' evidente dalla figura che l'equazione 6.13 di EurOtop (2007) sovrastima i valori di portata per il tipo di struttura e per le condizioni ondose prese in esame. L'adattamento è comunque buono per la quasi totalità dei dati che presentano un fattore di accordo pari a 2.

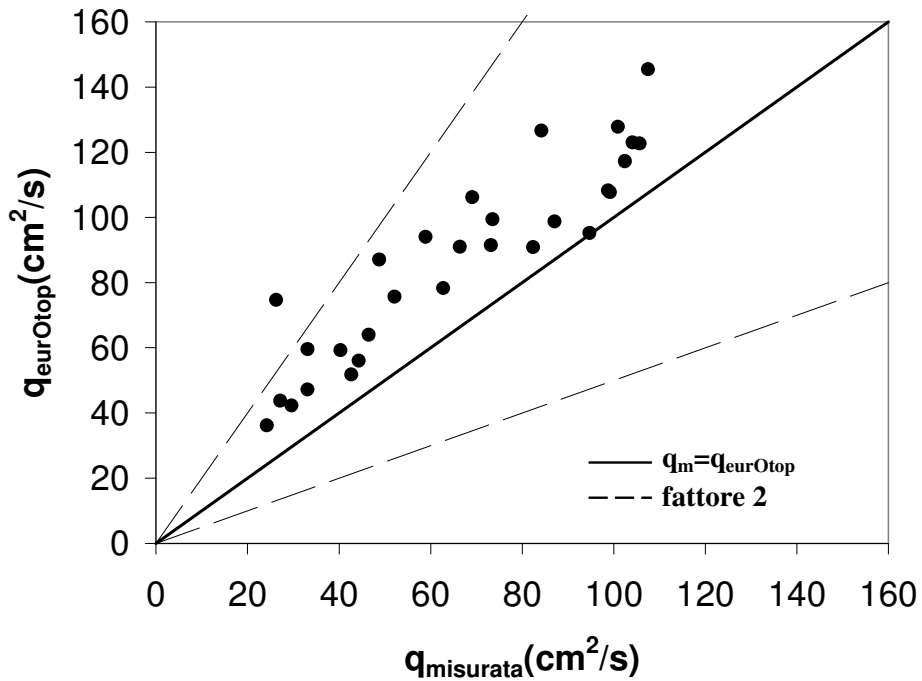


Figura 6.4: Confronto tra la portata di tracimazione misurata sperimentalmente e la portata di tracimazione calcolata con la formula suggerita da EurOtop (2007) nel caso di sommergenza negativa $R_c < 0$

6.6 Sintesi dei risultati

Nei precedenti paragrafi sono stati presentati e discussi i risultati ottenuti dal confronto tra le formule empiriche presenti in letteratura, per le quali si è resa possibile l'applicazione alla tipologia di struttura utilizzata negli esperimenti, e i valori della portata di tracimazione misurati nel corso degli esperimenti.

Dai risultati ottenuti si è visto come le formule di Owen (1980) e van der Meer (2002) diano risultati più soddisfacenti rispetto alle formule proposte da Schüttrumpf (2001). Quest'ultima però è di maggior interesse in quanto applicabile anche a casi in cui si abbia sommergenza nulla e, combinata con la formula per il calcolo della portata che inonda una diga a larga soglia, dà un discreto risultato nel caso in cui la sommergenza sia negativa e vi sia una combinazione dei fenomeni di tracimazione e inondazione.

Soliman (2003) ha proposto una serie di formule pratiche per il calcolo della portata di tracimazione e inondazione di strutture costiere per dighe impermeabili con paramento lato mare inclinato di pendenza 1/3, 1/4 e 1/6.

Nel presente paragrafo vengono proposte alcune formule pratiche che legano la portata di tracimazione all'altezza della cresta della struttura. Esse sono state ricavate utilizzando le misure sperimentali a disposizione (parametri caratteristici del moto ondoso, geometria della struttura). La struttura considerata, per l'applicazione di tali relazioni, è una struttura impermeabile con paramento lato mare inclinato con pendenza 1/5.

Le formule proposte sono tutte del tipo:

$$Q = a \exp(-bR) \quad (6.15)$$

con:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}}; \quad R = \frac{R_c}{R_{2\%}} \quad (6.16)$$

dove Q è la portata di tracimazione e inondazione adimensionale e R è la sommergenza adimensionale. Inoltre $R_{2\%} = H_{m0}\xi_{m0}$ tiene conto del tipo di frangimento attraverso il numero di Irribarren ξ_{m0} .

Le formule sono state ricavate suddividendo i dati sperimentali in gruppi in base alle diverse condizioni di sommergenza e precisamente:

- Formula empirica per il caso di sommergenza positiva e nulla $R_c \geq 0$
- Formule empiriche per il caso di sommergenza negativa $R_c < 0$
- Formula empirica per il caso di sommergenza positiva, nulla e negativa $R_c > 0$, $R_c = 0$, $R_c < 0$ che tiene conto contemporaneamente della totalità dei dati a disposizione

Le formule proposte sono descritte nei paragrafi seguenti. Per la stima dei coefficienti a e b è stato considerato un intervallo di confidenza del 95%.

6.6.1 *Sommergenza positiva e nulla: $R_c \geq 0$*

Per questo gruppo di esperimenti tutti i valori del numero di Irribarren misurati sono minori o uguali a 2 ($\xi_{m0} \leq 2$) si hanno quindi sempre onde con frangimento di tipo plunging.

Il valore adimensionale R è compreso nell'intervallo $0 \leq R \leq 2$. La formula suggerita che fornisce il miglior adattamento ai dati sperimentali è:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.106 \exp\left(-3.62 \frac{R_c}{R_{2\%}}\right) \quad \xi_o \leq 2 \quad (6.17)$$

Considerando un intervallo di confidenza del 95% i coefficienti $a = 0.106$ e $b = 3.62$ dell'Equazione (6.17), ricavati per questo gruppo di esperimenti, sono compresi nell'intervallo $a \in (0.1033, 0.1094)$ e $b \in (3.447, 3.786)$ rispettivamente.

La deviazione standard è $\sigma = 0.0041$; valori di questo parametro prossimi a zero indicano un buon adattamento dell'equazione ai dati sperimentali.

Il valore del coefficiente di correlazione per l'Equazione (6.17) è $r^2 = 0.98$. È un valore molto prossimo a 1 che indica il buon accordo tra la relazione proposta e i valori sperimentali.

La Figura 6.5 mostra l'adattamento dell'equazione 6.17 ai dati sperimentali.

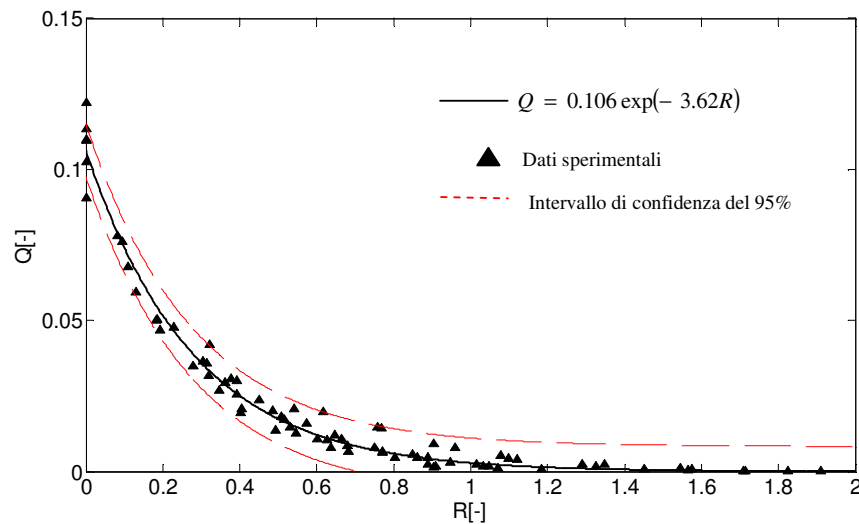


Figura 6.5: andamento dei dati sperimentali di portata di tracimazione in caso di sommergenza positiva e nulla basato sull'equazione (6.17)

6.6.2 Sommergenza negativa: $R_c < 0$

Per questo gruppo di esperimenti è stato possibile fare una distinzione in base al tipo di frangimento in quanto si avevano situazioni in cui si verificavano onde con frangimento di tipo plunging e situazioni in cui si verificavano onde con frangimento di tipo surging. Le formule suggerite sono:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.056 \exp\left(-5.09 \frac{R_c}{R_{2\%}}\right) \quad \xi_{m0} \leq 2 \quad (6.18 \text{ a})$$

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.088 \exp\left(-4.42 \frac{R_c}{R_{2\%}}\right) \quad \xi_{m0} > 2 \quad (6.18 \text{ b})$$

Il valore di R è compreso nell'intervallo $-0.4 \leq R < 0$ nel caso di $\xi_{m0} \leq 2$ (plunging) e $-0.5 \leq R < -0.13$ nel caso di $\xi_{m0} > 2$ (surging).

I coefficienti $a = 0.056$ e $b = 5.09$ dell'Equazione (6.18 a) sono compresi nell'intervallo $a \in (0.04255, 0.06899)$ e $b \in (4.309, 5.887)$ rispettivamente, con un intervallo di confidenza del 95%. La deviazione standard è $\sigma = 0.028$.

Il valore del coefficiente di correlazione per l'Equazione (6.18 a) è $r^2 = 0.92$.

La Figura 6.6 mostra l'adattamento dell'equazione (6.18 a) ai dati sperimentali nel caso di sommergenza negativa e numero di Iribarren $\xi_{m0} \leq 2$.

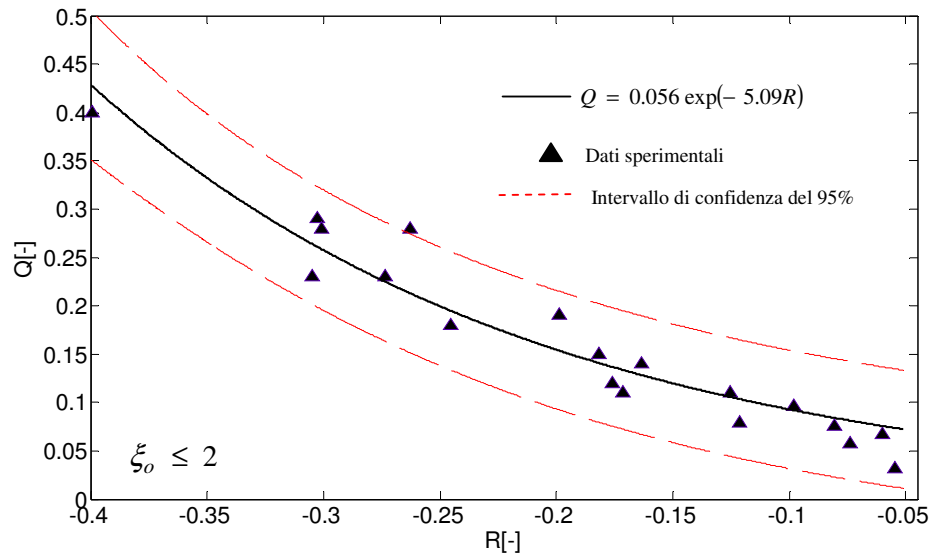


Figura 6.6: andamento dei dati sperimentali di portata di tracimazione in caso di sommergenza negativa basato sull'equazione (6.18 a)

I coefficienti $a = 0.088$ e $b = 4.42$ dell'Equazione (6.18 b) sono compresi nell'intervallo $a \in (0.07112, 0.1051)$ e $b \in (3.984, 4.855)$ rispettivamente, con un intervallo di confidenza del 95%.

La deviazione standard è $\sigma = 0.025$. Il valore del coefficiente di correlazione per l'Equazione (6.18 b) è $r^2 = 0.99$. E' un valore molto prossimo a 1 che indica il buon adattamento dell'equazione ai dati sperimentali.

La Figura 6.7 mostra l'adattamento dell'equazione (6.18 b) ai dati sperimentali nel caso in cui il numero di Iribarren è $\xi_{m0} > 2$.

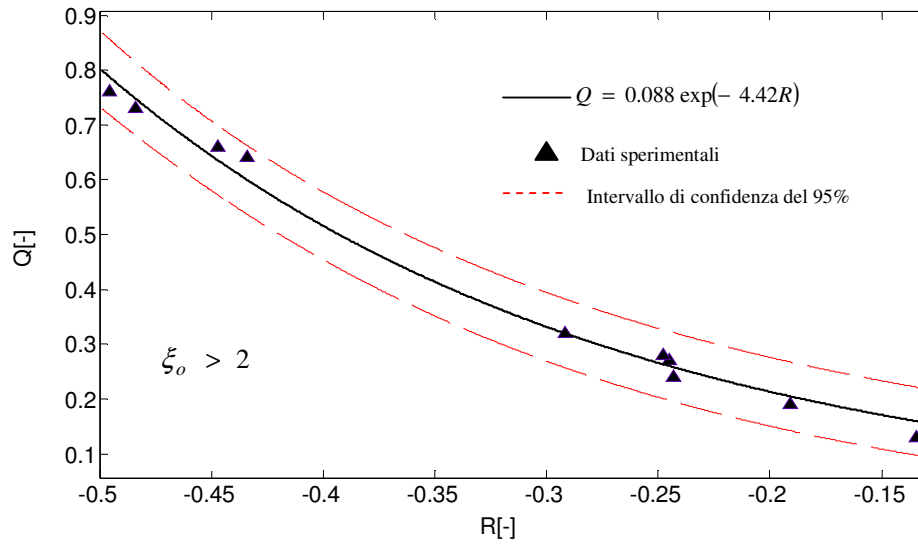


Figura 6.7: andamento dei dati sperimentali di portata di tracimazione in caso di sommergenza negativa basato sull'equazione (6.18 b)

Per il gruppo di esperimenti in cui si aveva sommergenza negativa è stata ricavata anche un'unica relazione che tiene conto della totalità dei dati senza distinguere i due casi in cui si ha $\xi_o \leq 2$ e $\xi_o > 2$.

La formula proposta è la seguente:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.059 \exp\left(-5.23 \frac{R_c}{R_{2\%}}\right) \quad (6.19)$$

Con un intervallo di confidenza del 95%, i coefficienti $a = 0.059$ e $b = 5.23$ dell'Equazione (6.19), ricavati per il gruppo di esperimenti in cui si aveva $R_c < 0$, sono compresi nell'intervallo $a \in (0.04878, 0.06978)$ e $b \in (4.807, 5.659)$ rispettivamente.

La deviazione standard è $\sigma = 0.038$ mentre il valore del coefficiente di correlazione per l'Equazione (6.19) è $r^2 = 0.96$.

La Figura (6.8) mostra l'adattamento dell'equazione (6.19) ai dati sperimentali.

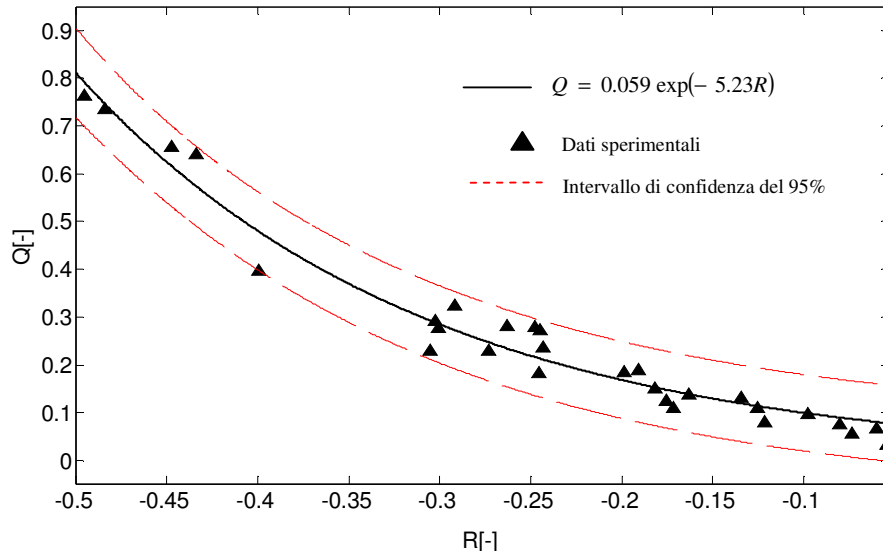


Figura 6.8: andamento dei dati sperimentali di portata di tracimazione in caso di sommergenza negativa basato sull'equazione (6.19)

6.6.3 Sommergenza positiva, nulla e negativa: $R_c > 0$, $R_c = 0$, $R_c < 0$

Come ultimo caso si è pensato di ricavare una relazione empirica che fosse applicabile con buoni risultati alla totalità dei dati misurati per i 107 esperimenti. La relazione empirica suggerita prende in considerazione quindi tutti i valori di sommergenza e tutti i valori del numero di Iribarren.

La formula empirica proposta è la seguente:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.069 \exp\left(-4.89 \frac{R_c}{R_{2\%}}\right) \quad (6.20)$$

Considerando un intervallo di confidenza del 95% i coefficienti $a = 0.069$ e $b = 4.89$ dell'Equazione (6.20), sono compresi nell'intervallo $a \in (0.06214, 0.07512)$ e $b \in (4.653, 5.118)$ rispettivamente.

La deviazione standard è $\sigma = 0.025$, mentre il valore del coefficiente di correlazione è $r^2 = 0.97$. Anche in questo caso si ha un buon accordo dell'equazione con i dati sperimentali.

La Figura (6.9) mostra l'adattamento dell'equazione (6.20) ai dati misurati per i 107 esperimenti discussi nel Capitolo 3.

E' comunque evidente in Figura (6.9) un andamento dei dati diverso per i due gruppi di dati in cui si ha $-0.5 \leq R < 0$ e $0 \leq R \leq 2.5$ rispettivamente.

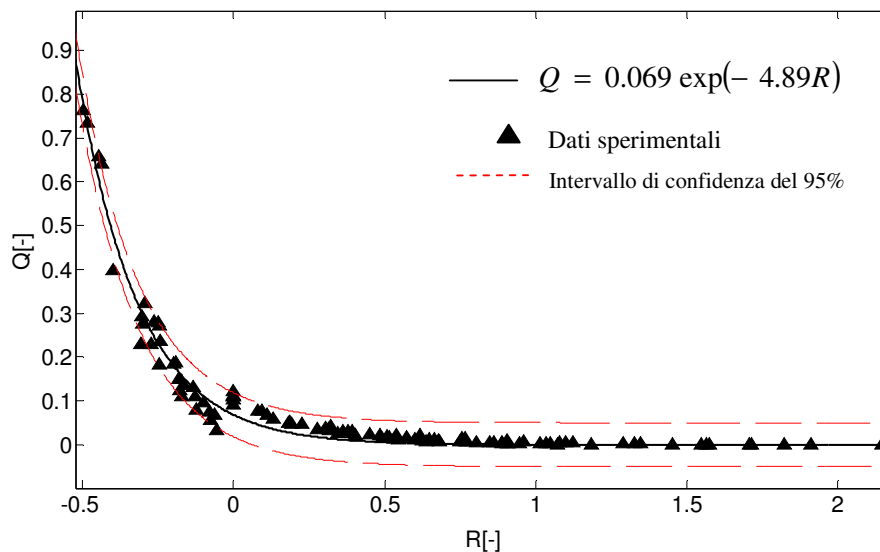


Figura 6.9: andamento dei dati sperimentali di portata di tracimazione in caso di sommergenza positiva, nulla e negativa basato sull'equazione (6.20)

Le formule proposte hanno evidenziato tutte un buon adattamento ai dati sperimentali, per i diversi gruppi di esperimenti considerati. Esse derivano da dati misurati sperimentalmente utilizzando una struttura con precisa

configurazione geometrica e in determinate condizioni di moto ondoso. Necessitano quindi di ulteriori verifiche per verificarne l'adattabilità ad un maggior numero di esperimenti che comprendano diverse tipologie di strutture e differenti valori di altezza d'onda significativa e periodo.

7 CONCLUSIONI

La ricerca svolta ha riguardato lo studio dei fenomeni di tracimazione e inondazione di dighe costiere. Lo studio nasce dall'esigenza di conoscere meglio i problemi legati a questi fenomeni. La stima dei valori di portata di tracimazione ammissibili è di fondamentale importanza nella progettazione delle dighe costiere, dal momento che queste sono costruite con lo scopo di garantire la sicurezza delle aree poste a tergo. Gli avvenimenti disastrosi che si sono verificati negli ultimi anni nei Paesi Bassi (1953), in Germania (1962), in Danimarca (1976) e negli Stati Uniti (2005) sono un esempio di collasso di strutture costiere soggette a tracimazione e inondazione causate da eventi ondososi estremi.

Negli ultimi anni, molti autori hanno studiato i suddetti fenomeni proponendo in alcuni casi formule empiriche per la stima della portata di tracimazione di dighe costiere. Ma, la letteratura attuale necessita di ulteriori contributi in particolare nel caso in cui si abbia tracimazione conseguente a situazioni di elevati livelli d'acqua di fronte alla struttura e nel caso in cui vi sia la combinazione tra i fenomeni di tracimazione e inondazione.

La ricerca svolta ha avuto l'obiettivo di dare un ulteriore contributo allo stato dell'arte attuale, investigando sui fenomeni, confrontando tra loro differenti metodologie di studio (sperimentale, numerico ed empirico) e proponendo una serie di formule pratiche applicabili a dighe costiere impermeabili con paramento lato mare avente pendenza 1/5.

Lo studio è stato suddiviso in diverse fasi. Sono stati condotti 107 esperimenti in canaletta utilizzando elevati livelli d'acqua di fronte la struttura. Questi ultimi sono stati incrementati fino ad avere condizioni di inondazione della struttura. Per ognuno degli esperimenti sono state generate onde irregolari riproducenti uno spettro del tipo TMA.

E' stato inoltre tarato e applicato il modello numerico CSHOREP di Kobayashi e de los Santos (2007). Si tratta di un modello di tipo *time averaged* basato sulle equazioni di continuità, del momento e dell'azione della conservazione dell'energia all'interno del quale i termini relativi alle grandezze idrodinamiche che regolano il fenomeno di propagazione da largo a riva dell'onda sono integrati rispetto al tempo e mediati rispetto alla profondità. Il modello di interazione onda corrente è associato a un modello probabilistico per la stima della risalita dell'onda sul paramento lato mare della struttura che permette di valutare i valori della portata di tracimazione. Il modello numerico ha consentito, inoltre, di predire la variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera e della velocità della corrente mediata rispetto alla profondità del fluido

Il confronto tra i dati sperimentali e i risultati ottenuti utilizzando il modello numerico ha messo in evidenza il buon adattamento del modello alla situazione simulata sperimentalmente permettendo di trarre alcune conclusioni.

Dal raffronto dei valori dell'oscillazione media del livello marino, misurati e calcolati, è evidente come, durante la propagazione dell'onda da largo verso riva, la presenza di una portata di tracimazione e inondazione eccessiva comporta un aumento della velocità media del flusso diretto verso largo e una diminuzione della risalita sul paramento lato mare della diga costiera. La previsione della portata di tracimazione e inondazione rientra comunque in un intervallo accettabile di valori. Il confronto tra i valori misurati e calcolati, infatti, presenta un fattore di accordo pari a 2. Il modello numerico necessita comunque di ulteriori verifiche con dati sperimentali a larga scala utilizzando strutture costiere con paramento lato mare inclinato e scabro. In generale il modello numerico si è comunque rivelato molto efficiente e di facile utilizzo per predire la variazione temporale della portata di tracimazione e inondazione di una struttura costiera durante l'intera durata di una mareggiata.

In una successiva fase dello studio le misure sperimentali sono state utilizzate per verificare l'adattamento di alcune formule empiriche [Owen (1980); van

der Meer (2002); Schüttrumpf (2001); EurOtop (2007)]; alla situazione simulata sperimentalmente. Le formule selezionate hanno consentito di effettuare un raffronto tra i valori di portata di tracimazione sperimentali ed empirici.

Le formule di Owen (1980) e van der Meer (2002) hanno dato un buon risultato per il caso di sommergenza positiva $R_c > 0$ a meno dei valori maggiori di portata tracimante. Per la maggior parte dei valori confrontati si è riscontrato comunque un fattore di accordo pari a 2.

La formula di Schüttrumpf (2001), applicabile a valori di sommergenza positiva $R_c > 0$ e nulla $R_c = 0$, sottostima i valori di portata di tracimazione per il gruppo di esperimenti che rientrava in questa categoria.

La formula suggerita da EurOtop (2007), applicata ai dati in cui erano stati misurati valori di sommergenza negativa $R_c < 0$, ha invece evidenziato una tendenza a sovrastimare i valori di portata di tracimazione e inondazione, il che potrebbe essere considerato a vantaggio di sicurezza. Per la totalità dei dati appartenenti a questo gruppo di esperimenti si riscontra un fattore di accordo pari a 2.

Per dare un ulteriore contributo alla letteratura esistente, i dati sperimentali a disposizione sono stati utilizzati per ricavare una serie di formule pratiche che consentono il calcolo della portata di tracimazione e inondazione nel caso di dighe costiere lisce e impermeabile con paramento lato mare avente pendenza 1/5. Le relazioni proposte sono state ottenute per le diverse situazioni di sommergenza ($R > 0$, $R = 0$; $R < 0$).

Le formule proposte sono state ricavate per una specifica tipologia di struttura e per determinate condizioni di moto ondoso, necessitano perciò di ulteriori verifiche per studiarne l'adattamento a casistiche più generali.

7.1 Sviluppi futuri

Lo studio condotto suggerisce come l'analisi dei fenomeni di tracimazione e inondazione di dighe costiere possa essere ulteriormente sviluppata.

Innanzitutto il modello numerico CSHOREP può essere ulteriormente verificato estendendo la taratura dei parametri utilizzando dati di laboratorio a larga scala o dati di campo.

Inoltre la flessibilità e la velocità di calcolo del modello ne suggeriscono l'applicazione anche a situazioni reali per valutare la risposta dello stesso nell'ipotesi di eventi ondosi estremi. Esso è infatti in grado di simulare diverse tipologie di strutture di difesa costiera soggette a differenti condizioni di moto ondoso.

Un'ulteriore approfondimento riguarda le formule di progetto proposte che necessitano di un'ulteriore verifica, utilizzando un maggior numero di esperimenti. Esse, infatti, sono limitate al caso di studio analizzato ma possono risultare utili per effettuare una verifica della funzionalità di strutture esistenti che rispecchiano le caratteristiche richieste per la loro applicazione.

APPENDICE A

SENSITIVITÀ DEL MODELLO NUMERICO AI PARAMETRI EMPIRICI DI INPUT

A. SENSITIVITÀ DEL MODELLO NUMERICO AI PARAMETRI EMPIRICI DI INPUT

Le Tabelle A.1- A.4 mostrano i risultati ottenuti con il modello numerico e i risultati ottenuti sperimentalmente per i 107 esperimenti. I diversi valori dei parametri di input utilizzati nei casi considerati sono riassunti di seguito

Tabella	Parametro di frangimento γ	Elevazione del misuratore di risalita dell'onda sul pendio 1/5 δ_r (m)	Fattore di attrito sul paramento lato mare della struttura f_b
A.1	0.7	0.02	0.0
A.2	0.8	0.02	0.0
A.3	0.8	0.01	0.0
A.4	0.8	0.02	0.01

Il risultato riportato in Tabella A.2 è lo stesso di quello riportato nella Tabella 5.1 del Capitolo 5.

Le grandezze riportate nelle Tabelle A1-A4 hanno il seguente significato:

H_{SWL} = tirante d'acqua misurato sulla cresta della struttura

q_{SWL} = portata indotta dall'onda in direzione *on-shore*

P_o = probabilità di tracimazione

q_o = portata di tracimazione calcolata utilizzando il modello numerico

q_o (empirica) = portata di tracimazione calcolata utilizzando il modello numerico attraverso la formula empirica di Van der Meer (2002)

$S + \overline{\eta}_r$ = livello d'acqua medio che tiene conto dell'incremento di livello dovuto all'escursione di marea S e della risalita media dell'onda sulla scarpata inclinata della diga, $\overline{\eta}_r$. Tale livello è misurato rispetto all'origine $z = 0$.

σ_r = deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera sulla scarpata inclinata della diga

H_1 = tirante d'acqua misurato in corrispondenza della sonda G1

q_m = portata di tracimazione misurata sperimentalmente

σ_m = deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera misurata sperimentalmente

Le Figure A.1 – A.4 mostrano il confronto tra i valori della portata di tracimazione e inondazione calcolata con il modello numerico e misurata sperimentalmente per le quattro combinazioni dei parametri considerate. In particolare la Figura A.2 corrisponde alla Figura 5.4 del Capitolo5.

Le figure mostrano che il migliore accordo tra il risultato numerico con i 107 dati sperimentali si ottiene inserendo nel modello numerico i valori dei parametri $\gamma=0.8$, $\delta_r=0.02$ m e $f_b=0.0$.

Esperimento	MODELLONUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
1	0.00	34.98	0.0000	0.00	0.01	0.64	1.95	-16.57	0.12	0.26	1.09	3.14
2	0.00	52.38	0.0000	0.00	0.47	1.37	2.61	-16.76	0.46	2.20	1.29	5.27
3	0.00	59.45	0.0000	0.00	1.66	1.66	2.87	-16.85	0.46	1.96	1.37	5.57
4	0.00	32.59	0.0000	0.00	0.01	0.48	1.90	-16.54	0.08	0.11	0.90	2.13
5	0.00	50.19	0.0000	0.00	0.59	1.19	2.60	-16.65	0.24	1.27	1.47	3.58
6	0.00	56.83	0.0000	0.00	1.77	1.47	2.83	-16.68	0.22	2.13	1.63	4.34
7	0.00	26.50	0.0000	0.00	0.00	0.26	1.62	-16.53	0.00	0.00	0.17	1.62
8	0.00	42.30	0.0000	0.00	0.34	0.76	2.39	-16.61	0.13	0.89	0.91	3.15
9	0.00	50.81	0.0000	0.00	1.51	1.11	2.71	-16.65	0.19	1.40	1.11	3.57
10	0.00	36.99	0.0000	0.00	0.06	2.67	2.23	-14.57	0.12	0.64	2.91	2.59
11	0.00	54.62	0.0002	0.01	1.76	3.30	2.97	-14.89	0.32	3.29	3.70	4.12
12	0.00	58.38	0.0005	0.03	3.11	3.44	3.12	-15.13	0.22	6.84	3.67	5.19
13	0.00	33.82	0.0000	0.00	0.05	2.52	2.12	-14.56	0.07	0.27	2.53	2.18
14	0.00	47.44	0.0000	0.00	1.20	2.91	2.80	-14.84	0.34	3.95	3.14	3.94
15	0.00	54.29	0.0002	0.01	2.17	3.25	3.00	-14.91	0.39	5.59	3.38	4.63
16	0.00	25.25	0.0000	0.00	0.01	2.26	1.67	-14.53	0.02	0.03	2.22	1.60
17	0.00	40.82	0.0000	0.00	1.00	2.61	2.59	-14.76	0.29	2.30	2.66	3.21
18	0.00	50.26	0.0001	0.01	3.36	2.97	2.97	-14.83	0.37	4.71	3.04	4.14

Tabella A.1 (a): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.7$; $\delta_r = 0.02$; $f_b = 0.0$. Esperimenti 1-18

Esperimento	MODELLONUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
19	0.00	36.49	0.0000	0.00	0.12	4.59	2.24	-12.63	NM	2.06	5.18	2.67
20	0.00	53.59	0.0030	0.16	3.13	5.03	3.16	-13.19	NM	10.40	5.61	4.34
21	0.00	61.44	0.0093	0.57	7.16	5.36	3.43	-13.34	NM	13.19	5.84	5.34
22	0.00	30.85	0.0000	0.00	0.06	4.39	1.98	-12.58	NM	0.65	5.02	2.05
23	0.00	48.13	0.0017	0.08	3.53	4.67	3.10	-13.29	NM	8.57	5.10	3.97
24	0.00	59.70	0.0092	0.55	11.20	5.19	3.47	-13.17	NM	11.08	5.44	4.85
25	0.00	23.57	0.0000	0.00	0.03	4.20	1.57	-12.53	NM	0.02	4.33	1.53
26	0.00	43.95	0.0004	0.02	2.71	4.60	2.83	-12.90	0.85	5.77	4.70	3.24
27	0.00	48.65	0.0021	0.10	9.57	4.66	3.17	-13.14	0.81	6.98	4.69	3.88
28	0.00	39.84	0.0009	0.04	0.65	6.59	2.48	-10.74	0.26	3.16	6.82	2.42
29	0.00	60.80	0.0455	2.77	9.53	7.20	3.51	-11.24	0.74	18.75	7.90	4.34
30	0.00	70.28	0.0941	6.61	17.96	7.65	3.77	-11.29	0.66	25.40	8.37	5.34
31	0.00	34.29	0.0001	0.00	0.36	6.46	2.17	-10.61	0.17	1.23	6.54	2.06
32	0.00	55.15	0.0264	1.45	7.16	6.96	3.33	-11.10	0.69	15.17	7.58	4.03
33	0.00	64.46	0.0693	4.47	21.20	7.28	3.72	-11.24	0.67	17.06	7.72	4.89
34	0.00	23.05	0.0000	0.00	0.07	6.16	1.54	-10.56	0.07	0.29	6.44	1.63
35	0.00	39.51	0.0029	0.12	4.89	6.24	2.82	-11.20	0.50	7.13	6.46	3.35
36	0.00	50.99	0.0190	0.97	12.26	6.71	3.27	-11.14	0.51	11.17	6.97	4.08

Tabella A.1 (b): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.7$; $\delta_r = 0.02$; $f_b = 0.0$. Esperimenti 19-36

Esperimento	MODELLONUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_m (cm)
37	0.00	37.33	0.0082	0.31	1.60	8.38	2.47	-8.92	0.45	5.85	8.94	2.56
38	0.00	63.80	0.2093	13.36	18.19	9.35	3.58	-9.13	0.82	29.78	10.28	4.38
39	0.00	70.19	0.3130	21.97	43.21	9.57	3.82	-9.31	0.85	36.76	10.22	5.19
40	0.00	30.15	0.0008	0.02	0.84	8.21	2.05	-8.78	0.27	2.62	8.54	2.05
41	0.00	53.97	0.1041	5.62	12.15	8.83	3.33	-9.15	0.65	21.05	9.60	3.99
42	0.00	63.89	0.2200	14.05	25.92	9.29	3.65	-9.14	0.68	28.42	9.56	4.47
43	0.00	20.74	0.0000	0.00	0.18	8.09	1.40	-8.57	0.09	0.51	8.41	1.42
44	0.00	42.06	0.0291	1.22	9.22	8.35	2.88	-9.14	0.54	9.74	8.40	3.12
45	0.00	54.03	0.1049	5.67	25.97	8.83	3.33	-9.04	0.63	14.12	8.82	3.69
46	0.00	36.76	0.0592	2.18	4.23	10.33	2.43	-6.94	0.54	9.40	10.84	2.35
47	0.00	59.57	0.5199	30.97	42.05	11.25	3.35	-7.08	0.78	36.60	11.51	3.80
48	0.00	60.14	0.5293	31.83	38.22	11.28	3.35	-7.22	0.93	48.71	11.48	4.61
49	0.00	25.91	0.0057	0.15	1.86	9.96	1.92	-6.96	0.30	3.72	10.22	1.86
50	0.00	52.95	0.3751	19.86	28.58	10.90	3.24	-7.08	0.79	26.32	11.13	3.45
51	0.00	59.80	0.5358	32.04	65.47	11.17	3.43	-7.15	0.82	34.63	11.17	4.31
52	0.00	19.77	0.0001	0.00	0.52	10.04	1.36	-6.61	0.16	1.09	10.22	1.41
53	0.00	42.42	0.1355	5.75	17.49	10.45	2.77	-6.98	0.56	12.39	10.52	2.85
54	0.00	49.58	0.2878	14.27	39.80	10.74	3.12	-7.01	0.60	17.46	10.61	3.46
55	0.00	18.29	0.0057	0.10	2.50	11.86	1.36	-4.79	0.36	3.32	12.09	1.46
56	0.00	36.07	0.4129	14.89	33.79	12.43	2.43	-4.84	0.69	16.42	12.48	2.60
57	0.00	39.11	0.6007	23.49	53.31	12.48	2.70	-5.04	0.74	23.53	12.47	3.17
58	0.00	27.65	0.1004	2.78	6.67	12.07	1.92	-4.86	0.58	7.81	12.38	1.91
59	0.00	43.19	0.7555	32.63	58.65	12.60	2.88	-5.17	0.80	34.80	12.66	3.21
60	0.00	48.97	0.8767	42.93	79.52	12.86	2.95	-5.09	0.81	41.10	12.74	3.67
61	0.00	33.59	0.2858	9.60	11.22	12.27	2.29	-4.96	0.64	13.33	12.65	2.34

Tabella A.1 (c): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.7$; $\delta_r = 0.02$; $f_b = 0.0$. Esperimenti 37-61

Esperimento	MODELLONUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
62	0.00	14.08	0.0881	1.24	13.93	13.50	1.27	-3.11	0.54	6.10	13.52	1.40
63	0.00	23.64	0.8905	21.05	50.61	14.12	1.97	-2.90	0.81	24.02	14.29	2.46
64	0.00	26.88	0.9774	26.28	72.96	14.20	2.16	-2.96	0.89	28.91	14.16	2.84
65	0.00	20.82	0.6098	12.70	26.69	13.97	1.72	-2.89	0.72	12.86	14.15	1.88
66	0.00	34.32	0.9999	34.32	88.59	14.49	2.41	-2.89	0.90	40.03	14.48	2.89
67	0.00	22.05	0.7793	17.18	22.67	14.13	1.79	-2.81	0.79	21.56	14.49	2.10
68	0.00	8.39	0.6637	5.57	23.60	14.92	1.11	-1.66	0.77	10.00	14.99	1.26
69	0.01	18.44	1.0000	18.48	88.89	15.29	1.92	-1.69	0.88	33.46	15.06	2.04
70	0.00	12.94	0.9992	12.93	50.76	15.13	1.54	-1.64	0.81	18.50	15.12	1.53
71	0.38	28.87	1.0000	36.31	131.39	15.85	2.27	-1.44	0.96	57.44	15.53	2.42
72	0.14	21.50	1.0000	23.12	77.60	15.59	1.95	-1.44	0.88	33.51	15.60	1.79
73	0.35	6.24	1.0000	12.62	33.34	16.32	0.98	-0.25	0.98	20.35	16.11	1.08
74	0.60	14.40	1.0000	28.89	94.76	16.33	1.56	-0.48	1.00	43.87	15.99	1.89
75	0.71	17.72	1.0000	36.53	122.76	16.59	1.65	-0.36	1.00	51.40	16.07	2.15
76	0.55	11.80	1.0000	24.58	63.01	16.45	1.27	-0.22	0.98	33.82	16.31	1.41
77	0.66	16.24	1.0000	33.00	91.35	16.44	1.65	-0.48	0.93	42.56	16.09	1.60
78	0.87	23.04	1.0000	48.41	129.43	16.80	1.86	-0.34	0.97	71.64	16.03	2.04
79	0.53	12.49	1.0000	24.52	152.52	15.79	1.97	-1.21	1.00	33.13	15.57	2.05
80	0.54	12.43	1.0000	24.85	105.59	16.24	1.55	-0.54	1.00	27.15	16.04	1.46
81	0.57	16.12	1.0000	29.47	185.02	15.56	2.42	-1.79	1.00	26.27	15.61	2.80
82	0.55	9.68	1.0000	22.49	64.84	16.77	1.02	0.24	1.00	24.20	16.69	1.02
83	0.59	14.32	1.0000	28.65	129.48	16.26	1.69	-0.60	1.00	40.32	16.07	1.78
84	0.60	12.76	1.0000	27.41	90.45	16.62	1.32	-0.03	1.00	33.08	16.55	1.32
85	0.67	17.77	1.0000	34.95	206.61	15.76	2.49	-1.68	1.00	48.79	15.44	2.60
86	0.67	9.64	1.0000	26.97	58.57	17.09	0.88	0.61	1.00	29.61	17.20	0.86

Tabella A.1 (d): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.7$; $\delta_r = 0.02$; $f_b = 0.0$. Esperimenti 62-86

Esperimento	MODELLONUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
87	1.04	10.49	1.0000	43.77	55.23	17.55	0.70	1.22	1.00	42.66	17.68	0.75
88	0.92	15.46	1.0000	43.27	90.90	17.31	1.08	0.80	1.00	46.46	17.34	1.08
89	0.78	21.33	1.0000	42.71	181.44	16.38	2.06	-0.76	1.00	58.89	16.26	2.21
90	0.87	18.10	1.0000	43.34	121.67	17.06	1.34	0.41	1.00	52.10	17.01	1.52
91	1.12	11.06	1.0000	48.42	39.81	17.64	0.71	1.33	1.00	44.30	17.79	0.75
92	1.21	19.05	1.0000	60.58	117.61	17.66	1.03	1.26	1.00	66.37	18.03	1.26
93	1.29	15.36	1.0000	61.36	80.07	17.83	0.83	1.55	1.00	62.74	18.11	0.90
94	0.98	24.04	1.0000	54.52	162.59	17.05	1.60	0.24	1.00	69.06	17.22	1.88
95	1.54	16.12	1.0000	75.93	83.71	18.11	0.81	1.91	1.00	82.36	18.50	0.90
96	1.50	19.23	1.0000	76.85	109.35	18.01	0.97	1.72	1.00	73.54	18.10	1.05
97	1.64	16.05	1.0000	81.82	82.94	18.17	0.85	2.00	1.00	73.17	18.72	0.81
98	1.28	31.14	1.0000	76.46	190.03	17.53	1.55	0.80	1.00	84.18	17.71	1.83
99	1.85	9.26	1.0000	88.34	54.14	18.47	0.54	2.56	1.00	94.70	19.11	0.50
100	1.84	20.57	1.0000	98.79	121.73	18.42	0.93	2.33	1.00	105.63	18.86	1.11
101	1.89	8.46	1.0000	89.68	32.89	18.51	0.51	2.62	1.00	87.07	19.21	0.51
102	1.91	23.89	1.0000	106.37	115.16	18.43	1.07	2.22	1.00	104.11	18.97	1.09
103	2.05	8.31	1.0000	100.47	32.87	18.65	0.53	2.86	1.00	98.76	19.53	0.51
104	2.02	18.06	1.0000	107.69	71.01	18.57	0.91	2.55	1.00	100.89	19.25	0.97
105	2.09	14.82	1.0000	109.27	77.07	18.65	0.81	2.72	1.00	102.41	19.39	0.79
106	1.69	28.11	1.0000	96.99	161.39	18.21	1.20	1.87	1.00	107.48	18.61	1.62
107	2.05	8.03	1.0000	99.68	31.77	18.64	0.52	2.85	1.00	99.18	19.53	0.51

Tabella A.1 (e): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.7$; $\delta_r = 0.02$; $f_b = 0.0$. Esperimenti 87-107

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
1	0.00	40.83	0.0025	0.10	0.01	0.77	2.27	-16.57	0.12	0.26	1.09	3.14
2	0.00	61.60	0.0486	2.99	0.74	1.65	3.02	-16.76	0.46	2.20	1.29	5.27
3	0.00	69.18	0.0872	6.03	2.48	2.00	3.29	-16.85	0.46	1.96	1.37	5.57
4	0.00	37.21	0.0012	0.05	0.01	0.57	2.18	-16.54	0.08	0.11	0.90	2.13
5	0.00	58.59	0.0420	2.46	0.89	1.42	3.00	-16.65	0.24	1.27	1.47	3.58
6	0.00	65.88	0.0748	4.93	2.58	1.75	3.25	-16.68	0.22	2.13	1.63	4.34
7	0.00	28.94	0.0000	0.00	0.00	0.29	1.79	-16.53	0.00	0.00	0.17	1.62
8	0.00	48.50	0.0165	0.80	0.48	0.90	2.73	-16.61	0.13	0.89	0.91	3.15
9	0.00	58.62	0.0486	2.85	2.14	1.32	3.09	-16.65	0.19	1.40	1.11	3.57
10	0.00	42.55	0.0253	1.08	0.09	2.79	2.53	-14.57	0.12	0.64	2.91	2.59
11	0.00	62.75	0.1521	9.55	2.54	3.59	3.33	-14.89	0.32	3.29	3.70	4.12
12	0.00	66.81	0.1858	12.42	4.44	3.77	3.48	-15.13	0.22	6.84	3.67	5.19
13	0.00	37.92	0.0129	0.49	0.07	2.60	2.36	-14.56	0.07	0.27	2.53	2.18
14	0.00	54.76	0.1047	5.73	1.70	3.13	3.15	-14.84	0.34	3.95	3.14	3.94
15	0.00	62.34	0.1541	9.61	3.10	3.53	3.36	-14.91	0.39	5.59	3.38	4.63
16	0.00	27.01	0.0004	0.01	0.01	2.28	1.79	-14.53	0.02	0.03	2.22	1.60
17	0.00	45.93	0.0542	2.49	1.27	2.73	2.86	-14.76	0.29	2.30	2.66	3.21
18	0.00	57.06	0.1278	7.29	4.43	3.17	3.29	-14.83	0.37	4.71	3.04	4.14

Tabella A.2 (a): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 1-18

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
19	0.00	41.45	0.0619	2.57	0.16	4.70	2.51	-12.63	NM	2.06	5.18	2.67
20	0.00	59.84	0.2585	15.47	4.34	5.28	3.42	-13.19	NM	10.40	5.61	4.34
21	0.00	67.06	0.3196	21.43	9.74	5.62	3.61	-13.34	NM	13.19	5.84	5.34
22	0.00	33.58	0.0191	0.64	0.07	4.44	2.15	-12.58	NM	0.65	5.02	2.05
23	0.00	54.47	0.2274	12.38	4.70	4.89	3.38	-13.29	NM	8.57	5.10	3.97
24	0.00	64.47	0.3118	20.10	14.41	5.39	3.65	-13.17	NM	11.08	5.44	4.85
25	0.00	24.90	0.0011	0.03	0.03	4.21	1.66	-12.53	NM	0.02	4.33	1.53
26	0.00	48.14	0.1489	7.17	3.20	4.72	3.03	-12.90	0.85	5.77	4.70	3.24
27	0.00	53.03	0.2177	11.54	11.35	4.80	3.36	-13.14	0.81	6.98	4.69	3.88
28	0.00	43.32	0.1825	7.90	0.79	6.70	2.67	-10.74	0.26	3.16	6.82	2.42
29	0.00	62.63	0.4277	26.79	12.39	7.34	3.53	-11.24	0.74	18.75	7.90	4.34
30	0.00	71.14	0.4820	34.29	23.17	7.74	3.64	-11.29	0.66	25.40	8.37	5.34
31	0.00	36.60	0.0926	3.39	0.39	6.50	2.30	-10.61	0.17	1.23	6.54	2.06
32	0.00	56.85	0.3793	21.56	8.96	7.08	3.39	-11.10	0.69	15.17	7.58	4.03
33	0.00	64.76	0.4529	29.33	26.10	7.34	3.65	-11.24	0.67	17.06	7.72	4.89
34	0.00	24.36	0.0066	0.16	0.07	6.17	1.63	-10.56	0.07	0.29	6.44	1.63
35	0.00	41.83	0.2155	9.01	5.29	6.32	2.91	-11.20	0.50	7.13	6.46	3.35
36	0.00	52.04	0.3403	17.71	13.93	6.79	3.32	-11.14	0.51	11.17	6.97	4.08

Tabella A.2 (b): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 19 -36

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
37	0.00	38.59	0.2873	11.09	1.78	8.45	2.56	-8.92	0.45	5.85	8.94	2.56
38	0.00	62.83	0.5789	36.37	22.49	9.36	3.43	-9.13	0.82	29.78	10.28	4.38
39	0.00	70.78	0.6318	44.72	52.31	9.55	3.64	-9.31	0.85	36.76	10.22	5.19
40	0.00	31.50	0.1486	4.68	0.85	8.23	2.12	-8.78	0.27	2.62	8.54	2.05
41	0.00	51.82	0.4977	25.79	14.09	8.85	3.25	-9.15	0.65	21.05	9.60	3.99
42	0.00	62.19	0.5806	36.11	30.81	9.27	3.48	-9.14	0.68	28.42	9.56	4.47
43	0.00	21.86	0.0174	0.38	0.18	8.10	1.48	-8.57	0.09	0.51	8.41	1.42
44	0.00	41.02	0.3608	14.80	9.56	8.38	2.86	-9.14	0.54	9.74	8.40	3.12
45	0.00	50.32	0.4804	24.18	27.55	8.81	3.19	-9.04	0.63	14.12	8.82	3.69
46	0.00	34.67	0.4446	15.41	4.40	10.36	2.42	-6.94	0.54	9.40	10.84	2.35
47	0.00	61.62	0.7310	45.04	48.50	11.26	3.33	-7.08	0.78	36.60	11.51	3.80
48	0.00	63.81	0.7417	47.33	45.70	11.34	3.36	-7.22	0.93	48.71	11.48	4.61
49	0.00	26.37	0.2443	6.44	1.85	9.97	1.95	-6.96	0.30	3.72	10.22	1.86
50	0.00	50.79	0.6649	33.77	31.18	10.87	3.13	-7.08	0.79	26.32	11.13	3.45
51	0.00	61.02	0.7322	44.68	72.55	11.17	3.40	-7.15	0.82	34.63	11.17	4.31
52	0.00	20.74	0.0739	1.53	0.52	10.04	1.42	-6.61	0.16	1.09	10.22	1.41
53	0.00	37.94	0.5148	19.53	17.57	10.42	2.65	-6.98	0.56	12.39	10.52	2.85
54	0.00	45.05	0.6118	27.56	40.62	10.67	2.95	-7.01	0.60	17.46	10.61	3.46
55	0.00	18.31	0.2479	4.54	2.49	11.86	1.40	-4.79	0.36	3.32	12.09	1.46
56	0.00	33.24	0.6867	22.83	33.71	12.40	2.38	-4.84	0.69	16.42	12.48	2.60
57	0.00	38.58	0.7549	29.12	53.59	12.47	2.71	-5.04	0.74	23.53	12.47	3.17
58	0.00	24.64	0.5009	12.34	6.63	12.07	1.90	-4.86	0.58	7.81	12.38	1.91
59	0.00	45.67	0.8094	36.96	60.87	12.65	2.99	-5.17	0.80	34.80	12.66	3.21
60	0.00	54.42	0.8519	46.36	84.72	12.97	3.14	-5.09	0.81	41.10	12.74	3.67
61	0.00	30.59	0.6471	19.80	11.35	12.27	2.28	-4.96	0.64	13.33	12.65	2.34

Tabella A.2 (c): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 37 – 61

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
62	0.00	12.64	0.5052	6.39	13.90	13.50	1.30	-3.11	0.54	6.10	13.52	1.40
63	0.00	25.47	0.8467	21.57	50.60	14.14	2.07	-2.90	0.81	24.02	14.29	2.46
64	0.00	29.55	0.8833	26.10	72.97	14.24	2.30	-2.96	0.89	28.91	14.16	2.84
65	0.00	20.42	0.7700	15.72	26.67	13.97	1.77	-2.89	0.72	12.86	14.15	1.88
66	0.00	37.38	0.9270	34.65	88.83	14.54	2.55	-2.89	0.90	40.03	14.48	2.89
67	0.00	23.09	0.8178	18.88	22.66	14.14	1.88	-2.81	0.79	21.56	14.49	2.10
68	0.00	8.38	0.7860	6.58	23.59	14.92	1.16	-1.66	0.77	10.00	14.99	1.26
69	0.05	19.87	0.9550	19.37	88.88	15.31	2.02	-1.69	0.88	33.46	15.06	2.04
70	0.00	14.34	0.9115	13.07	50.76	15.13	1.62	-1.64	0.81	18.50	15.12	1.53
71	0.42	30.32	0.9901	38.62	131.45	15.87	2.35	-1.44	0.96	57.44	15.53	2.42
72	0.18	22.86	0.9748	24.66	77.57	15.61	2.04	-1.44	0.88	33.51	15.60	1.79
73	0.36	6.59	0.9942	13.22	33.33	16.31	1.02	-0.25	0.98	20.35	16.11	1.08
74	0.63	15.24	0.9983	30.81	94.73	16.34	1.63	-0.48	1.00	43.87	15.99	1.89
75	0.71	21.13	1.0000	39.81	122.70	16.59	1.72	-0.36	1.00	51.40	16.07	2.15
76	0.56	12.45	0.9993	25.62	63.00	16.43	1.32	-0.22	0.98	33.82	16.31	1.41
77	0.68	17.20	0.9997	34.66	91.32	16.45	1.71	-0.48	0.93	42.56	16.09	1.60
78	0.88	26.92	1.0000	52.61	129.37	16.77	1.91	-0.34	0.97	71.64	16.03	2.04
79	0.56	13.43	0.9841	26.25	152.48	15.80	2.05	-1.21	1.00	33.13	15.57	2.05
80	0.56	13.15	0.9959	26.21	105.56	16.24	1.62	-0.54	1.00	27.15	16.04	1.46
81	0.63	16.16	0.9828	31.47	185.16	15.59	2.53	-1.79	1.00	26.27	15.61	2.80
82	0.57	10.19	1.0000	23.49	64.82	16.75	1.06	0.24	1.00	24.20	16.69	1.02
83	0.61	15.14	0.9970	30.19	129.44	16.26	1.76	-0.60	1.00	40.32	16.07	1.78
84	0.62	13.45	1.0000	28.77	90.43	16.61	1.37	-0.03	1.00	33.08	16.55	1.32
85	0.70	19.07	0.9894	37.28	206.96	15.78	2.58	-1.68	1.00	48.79	15.44	2.60
86	0.69	10.19	1.0000	28.05	58.57	17.08	0.92	0.61	1.00	29.61	17.20	0.86

Tabella A.2 (d): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 62 - 86

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_m (cm)
87	0.99	10.47	1.0000	41.28	55.25	17.56	0.76	1.22	1.00	42.66	17.68	0.75
88	0.93	16.29	1.0000	44.29	90.88	17.29	1.12	0.80	1.00	46.46	17.34	1.08
89	0.81	22.67	0.9994	45.49	181.46	16.39	2.13	-0.76	1.00	58.89	16.26	2.21
90	0.88	19.03	1.0000	44.69	121.63	17.04	1.39	0.41	1.00	52.10	17.01	1.52
91	1.06	11.09	1.0000	45.47	39.83	17.64	0.75	1.33	1.00	44.30	17.79	0.75
92	1.25	21.42	1.0000	65.01	117.53	17.66	1.12	1.26	1.00	66.37	18.03	1.26
93	1.34	17.23	1.0000	66.09	80.01	17.84	0.93	1.55	1.00	62.74	18.11	0.90
94	1.01	25.37	1.0000	57.37	162.53	17.05	1.66	0.24	1.00	69.06	17.22	1.88
95	1.53	17.20	1.0000	76.60	83.71	18.10	0.85	1.91	1.00	82.36	18.50	0.90
96	1.50	20.49	1.0000	78.12	109.34	17.99	1.02	1.72	1.00	73.54	18.10	1.05
97	1.57	16.49	1.0000	78.19	82.97	18.15	0.82	2.00	1.00	73.17	18.72	0.81
98	1.28	30.71	1.0000	75.90	190.04	17.51	1.58	0.80	1.00	84.18	17.71	1.83
99	1.84	9.89	1.0000	87.78	54.13	18.46	0.56	2.56	1.00	94.70	19.11	0.50
100	1.91	22.87	1.0000	105.34	121.62	18.44	1.04	2.33	1.00	105.63	18.86	1.11
101	1.87	9.02	1.0000	89.15	32.88	18.49	0.53	2.62	1.00	87.07	19.21	0.51
102	1.89	25.46	1.0000	107.00	115.13	18.41	1.12	2.22	1.00	104.11	18.97	1.09
103	2.04	8.85	1.0000	99.95	32.87	18.64	0.54	2.86	1.00	98.76	19.53	0.51
104	2.00	19.31	1.0000	108.08	71.00	18.55	0.94	2.55	1.00	100.89	19.25	0.97
105	2.07	15.87	1.0000	109.31	77.07	18.63	0.84	2.72	1.00	102.41	19.39	0.79
106	1.76	31.55	1.0000	104.76	161.24	18.21	1.32	1.87	1.00	107.48	18.61	1.62
107	2.03	8.54	1.0000	99.19	31.77	18.63	0.53	2.85	1.00	99.18	19.53	0.51

Tabella A.2 (e): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 87 - 107

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
1	0.00	40.77	0.0130	0.53	0.01	1.64	2.53	-16.57	0.12	0.26	1.09	3.14
2	0.00	60.63	0.0976	5.91	0.74	2.75	3.19	-16.76	0.46	2.20	1.29	5.27
3	0.00	67.92	0.1357	9.21	2.48	3.11	3.36	-16.85	0.46	1.96	1.37	5.57
4	0.00	37.18	0.0081	0.30	0.01	1.40	2.44	-16.54	0.08	0.11	0.90	2.13
5	0.00	57.84	0.0889	5.14	0.89	2.51	3.19	-16.65	0.24	1.27	1.47	3.58
6	0.00	64.76	0.1252	8.11	2.58	2.87	3.35	-16.68	0.22	2.13	1.63	4.34
7	0.00	28.94	0.0008	0.02	0.00	0.97	2.07	-16.53	0.00	0.00	0.17	1.62
8	0.00	48.28	0.0468	2.26	0.48	1.92	2.95	-16.61	0.13	0.89	0.91	3.15
9	0.00	57.93	0.0975	5.65	2.14	2.43	3.27	-16.65	0.19	1.40	1.11	3.57
10	0.00	42.29	0.0683	2.89	0.09	3.75	2.76	-14.57	0.12	0.64	2.91	2.59
11	0.00	61.66	0.1974	12.17	2.54	4.65	3.30	-14.89	0.32	3.29	3.70	4.12
12	0.00	65.90	0.2186	14.40	4.44	4.82	3.36	-15.13	0.22	6.84	3.67	5.19
13	0.00	37.81	0.0436	1.65	0.07	3.50	2.60	-14.56	0.07	0.27	2.53	2.18
14	0.00	53.86	0.1644	8.85	1.70	4.21	3.24	-14.84	0.34	3.95	3.14	3.94
15	0.00	61.30	0.1995	12.23	3.10	4.59	3.32	-14.91	0.39	5.59	3.38	4.63
16	0.00	27.01	0.0048	0.13	0.01	2.96	2.08	-14.53	0.02	0.03	2.22	1.60
17	0.00	45.48	0.1122	5.10	1.26	3.78	3.05	-14.76	0.29	2.30	2.66	3.21
18	0.00	56.12	0.1830	10.27	4.43	4.26	3.33	-14.83	0.37	4.71	3.04	4.14

Tabella A.3 (a): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.01$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 1-18

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
19	0.00	40.80	0.1314	5.36	0.16	5.64	2.70	-12.63	NM	2.06	5.18	2.67
20	0.00	59.16	0.2865	16.95	4.34	6.28	3.24	-13.19	NM	10.40	5.61	4.34
21	0.00	66.86	0.3252	21.74	9.74	6.58	3.32	-13.34	NM	13.19	5.84	5.34
22	0.00	33.41	0.0630	2.10	0.07	5.25	2.40	-12.58	NM	0.65	5.02	2.05
23	0.00	53.55	0.2685	14.38	4.70	5.92	3.27	-13.29	NM	8.57	5.10	3.97
24	0.00	64.06	0.3233	20.71	14.41	6.38	3.38	-13.17	NM	11.08	5.44	4.85
25	0.00	24.89	0.0112	0.28	0.03	4.84	1.95	-12.53	NM	0.02	4.33	1.53
26	0.00	47.09	0.2153	10.14	3.20	5.74	3.08	-12.90	0.85	5.77	4.70	3.24
27	0.00	52.09	0.2631	13.70	11.34	5.84	3.27	-13.14	0.81	6.98	4.69	3.88
28	0.00	42.03	0.2559	10.75	0.79	7.60	2.70	-10.74	0.26	3.16	6.82	2.42
29	0.00	62.72	0.4219	26.46	12.39	8.22	3.16	-11.24	0.74	18.75	7.90	4.34
30	0.00	71.84	0.4637	33.32	23.17	8.55	3.22	-11.29	0.66	25.40	8.37	5.34
31	0.00	35.64	0.1807	6.44	0.39	7.35	2.48	-10.61	0.17	1.23	6.54	2.06
32	0.00	56.82	0.3821	21.71	8.96	7.98	3.08	-11.10	0.69	15.17	7.58	4.03
33	0.00	65.19	0.4445	28.98	26.10	8.21	3.27	-11.24	0.67	17.06	7.72	4.89
34	0.00	24.30	0.0389	0.95	0.07	6.78	1.91	-10.56	0.07	0.29	6.44	1.63
35	0.00	40.62	0.2852	11.59	5.28	7.28	2.92	-11.20	0.50	7.13	6.46	3.35
36	0.00	51.40	0.3609	18.55	13.92	7.72	3.08	-11.14	0.51	11.17	6.97	4.08

Tabella A.3 (b): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.01$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 19 -36

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \bar{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \bar{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
37	0.00	37.35	0.3541	13.23	1.78	9.27	2.52	-8.92	0.45	5.85	8.94	2.56
38	0.00	63.11	0.5665	35.75	22.49	10.11	3.01	-9.13	0.82	29.78	10.28	4.38
39	0.00	71.49	0.6132	43.84	52.31	10.26	3.17	-9.31	0.85	36.76	10.22	5.19
40	0.00	30.25	0.2560	7.74	0.84	8.99	2.28	-8.78	0.27	2.62	8.54	2.05
41	0.00	51.91	0.4958	25.73	14.09	9.67	2.90	-9.15	0.65	21.05	9.60	3.99
42	0.00	62.49	0.5693	35.58	30.81	10.03	3.06	-9.14	0.68	28.42	9.56	4.47
43	0.00	21.69	0.0786	1.71	0.18	8.63	1.75	-8.57	0.09	0.51	8.41	1.42
44	0.00	40.09	0.4054	16.25	9.55	9.24	2.71	-9.14	0.54	9.74	8.40	3.12
45	0.00	49.95	0.4897	24.46	27.55	9.64	2.88	-9.04	0.63	14.12	8.82	3.69
46	0.00	33.76	0.4949	16.71	4.40	11.08	2.30	-6.94	0.54	9.40	10.84	2.35
47	0.00	62.09	0.7242	44.97	48.50	11.92	2.87	-7.08	0.78	36.60	11.51	3.80
48	0.00	64.23	0.7353	47.23	45.70	11.99	2.89	-7.22	0.93	48.71	11.48	4.61
49	0.00	24.89	0.3664	9.12	1.84	10.65	2.08	-6.96	0.30	3.72	10.22	1.86
50	0.00	50.87	0.6638	33.77	31.19	11.58	2.74	-7.08	0.79	26.32	11.13	3.45
51	0.00	61.32	0.7206	44.19	72.56	11.81	2.91	-7.15	0.82	34.63	11.17	4.31
52	0.00	20.00	0.1951	3.90	0.52	10.55	1.65	-6.61	0.16	1.09	10.22	1.41
53	0.00	37.28	0.5473	20.40	17.56	11.17	2.44	-6.98	0.56	12.39	10.52	2.85
54	0.00	45.05	0.6200	27.93	40.62	11.41	2.62	-7.01	0.60	17.46	10.61	3.46
55	0.00	16.85	0.4071	6.86	2.49	12.33	1.56	-4.79	0.36	3.32	12.09	1.46
56	0.00	32.64	0.7111	23.21	33.70	13.02	2.13	-4.84	0.69	16.42	12.48	2.60
57	0.00	38.45	0.7593	29.19	53.59	13.09	2.32	-5.04	0.74	23.53	12.47	3.17
58	0.00	23.63	0.5847	13.82	6.63	12.65	1.87	-4.86	0.58	7.81	12.38	1.91
59	0.00	45.69	0.8173	37.35	60.87	13.28	2.56	-5.17	0.80	34.80	12.66	3.21
60	0.00	54.46	0.8529	46.45	84.72	13.55	2.65	-5.09	0.81	41.10	12.74	3.67
61	0.00	30.01	0.6802	20.41	11.35	12.89	2.07	-4.96	0.64	13.33	12.65	2.34

Tabella A.3 (c): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.01$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 37 - 61

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
62	0.00	11.52	0.6619	7.62	13.89	13.92	1.44	-3.11	0.54	6.10	13.52	1.40
63	0.00	25.13	0.8810	22.14	50.60	14.67	1.85	-2.90	0.81	24.02	14.29	2.46
64	0.00	29.25	0.9126	26.69	72.96	14.80	2.02	-2.96	0.89	28.91	14.16	2.84
65	0.00	19.88	0.8295	16.49	26.66	14.47	1.69	-2.89	0.72	12.86	14.15	1.88
66	0.00	37.06	0.9458	35.05	88.81	15.09	2.16	-2.89	0.90	40.03	14.48	2.89
67	0.00	22.79	0.8558	19.51	22.65	14.63	1.70	-2.81	0.79	21.56	14.49	2.10
68	0.00	7.95	0.8890	7.07	23.59	15.27	1.29	-1.66	0.77	10.00	14.99	1.26
69	0.05	19.69	0.9842	19.74	88.87	15.86	1.87	-1.69	0.88	33.46	15.06	2.04
70	0.00	13.97	0.9609	13.43	50.75	15.62	1.62	-1.64	0.81	18.50	15.12	1.53
71	0.42	30.29	0.9989	38.82	131.45	16.35	1.97	-1.44	0.96	57.44	15.53	2.42
72	0.18	22.68	0.9934	24.82	77.57	16.11	1.81	-1.44	0.88	33.51	15.60	1.79
73	0.36	6.59	1.0000	13.25	33.33	16.54	0.91	-0.25	0.98	20.35	16.11	1.08
74	0.63	15.24	1.0000	30.83	94.73	16.71	1.43	-0.48	1.00	43.87	15.99	1.89
75	0.71	21.13	1.0000	39.81	122.70	16.83	1.44	-0.36	1.00	51.40	16.07	2.15
76	0.56	12.45	1.0000	25.63	63.00	16.74	1.18	-0.22	0.98	33.82	16.31	1.41
77	0.68	17.20	1.0000	34.66	91.32	16.78	1.49	-0.48	0.93	42.56	16.09	1.60
78	0.88	26.92	1.0000	52.61	129.37	17.01	1.56	-0.34	0.97	71.64	16.03	2.04
79	0.56	13.39	0.9977	26.31	152.48	16.29	1.79	-1.21	1.00	33.13	15.57	2.05
80	0.56	13.13	1.0000	26.21	105.56	16.55	1.34	-0.54	1.00	27.15	16.04	1.46
81	0.60	17.34	0.9958	31.71	185.14	16.14	2.14	-1.79	1.00	26.27	15.61	2.80
82	0.57	10.19	1.0000	23.49	64.82	16.88	0.83	0.24	1.00	24.20	16.69	1.02
83	0.61	15.13	1.0000	30.21	129.44	16.61	1.47	-0.60	1.00	40.32	16.07	1.78
84	0.62	13.45	1.0000	28.77	90.43	16.83	1.10	-0.03	1.00	33.08	16.55	1.32
85	0.71	19.16	0.9997	37.71	206.96	16.41	2.32	-1.68	1.00	48.79	15.44	2.60
86	0.69	10.19	1.0000	28.05	58.57	17.13	0.70	0.61	1.00	29.61	17.20	0.86

Tabella A.3 (d): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.01$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 62 - 86

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_m (cm)
87	0.99	10.47	1.0000	41.28	55.25	17.53	0.60	1.22	1.00	42.66	17.68	0.75
88	0.93	16.29	1.0000	44.29	90.88	17.38	0.88	0.80	1.00	46.46	17.34	1.08
89	0.81	22.67	1.0000	45.50	181.46	16.78	1.75	-0.76	1.00	58.89	16.26	2.21
90	0.88	19.03	1.0000	44.69	121.63	17.22	1.11	0.41	1.00	52.10	17.01	1.52
91	1.06	11.09	1.0000	45.47	39.83	17.61	0.61	1.33	1.00	44.30	17.79	0.75
92	1.25	21.42	1.0000	65.01	117.53	17.75	0.96	1.26	1.00	66.37	18.03	1.26
93	1.34	17.23	1.0000	66.09	80.01	17.87	0.84	1.55	1.00	62.74	18.11	0.90
94	1.01	25.37	1.0000	57.37	162.53	17.31	1.35	0.24	1.00	69.06	17.22	1.88
95	1.53	17.20	1.0000	76.60	83.71	18.10	0.83	1.91	1.00	82.36	18.50	0.90
96	1.50	20.49	1.0000	78.12	109.34	18.03	0.94	1.72	1.00	73.54	18.10	1.05
97	1.57	16.49	1.0000	78.19	82.97	18.11	0.81	2.00	1.00	73.17	18.72	0.81
98	1.28	30.71	1.0000	75.90	190.04	17.72	1.30	0.80	1.00	84.18	17.71	1.83
99	1.84	9.89	1.0000	87.78	54.13	18.38	0.66	2.56	1.00	94.70	19.11	0.50
100	1.91	22.87	1.0000	105.34	121.62	18.44	1.04	2.33	1.00	105.63	18.86	1.11
101	1.87	9.02	1.0000	89.15	32.88	18.42	0.63	2.62	1.00	87.07	19.21	0.51
102	1.89	25.46	1.0000	107.00	115.13	18.42	1.10	2.22	1.00	104.11	18.97	1.09
103	2.04	8.85	1.0000	99.95	32.87	18.58	0.64	2.86	1.00	98.76	19.53	0.51
104	2.00	19.31	1.0000	108.08	71.00	18.53	0.97	2.55	1.00	100.89	19.25	0.97
105	2.07	15.87	1.0000	109.31	77.07	18.60	0.88	2.72	1.00	102.41	19.39	0.79
106	1.76	31.55	1.0000	104.76	161.24	18.29	1.21	1.87	1.00	107.48	18.61	1.62
107	2.03	8.54	1.0000	99.19	31.77	18.58	0.63	2.85	1.00	99.18	19.53	0.51

Tabella A.3 (e): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.01$ m; $f_b = 0$. Esperimenti 87 - 107

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
1	0.00	37.20	0.0022	0.08	0.01	0.81	2.25	-16.57	0.12	0.26	1.09	3.14
2	0.00	56.84	0.0442	2.51	0.74	1.72	2.96	-16.76	0.46	2.20	1.29	5.27
3	0.00	64.31	0.0804	5.17	2.47	2.07	3.22	-16.85	0.46	1.96	1.37	5.57
4	0.00	33.79	0.0011	0.04	0.01	0.61	2.15	-16.54	0.08	0.11	0.90	2.13
5	0.00	53.78	0.0380	2.04	0.89	1.48	2.94	-16.65	0.24	1.27	1.47	3.58
6	0.00	60.88	0.0686	4.18	2.58	1.82	3.18	-16.68	0.22	2.13	1.63	4.34
7	0.00	26.23	0.0000	0.00	0.00	0.32	1.78	-16.53	0.00	0.00	0.17	1.62
8	0.00	44.13	0.0146	0.65	0.48	0.95	2.68	-16.61	0.13	0.89	0.91	3.15
9	0.00	53.68	0.0441	2.37	2.14	1.39	3.03	-16.65	0.19	1.40	1.11	3.57
10	0.00	38.58	0.0231	0.89	0.09	2.84	2.49	-14.57	0.12	0.64	2.91	2.59
11	0.00	58.11	0.1439	8.36	2.54	3.66	3.27	-14.89	0.32	3.29	3.70	4.12
12	0.00	62.26	0.1774	11.04	4.44	3.84	3.41	-15.13	0.22	6.84	3.67	5.19
13	0.00	34.28	0.0117	0.40	0.07	2.64	2.33	-14.56	0.07	0.27	2.53	2.18
14	0.00	50.05	0.0978	4.89	1.70	3.19	3.09	-14.84	0.34	3.95	3.14	3.94
15	0.00	57.65	0.1457	8.40	3.10	3.60	3.29	-14.91	0.39	5.59	3.38	4.63
16	0.00	24.36	0.0004	0.01	0.01	2.31	1.79	-14.53	0.02	0.03	2.22	1.60
17	0.00	41.57	0.0498	2.07	1.27	2.79	2.81	-14.76	0.29	2.30	2.66	3.21
18	0.00	52.27	0.1201	6.28	4.43	3.24	3.23	-14.83	0.37	4.71	3.04	4.14

Tabella A.4 (a): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0.01$. Esperimenti 1-18

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta}_r$ (cm)	σ_m (cm)
19	0.00	37.65	0.0582	2.19	0.16	4.75	2.47	-12.63	NM	2.06	5.18	2.67
20	0.00	55.86	0.2507	14.00	4.33	5.35	3.36	-13.19	NM	10.40	5.61	4.34
21	0.00	63.29	0.3144	19.90	9.73	5.69	3.56	-13.34	NM	13.19	5.84	5.34
22	0.00	30.33	0.0180	0.55	0.07	4.47	2.13	-12.58	NM	0.65	5.02	2.05
23	0.00	50.27	0.2187	11.00	4.70	4.96	3.32	-13.29	NM	8.57	5.10	3.97
24	0.00	60.51	0.3048	18.44	14.42	5.47	3.59	-13.17	NM	11.08	5.44	4.85
25	0.00	22.45	0.0011	0.02	0.03	4.24	1.66	-12.53	NM	0.02	4.33	1.53
26	0.00	43.96	0.1419	6.23	3.21	4.78	2.97	-12.90	0.85	5.77	4.70	3.24
27	0.00	48.84	0.2097	10.24	11.36	4.87	3.30	-13.14	0.81	6.98	4.69	3.88
28	0.00	39.89	0.1767	7.05	0.79	6.75	2.63	-10.74	0.26	3.16	6.82	2.42
29	0.00	59.54	0.4241	25.25	12.38	7.41	3.48	-11.24	0.74	18.75	7.90	4.34
30	0.00	68.27	0.4822	32.92	23.17	7.82	3.61	-11.29	0.66	25.40	8.37	5.34
31	0.00	33.30	0.0897	2.99	0.39	6.54	2.27	-10.61	0.17	1.23	6.54	2.06
32	0.00	53.71	0.3743	20.10	8.96	7.15	3.35	-11.10	0.69	15.17	7.58	4.03
33	0.00	61.71	0.4503	27.79	26.10	7.42	3.61	-11.24	0.67	17.06	7.72	4.89
34	0.00	21.96	0.0067	0.15	0.07	6.20	1.63	-10.56	0.07	0.29	6.44	1.63
35	0.00	38.27	0.2088	7.99	5.30	6.37	2.87	-11.20	0.50	7.13	6.46	3.35
36	0.00	48.73	0.3338	16.27	13.93	6.85	3.27	-11.14	0.51	11.17	6.97	4.08

Tabella A.4 (b): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0.01$. Esperimenti 19 -36

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_m (cm)
37	0.00	35.96	0.2832	10.18	1.78	8.49	2.53	-8.92	0.45	5.85	8.94	2.56
38	0.00	60.36	0.5769	34.82	22.49	9.43	3.39	-9.13	0.82	29.78	10.28	4.38
39	0.00	68.17	0.6300	42.95	52.31	9.62	3.59	-9.31	0.85	36.76	10.22	5.19
40	0.00	28.73	0.1472	4.23	0.85	8.27	2.11	-8.78	0.27	2.62	8.54	2.05
41	0.00	49.43	0.4952	24.48	14.09	8.92	3.21	-9.15	0.65	21.05	9.60	3.99
42	0.00	59.71	0.5788	34.56	30.81	9.33	3.44	-9.14	0.68	28.42	9.56	4.47
43	0.00	19.72	0.0181	0.36	0.18	8.12	1.48	-8.57	0.09	0.51	8.41	1.42
44	0.00	38.45	0.3564	13.71	9.56	8.43	2.82	-9.14	0.54	9.74	8.40	3.12
45	0.00	47.91	0.4775	22.87	27.57	8.87	3.15	-9.04	0.63	14.12	8.82	3.69
46	0.00	32.94	0.4427	14.59	4.40	10.40	2.40	-6.94	0.54	9.40	10.84	2.35
47	0.00	59.86	0.7333	43.89	48.51	11.33	3.30	-7.08	0.78	36.60	11.51	3.80
48	0.00	62.00	0.7442	46.14	45.70	11.41	3.33	-7.22	0.93	48.71	11.48	4.61
49	0.00	24.23	0.2445	5.92	1.85	10.00	1.94	-6.96	0.30	3.72	10.22	1.86
50	0.00	48.95	0.6642	32.51	31.20	10.92	3.10	-7.08	0.79	26.32	11.13	3.45
51	0.00	59.29	0.7345	43.55	72.58	11.24	3.37	-7.15	0.82	34.63	11.17	4.31
52	0.00	18.78	0.0760	1.43	0.52	10.06	1.42	-6.61	0.16	1.09	10.22	1.41
53	0.00	36.30	0.5140	18.66	17.58	10.47	2.63	-6.98	0.56	12.39	10.52	2.85
54	0.00	43.29	0.6106	26.43	40.63	10.72	2.92	-7.01	0.60	17.46	10.61	3.46
55	0.00	16.86	0.2513	4.24	2.49	11.88	1.40	-4.79	0.36	3.32	12.09	1.46
56	0.00	32.03	0.6861	21.98	33.72	12.43	2.36	-4.84	0.69	16.42	12.48	2.60
57	0.00	37.30	0.7552	28.16	53.61	12.51	2.68	-5.04	0.74	23.53	12.47	3.17
58	0.00	23.50	0.5016	11.79	6.63	12.09	1.89	-4.86	0.58	7.81	12.38	1.91
59	0.00	44.25	0.8103	35.86	60.89	12.70	2.95	-5.17	0.80	34.80	12.66	3.21
60	0.00	52.80	0.8527	45.02	84.74	13.02	3.11	-5.09	0.81	41.10	12.74	3.67
61	0.00	29.41	0.6462	19.01	11.35	12.30	2.26	-4.96	0.64	13.33	12.65	2.34

Tabella A.4 (c): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0.01$. Esperimenti 37 - 61

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm^2/s)	P_o	q_o (cm^2/s)	q_o (empirica) (cm^2/s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm^2/s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_m (cm)
62	0.00	11.91	0.5086	6.06	13.90	13.52	1.30	-3.11	0.54	6.10	13.52	1.40
63	0.00	24.72	0.8477	20.95	50.61	14.16	2.06	-2.90	0.81	24.02	14.29	2.46
64	0.00	28.69	0.8844	25.38	72.98	14.27	2.28	-2.96	0.89	28.91	14.16	2.84
65	0.00	19.74	0.7710	15.22	26.67	13.99	1.76	-2.89	0.72	12.86	14.15	1.88
66	0.00	36.32	0.9282	33.71	88.84	14.58	2.53	-2.89	0.90	40.03	14.48	2.89
67	0.00	22.50	0.8193	18.44	22.66	14.17	1.87	-2.81	0.79	21.56	14.49	2.10
68	0.00	8.03	0.7882	6.33	23.60	14.93	1.16	-1.66	0.77	10.00	14.99	1.26
69	0.06	19.28	0.9560	18.92	88.88	15.33	2.00	-1.69	0.88	33.46	15.06	2.04
70	0.00	13.85	0.9129	12.64	50.76	15.15	1.62	-1.64	0.81	18.50	15.12	1.53
71	0.43	29.57	0.9908	38.25	131.47	15.90	2.33	-1.44	0.96	57.44	15.53	2.42
72	0.19	22.17	0.9756	24.17	77.58	15.63	2.03	-1.44	0.88	33.51	15.60	1.79
73	0.36	6.32	0.9943	12.95	33.33	16.31	1.02	-0.25	0.98	20.35	16.11	1.08
74	0.63	14.65	0.9985	30.34	94.74	16.36	1.61	-0.48	1.00	43.87	15.99	1.89
75	0.74	17.98	1.0000	37.82	122.73	16.61	1.70	-0.36	1.00	51.40	16.07	2.15
76	0.57	11.99	0.9995	25.63	63.00	16.44	1.31	-0.22	0.98	33.82	16.31	1.41
77	0.69	16.56	0.9999	34.58	91.33	16.47	1.70	-0.48	0.93	42.56	16.09	1.60
78	0.88	26.15	1.0000	52.08	129.38	16.79	1.89	-0.34	0.97	71.64	16.03	2.04
79	0.55	13.09	0.9847	25.83	152.49	15.82	2.03	-1.21	1.00	33.13	15.57	2.05
80	0.57	12.66	0.9961	25.99	105.56	16.25	1.60	-0.54	1.00	27.15	16.04	1.46
81	0.62	15.73	0.9835	30.94	185.17	15.62	2.49	-1.79	1.00	26.27	15.61	2.80
82	0.57	9.81	1.0000	23.15	64.83	16.76	1.05	0.24	1.00	24.20	16.69	1.02
83	0.62	14.57	0.9973	29.73	129.44	16.27	1.74	-0.60	1.00	40.32	16.07	1.78
84	0.63	12.95	1.0000	28.50	90.44	16.62	1.36	-0.03	1.00	33.08	16.55	1.32
85	0.70	18.72	0.9900	37.05	206.98	15.81	2.54	-1.68	1.00	48.79	15.44	2.60
86	0.68	9.81	1.0000	27.50	58.57	17.08	0.92	0.61	1.00	29.61	17.20	0.86

Tabella A.4 (d): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0.01$. Esperimenti 62 - 86

Esperimento	MODELLO NUMERICO							VALORI SPERIMENTALI				
	H_{SWL} (cm)	q_{SWL} (cm ² /s)	P_o	q_o (cm ² /s)	q_o (empirica) (cm ² /s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_r (cm)	H_1 (cm)	P_o	q_m (cm ² /s)	$S + \overline{\eta_r}$ (cm)	σ_m (cm)
87	0.99	10.11	1.0000	40.99	55.25	17.56	0.76	1.22	1.00	42.66	17.68	0.75
88	0.93	15.74	1.0000	43.92	90.89	17.29	1.11	0.80	1.00	46.46	17.34	1.08
89	0.81	21.77	0.9996	44.40	181.48	16.40	2.11	-0.76	1.00	58.89	16.26	2.21
90	0.87	20.43	1.0000	46.06	121.60	17.03	1.35	0.41	1.00	52.10	17.01	1.52
91	1.07	10.71	1.0000	45.17	39.83	17.64	0.75	1.33	1.00	44.30	17.79	0.75
92	1.21	19.46	1.0000	61.29	117.60	17.64	1.06	1.26	1.00	66.37	18.03	1.26
93	1.29	15.77	1.0000	61.61	80.06	17.81	0.86	1.55	1.00	62.74	18.11	0.90
94	1.01	26.94	1.0000	58.88	162.49	17.06	1.66	0.24	1.00	69.06	17.22	1.88
95	1.58	17.42	1.0000	79.90	83.67	18.11	0.90	1.91	1.00	82.36	18.50	0.90
96	1.44	18.85	1.0000	73.03	109.40	17.97	0.94	1.72	1.00	73.54	18.10	1.05
97	1.53	15.66	1.0000	74.91	82.99	18.13	0.78	2.00	1.00	73.17	18.72	0.81
98	1.30	31.89	1.0000	78.16	189.99	17.53	1.60	0.80	1.00	84.18	17.71	1.83
99	1.93	9.79	1.0000	93.46	54.08	18.48	0.64	2.56	1.00	94.70	19.11	0.50
100	1.90	22.19	1.0000	103.90	121.63	18.43	1.02	2.33	1.00	105.63	18.86	1.11
101	1.98	8.92	1.0000	96.05	32.85	18.53	0.62	2.62	1.00	87.07	19.21	0.51
102	1.82	23.49	1.0000	100.22	115.24	18.37	1.02	2.22	1.00	104.11	18.97	1.09
103	2.12	8.59	1.0000	105.59	32.83	18.68	0.62	2.86	1.00	98.76	19.53	0.51
104	1.91	17.91	1.0000	100.49	71.10	18.50	0.83	2.55	1.00	100.89	19.25	0.97
105	2.07	15.37	1.0000	108.37	77.08	18.63	0.82	2.72	1.00	102.41	19.39	0.79
106	1.75	30.63	1.0000	103.07	161.26	18.20	1.30	1.87	1.00	107.48	18.61	1.62
107	2.12	8.28	1.0000	104.92	31.73	18.67	0.61	2.85	1.00	99.18	19.53	0.51

Tabella A.4 (e): Risultato numerico e sperimentale per $\gamma = 0.8$; $\delta_r = 0.02$ m; $f_b = 0.01$. Esperimenti 87 - 107

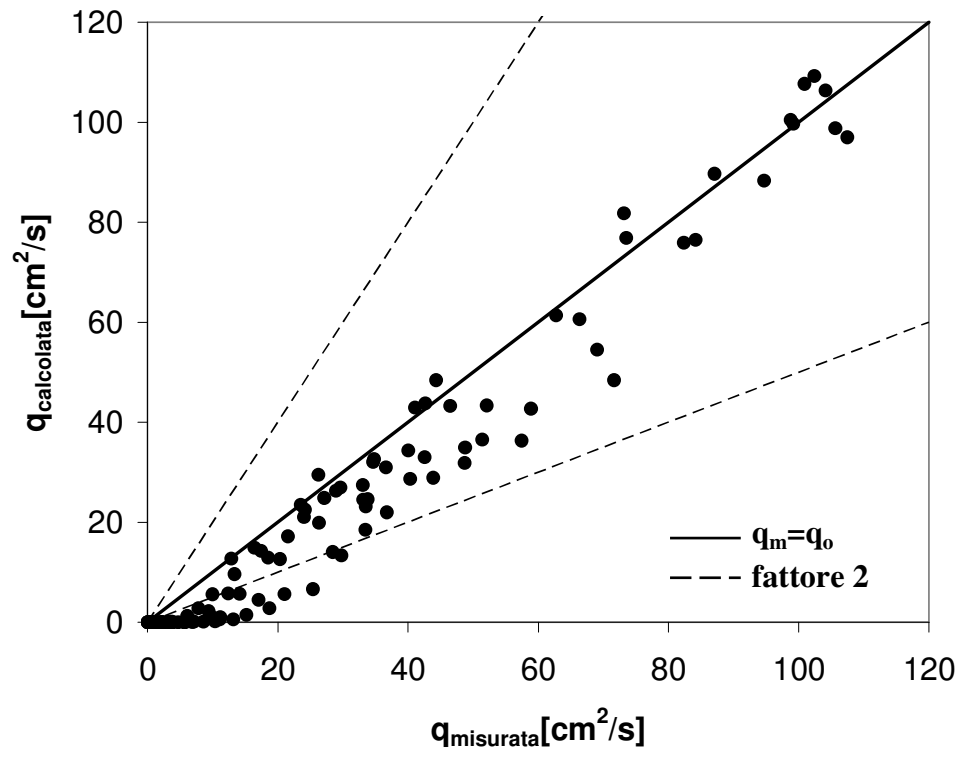


Figura A.1: $\gamma=0.7$; $\delta_r=0.02 \text{ m}$; $f_b=0.0$

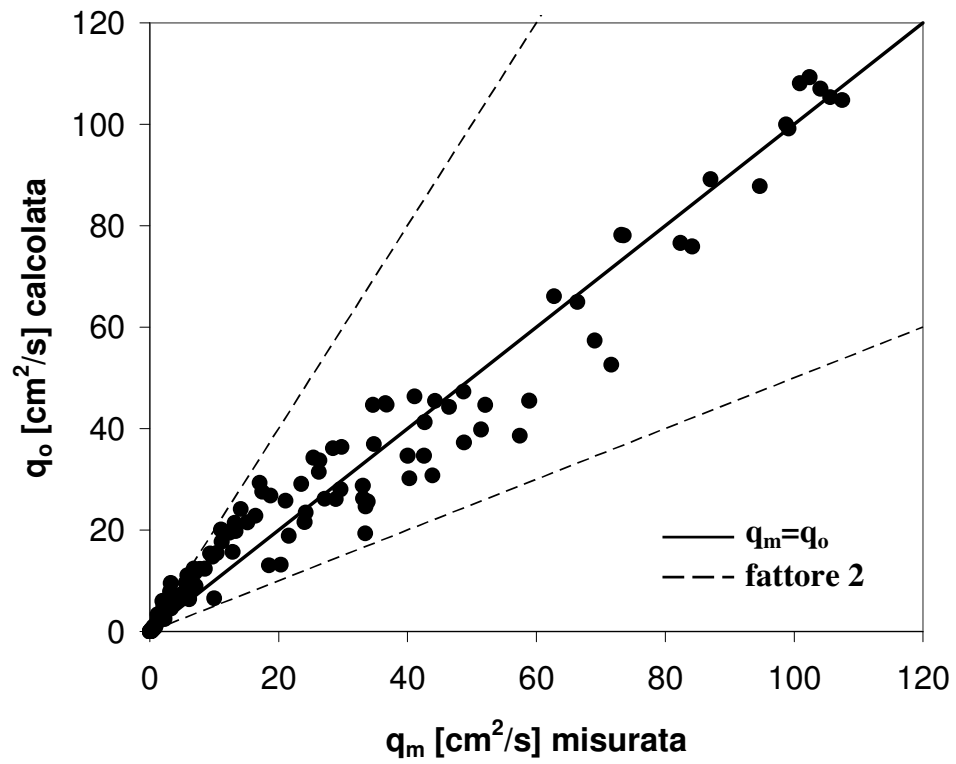


Figura A.2: $\gamma=0.8$; $\delta_r=0.02\text{ m}$; $f_b=0.0$

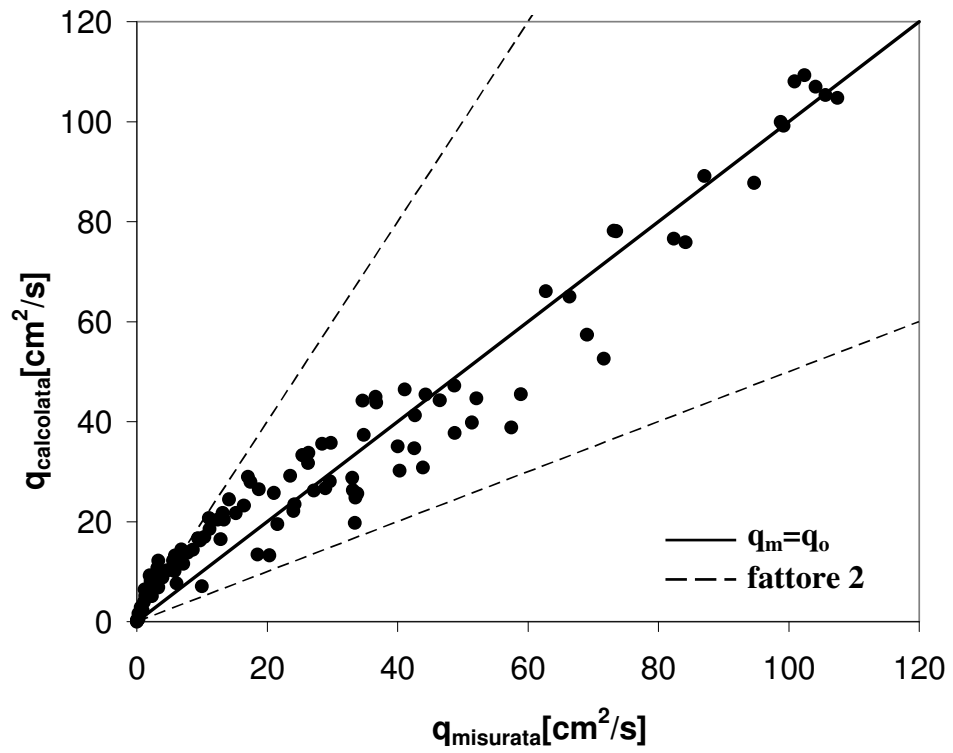


Figura A.3: $\gamma=0.8$; $\delta_r=0.01 \text{ m}$; $f_b=0.0$

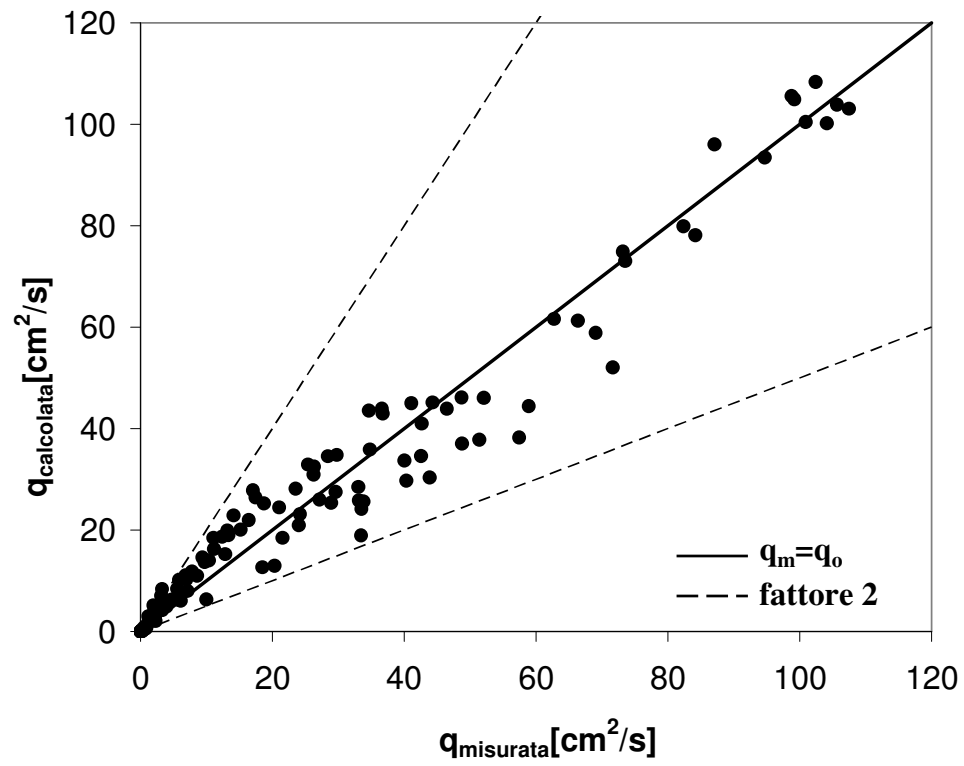


Figura A.4: $\gamma=0.8$; $\delta_r=0.02 \text{ m}$; $f_b=0.01$

APPENDICE B

VARIAZIONI *CROSS-SHORE* CALCOLATE E MISURATE

B. APPENDICE B: VARIAZIONI *CROSS-SHORE*

CALCOLATE E MISURATE

Le Figure B.1 - B.107 mostrano la variazione *cross-shore* dei valori calcolati numericamente e misurati sperimentalmente, della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U, per i 107 esperimenti.

Le figure in appendice sono simili alle Figure 5.6 - 5.9 mostrate nel Capitolo 3.

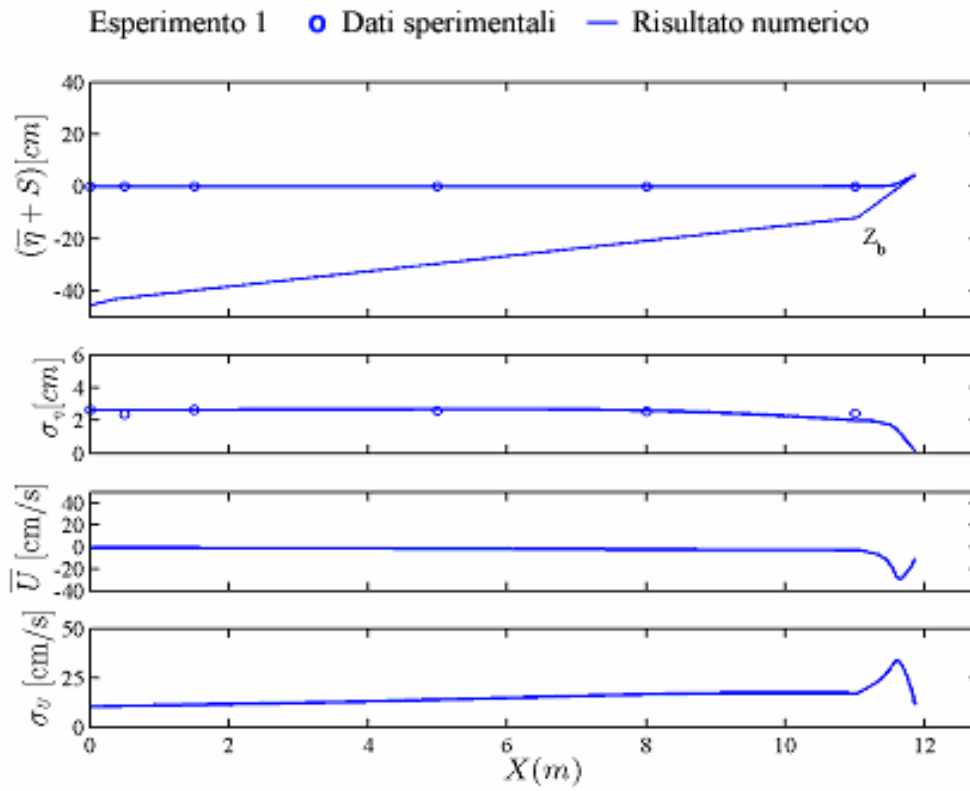


Figura B.1: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 1

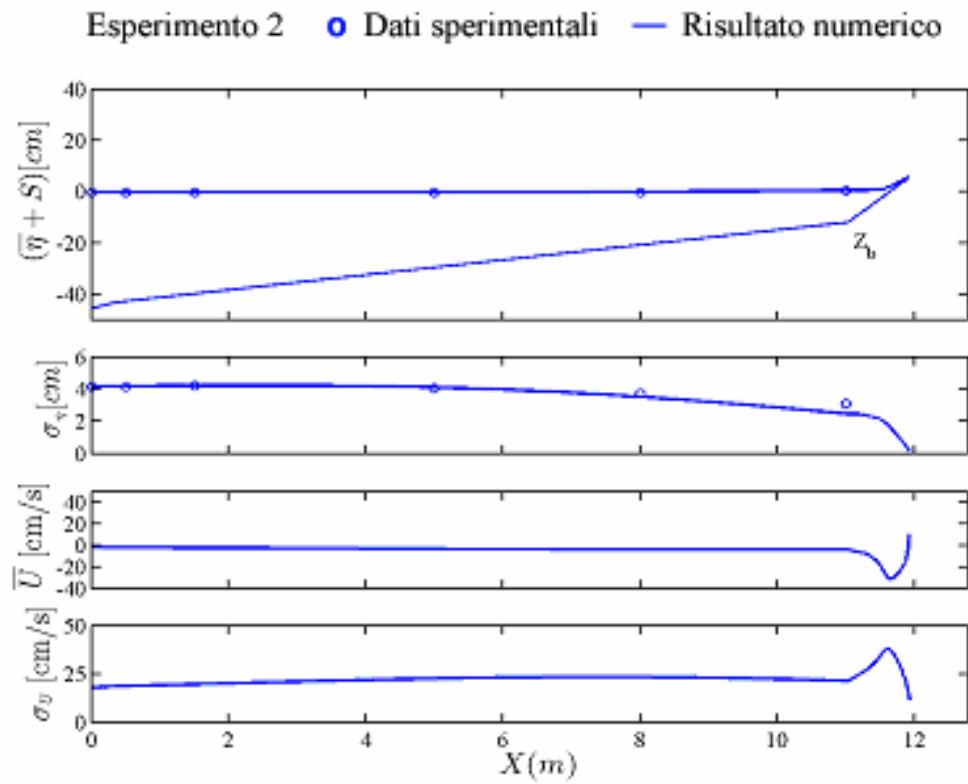


Figura B.2: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 2

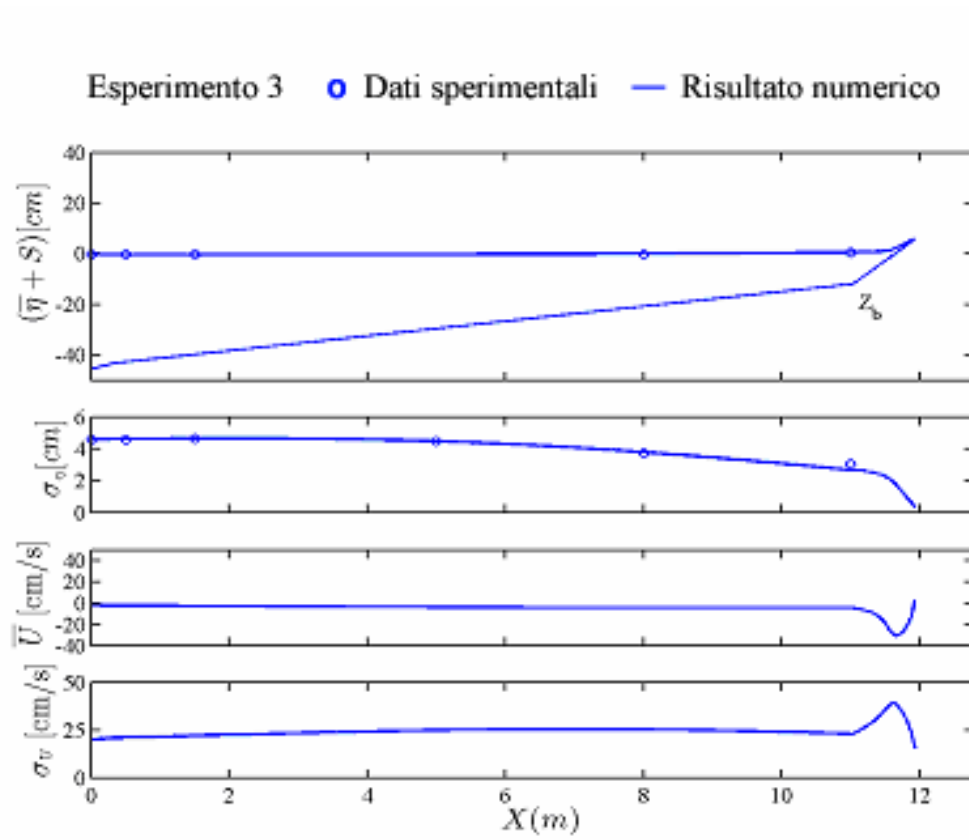


Figura B.3: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 3

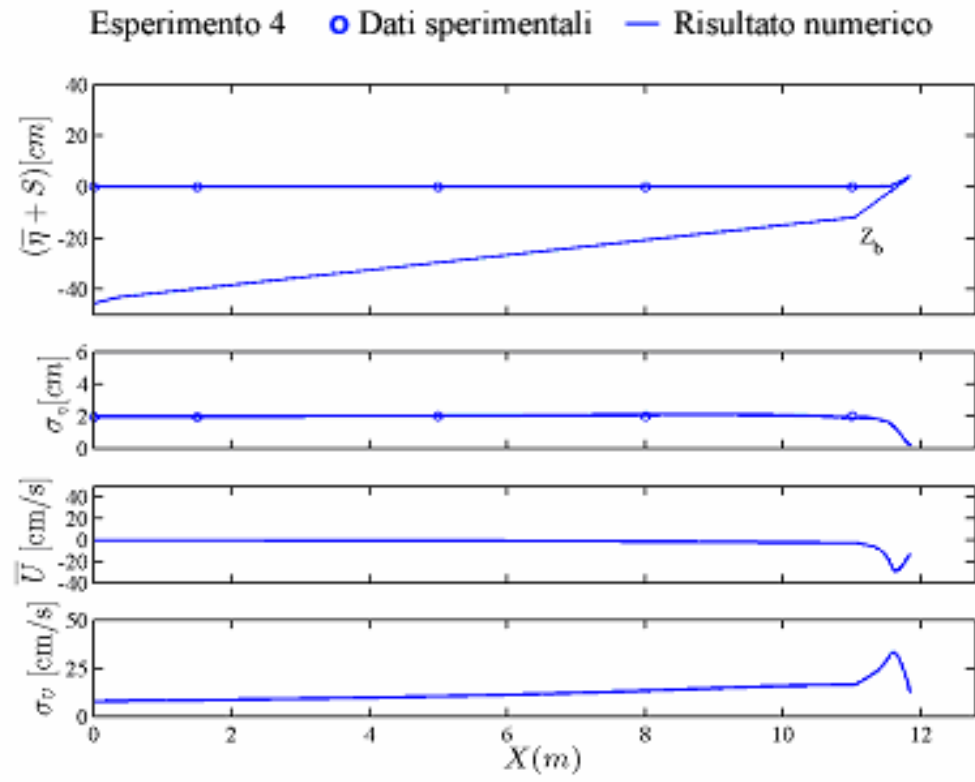


Figura B.4: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 4

Esperimento 5 \circ Dati sperimentali — Risultato numerico

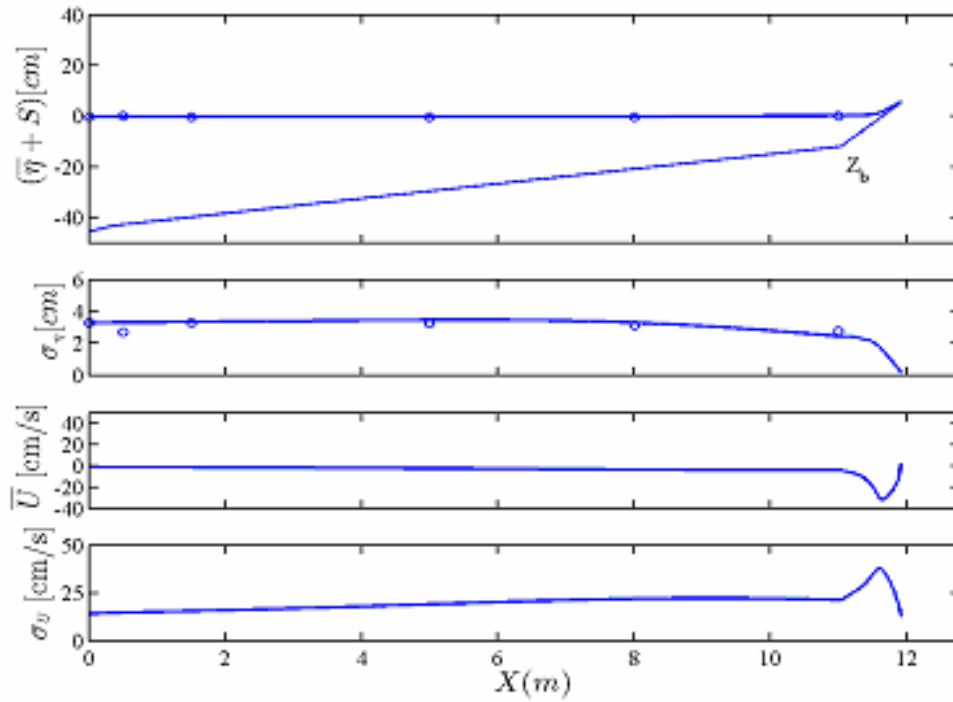


Figura B.5: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 5

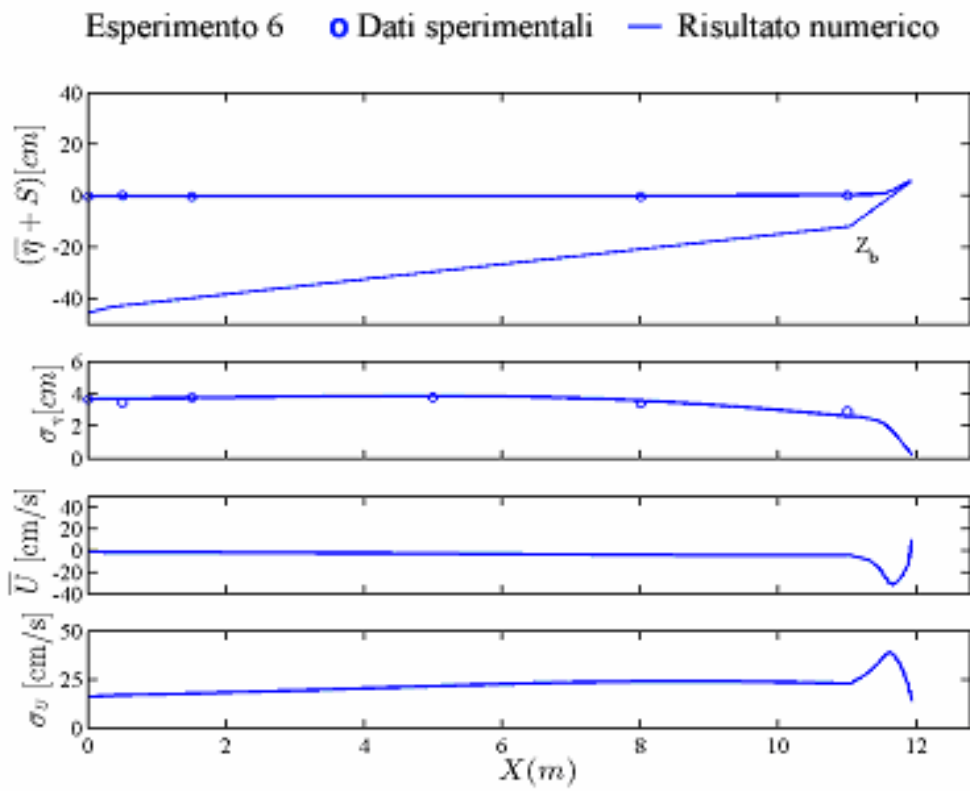


Figura B.6: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 6

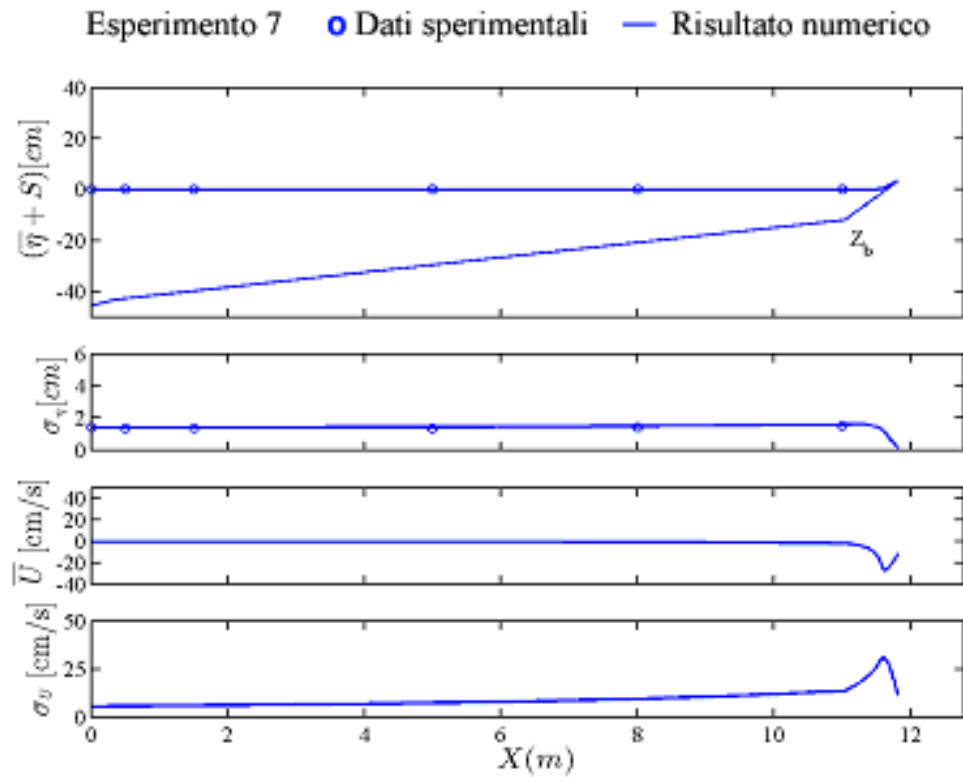


Figura B.7: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 7

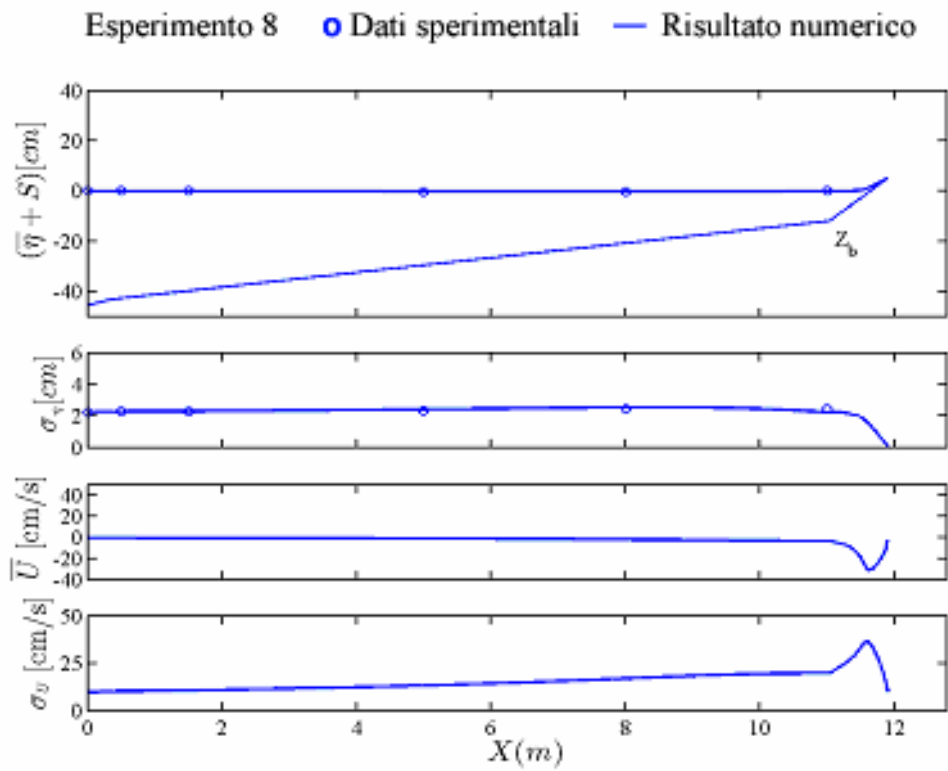


Figura B.8: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 8

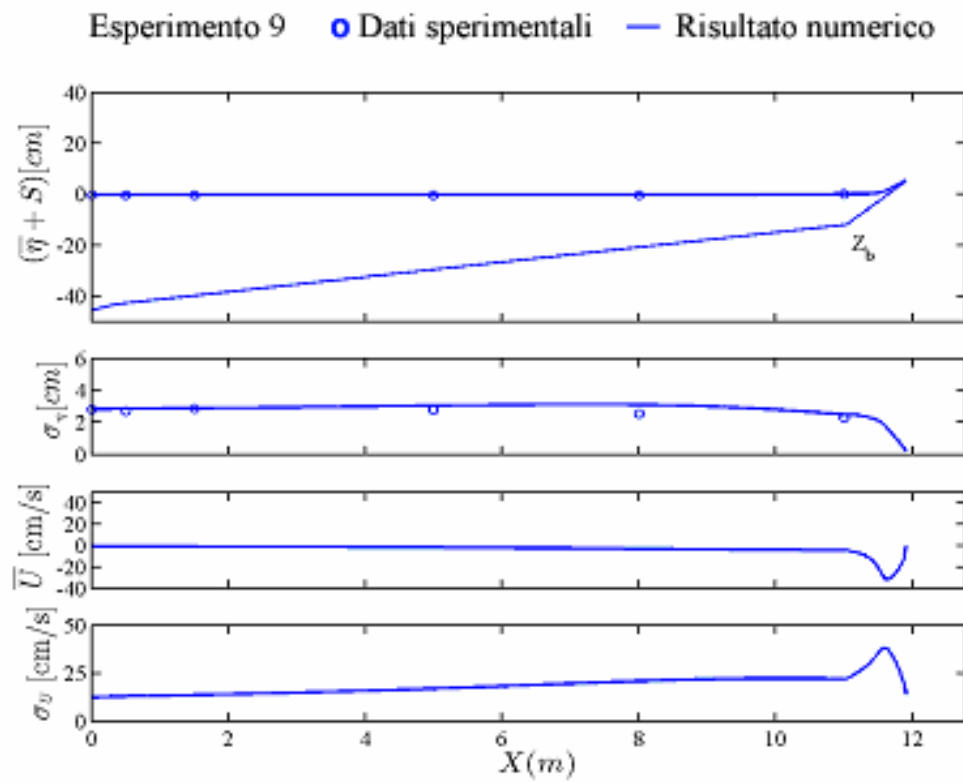


Figura B.9: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 9

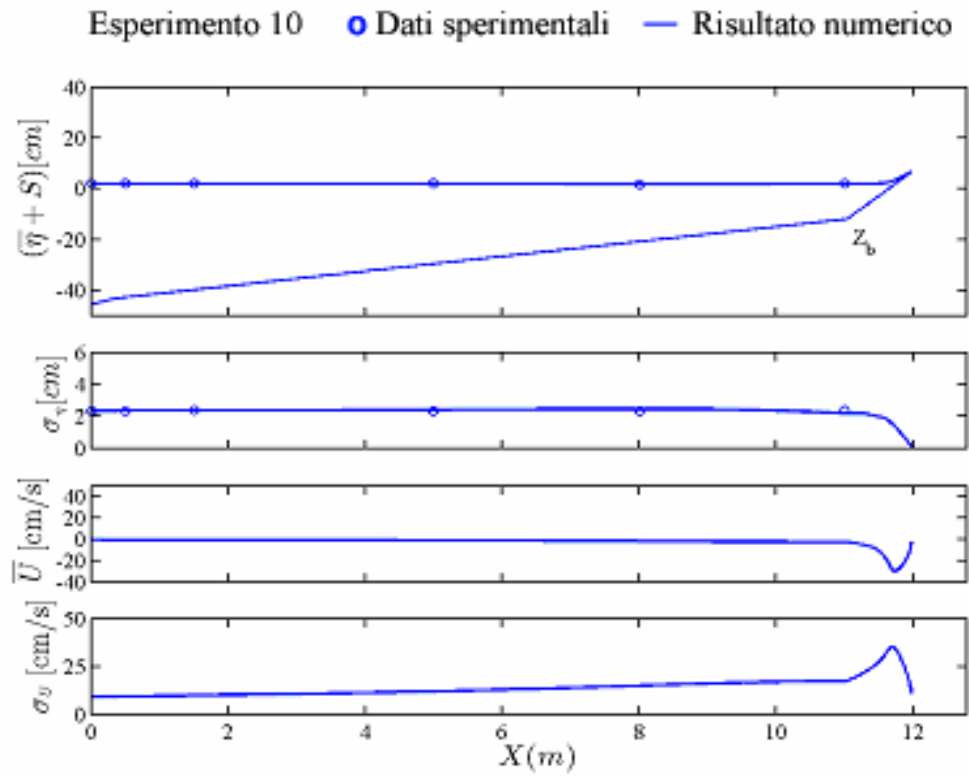


Figura B.10: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 10

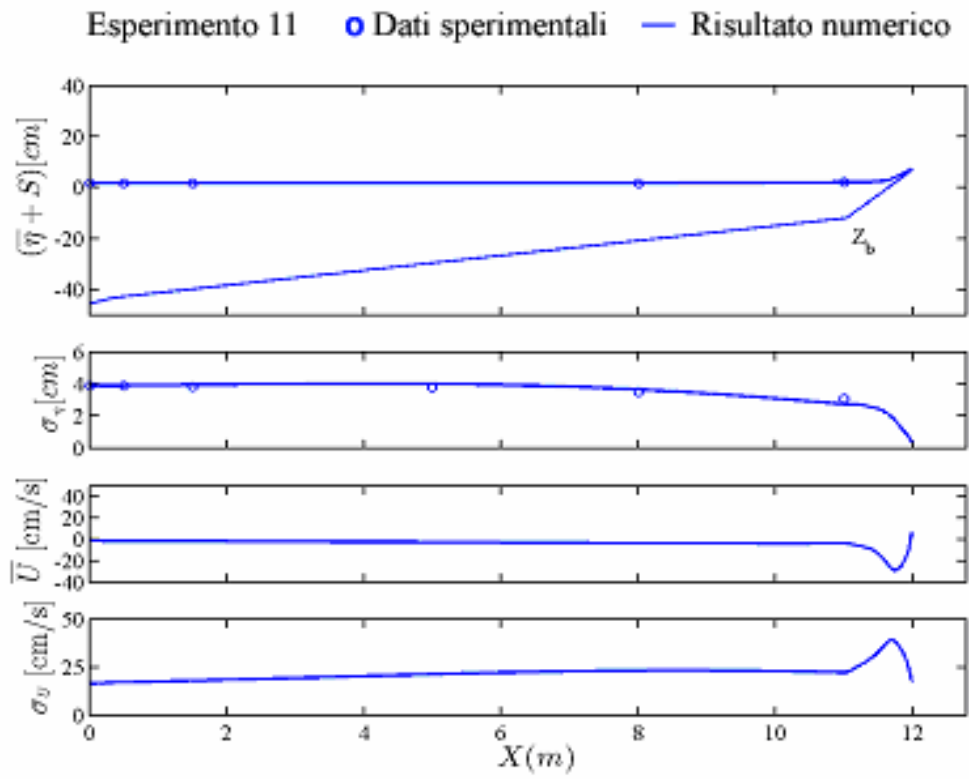


Figura B.11: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 11

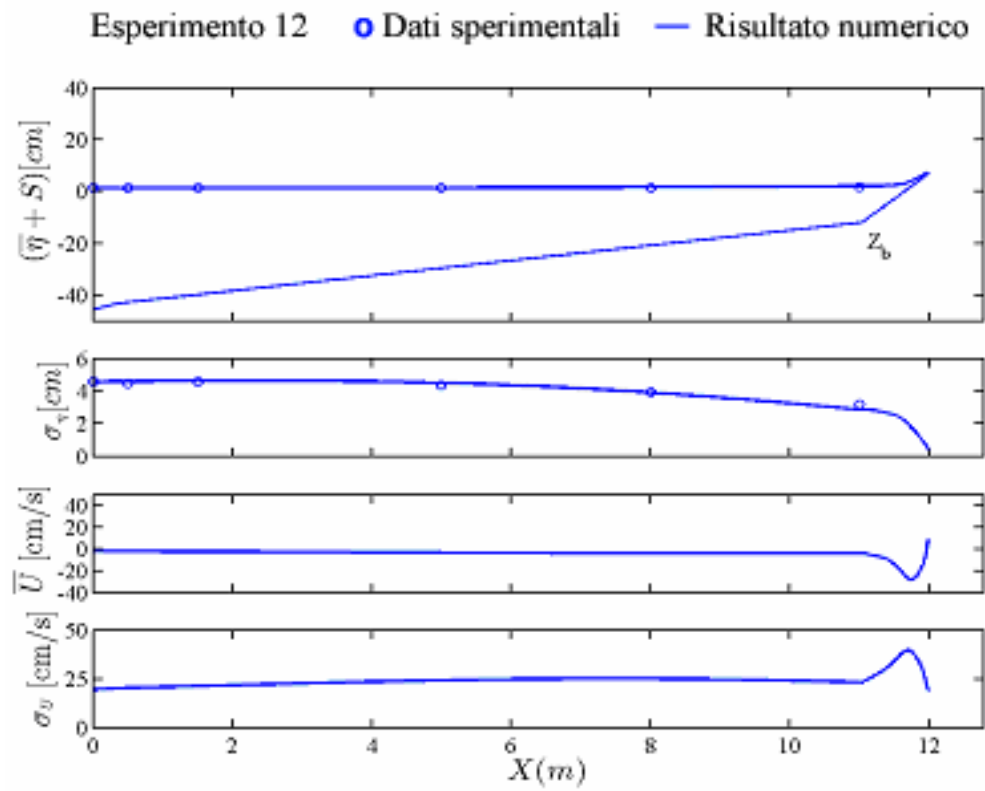


Figura B.12: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 12

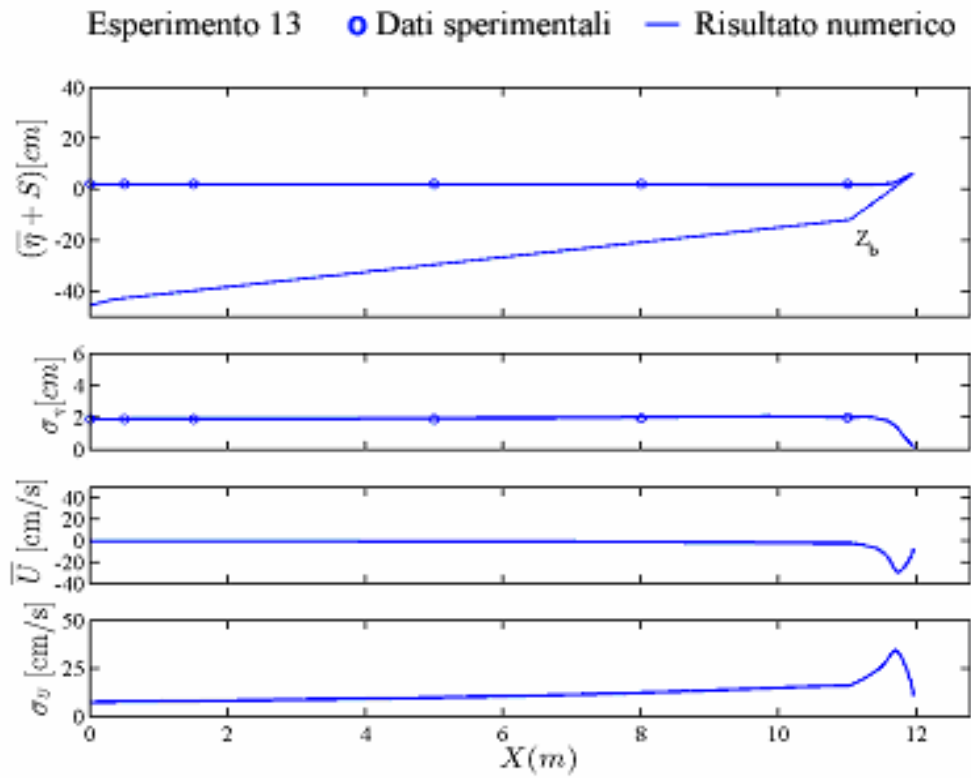


Figura B.13: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 13

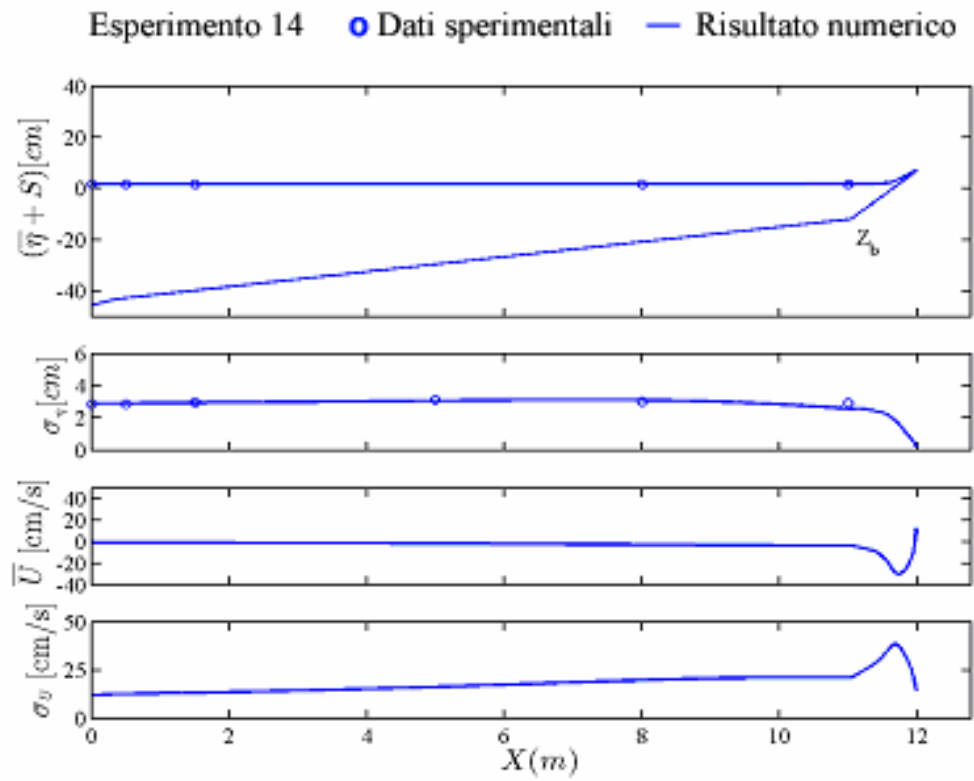


Figura B.14: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 14

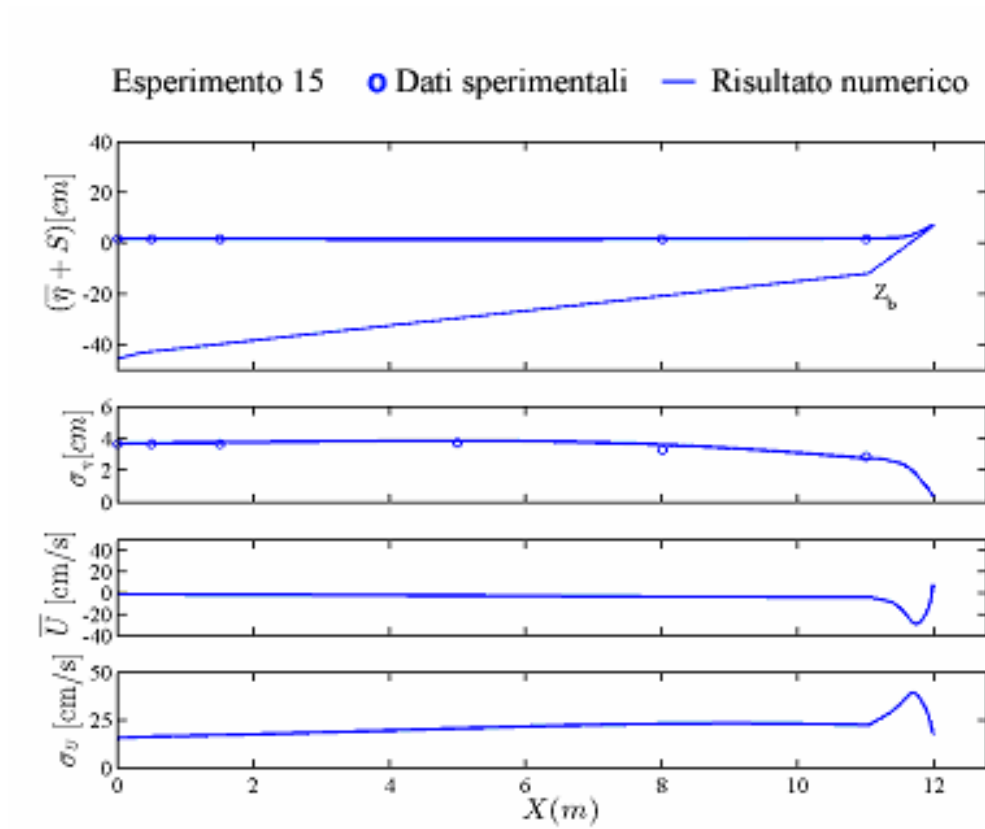


Figura B.15: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 15

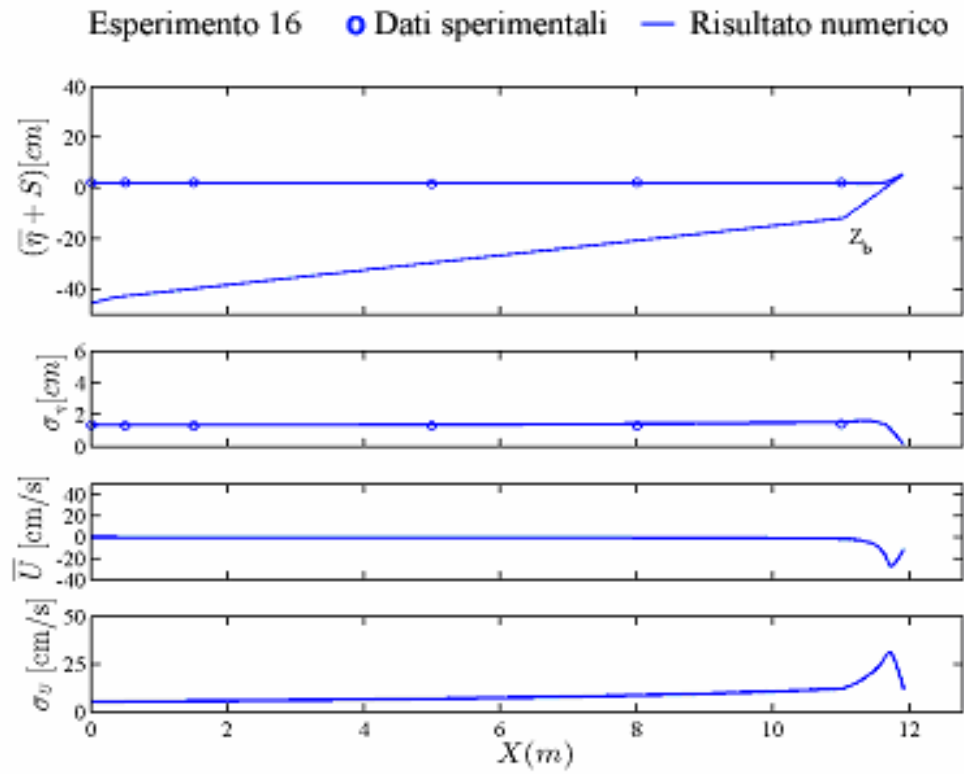


Figura B.16: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 16

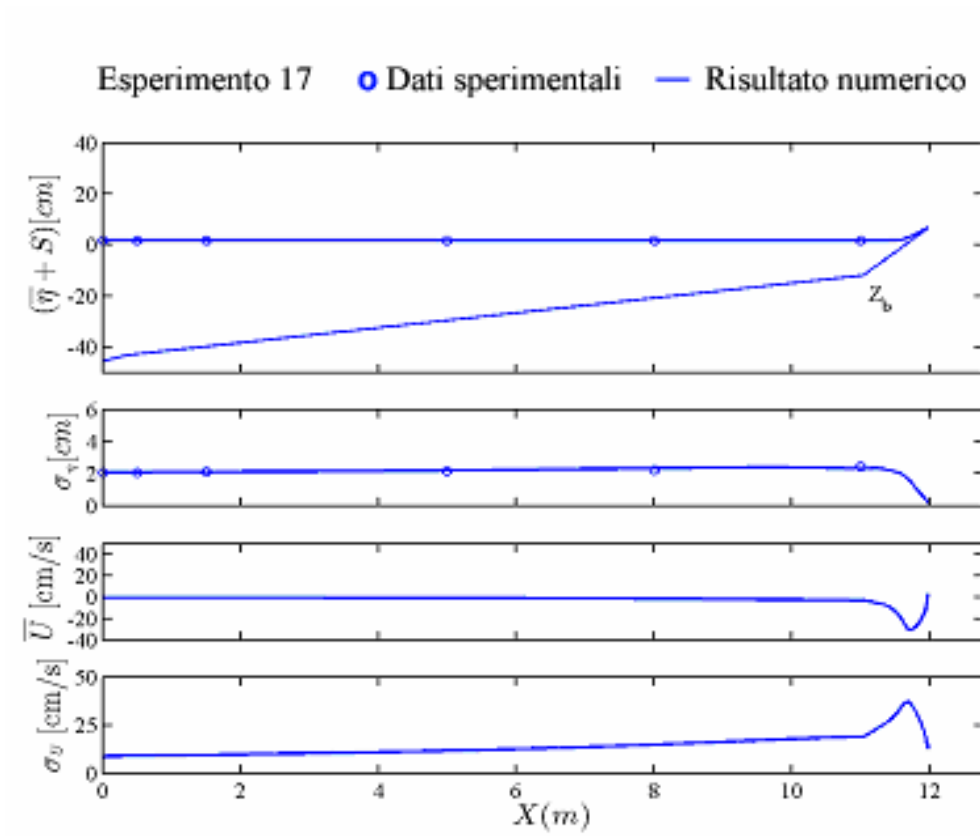


Figura B.17: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 17

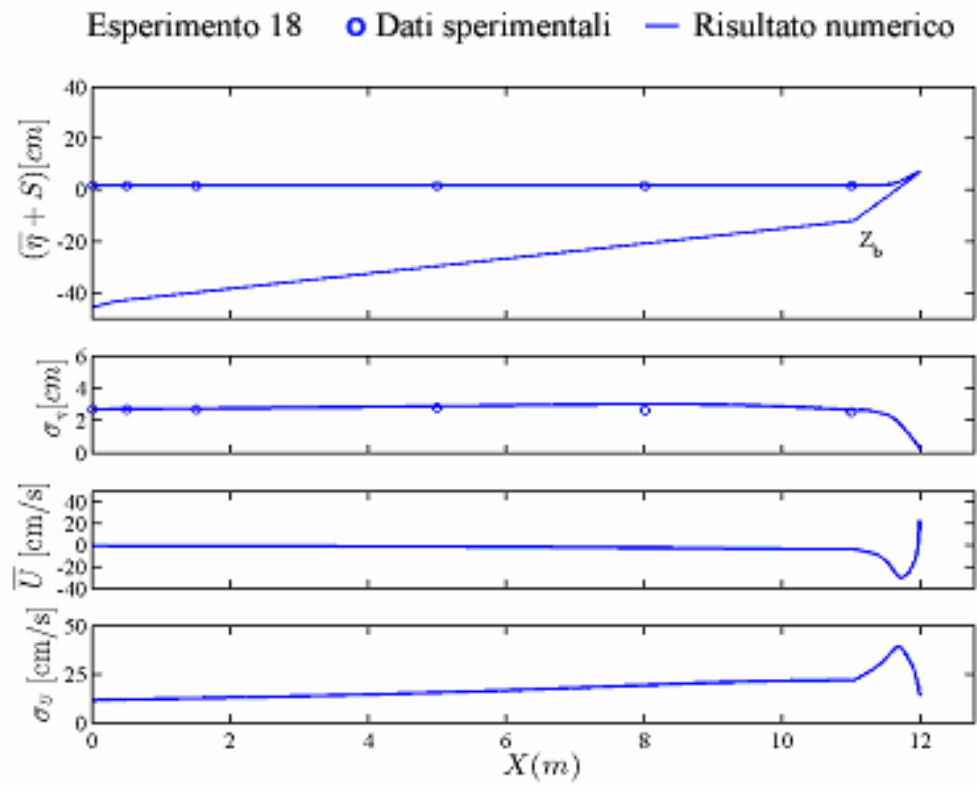


Figura B.18: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 18

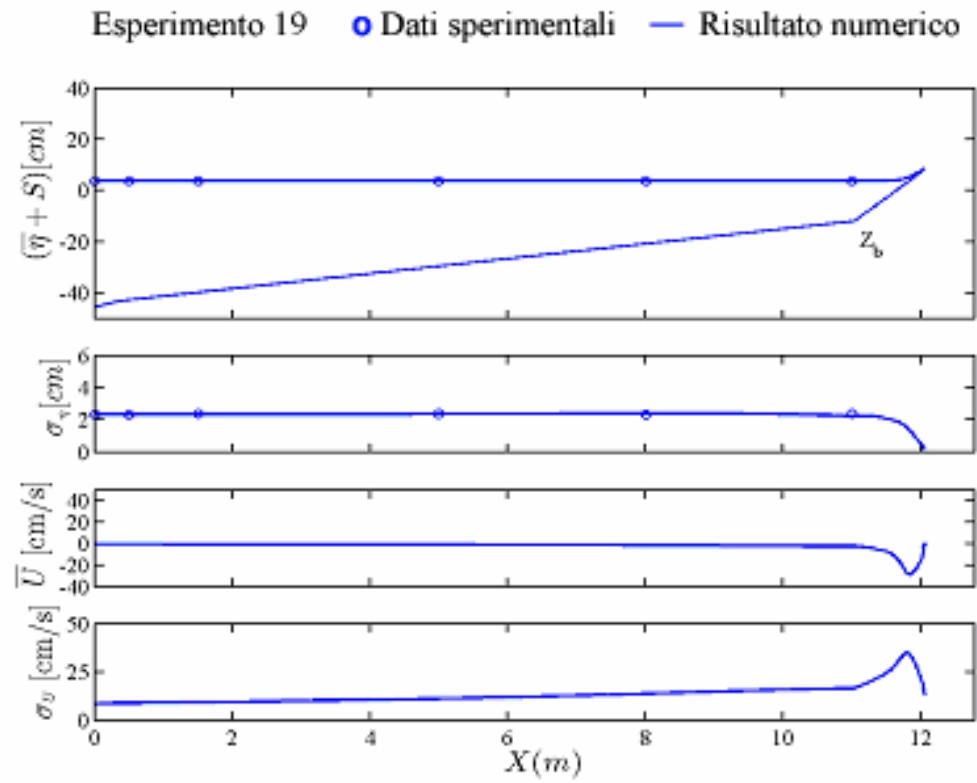


Figura B.19: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 19

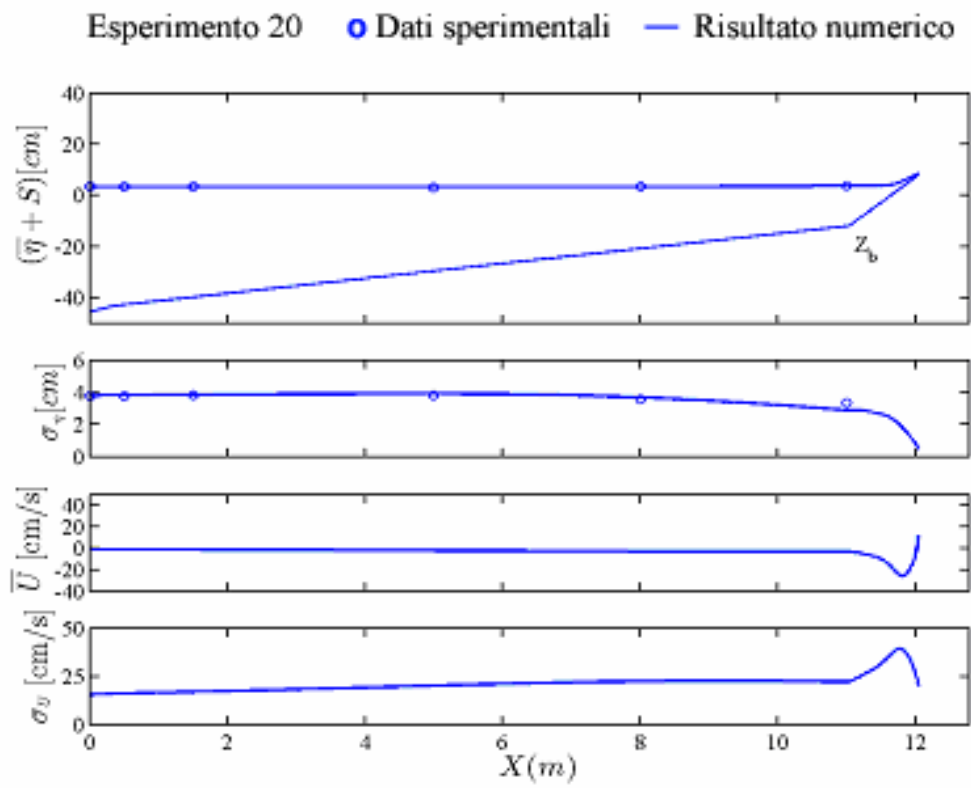


Figura B.20: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 20

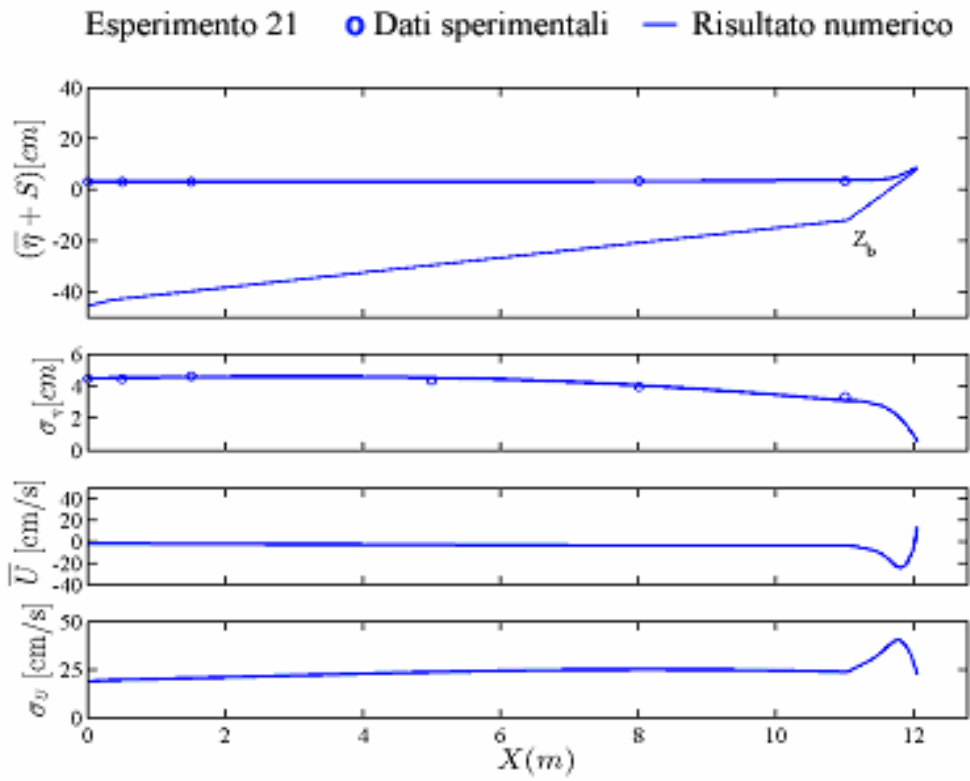


Figura B.21: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 21

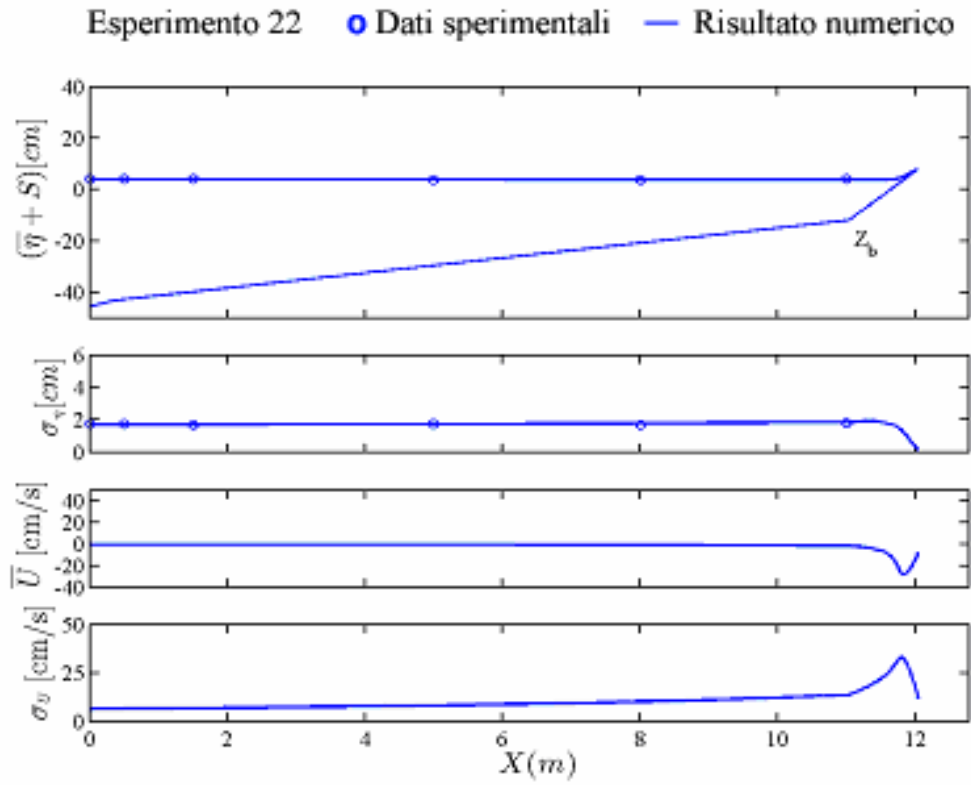


Figura B.22: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 22

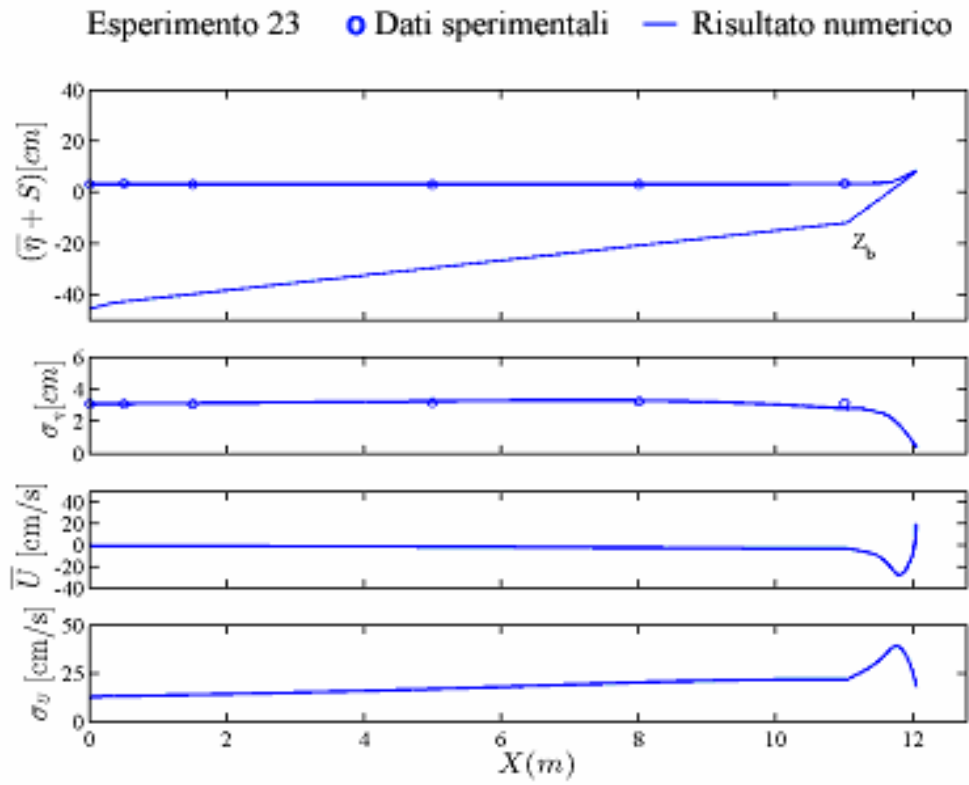


Figura B.23: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 23

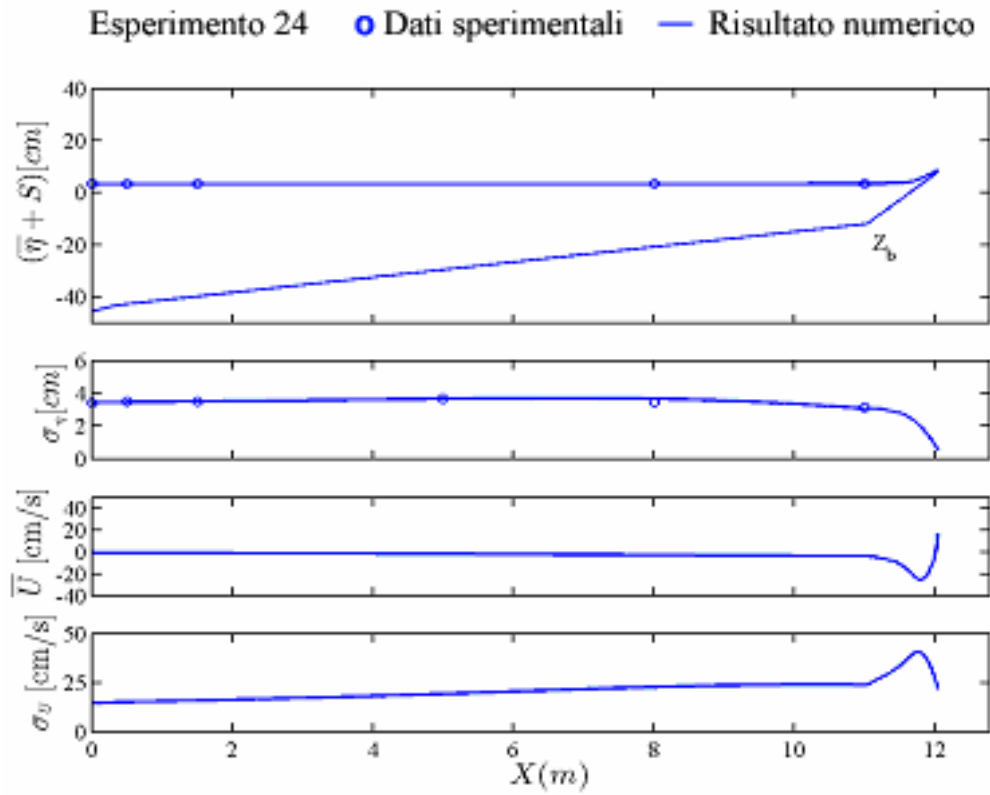


Figura B.24: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 24

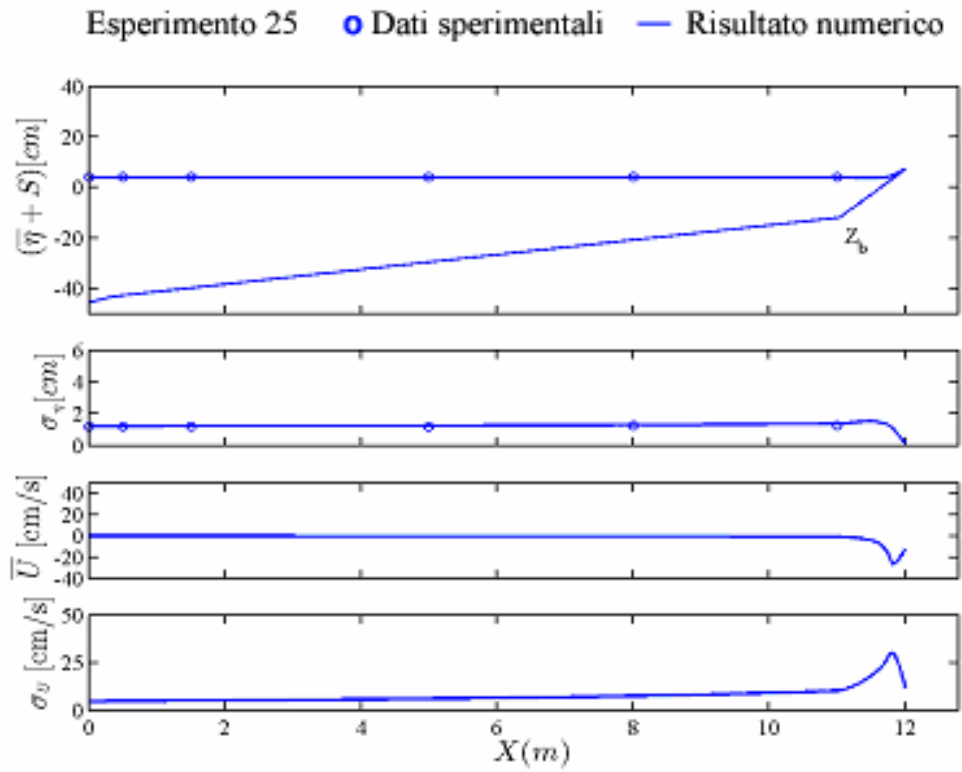


Figura B.25: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 25

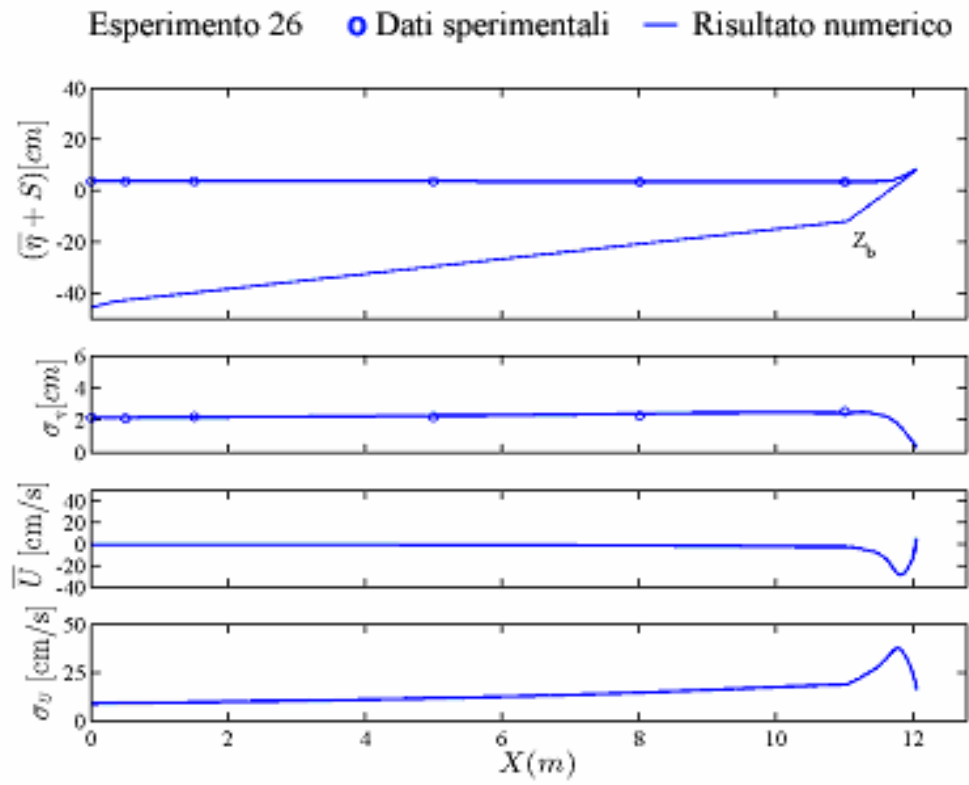


Figura B.26: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 26

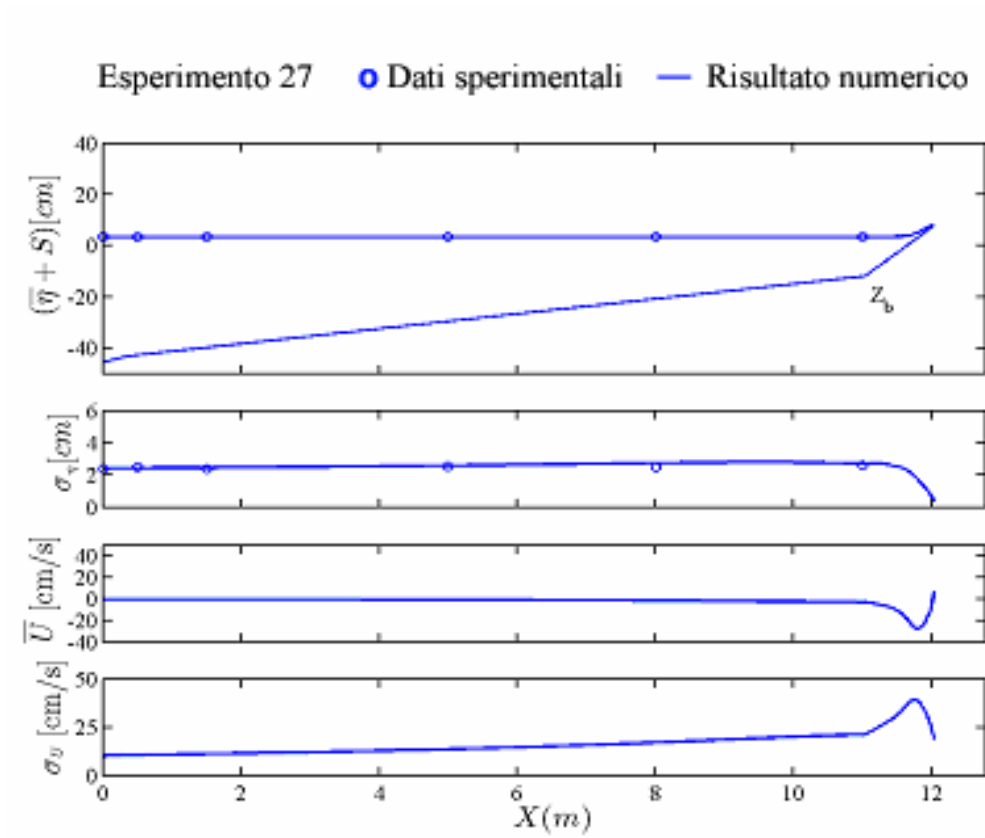


Figura B.27: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 27

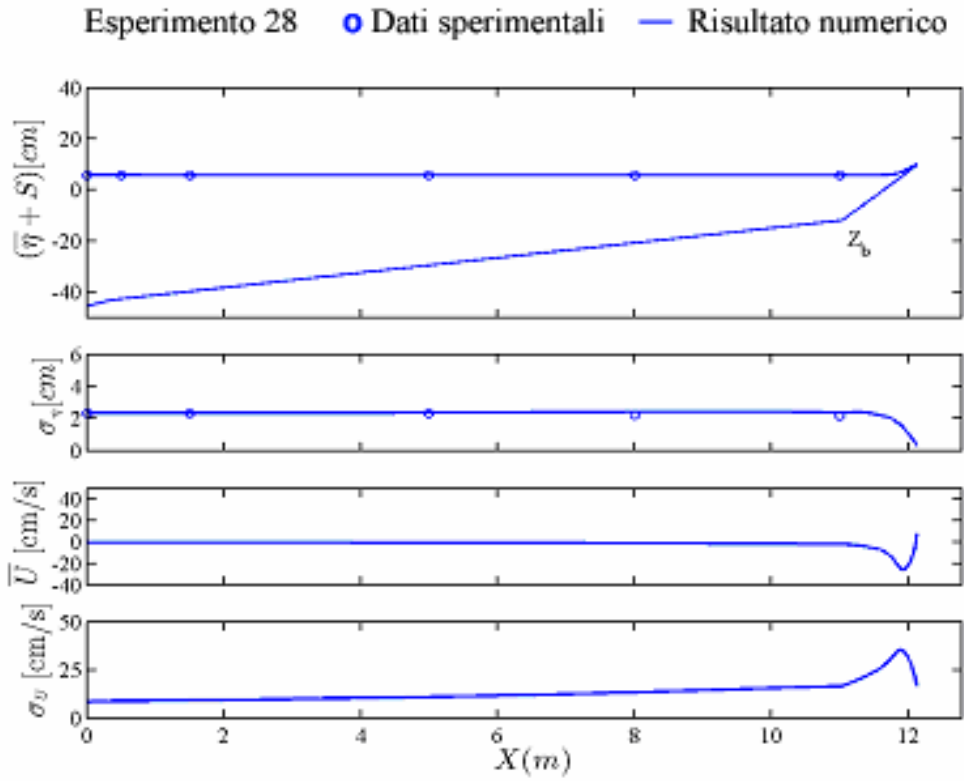


Figura B.28: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 28

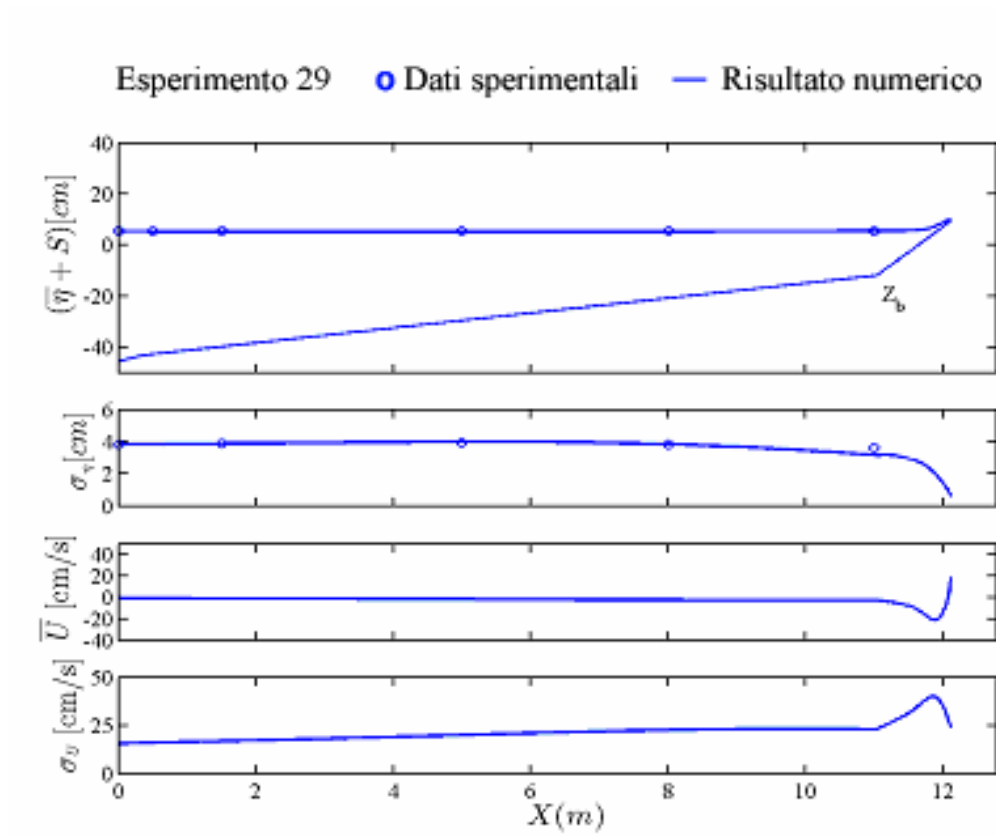


Figura B.29: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 29

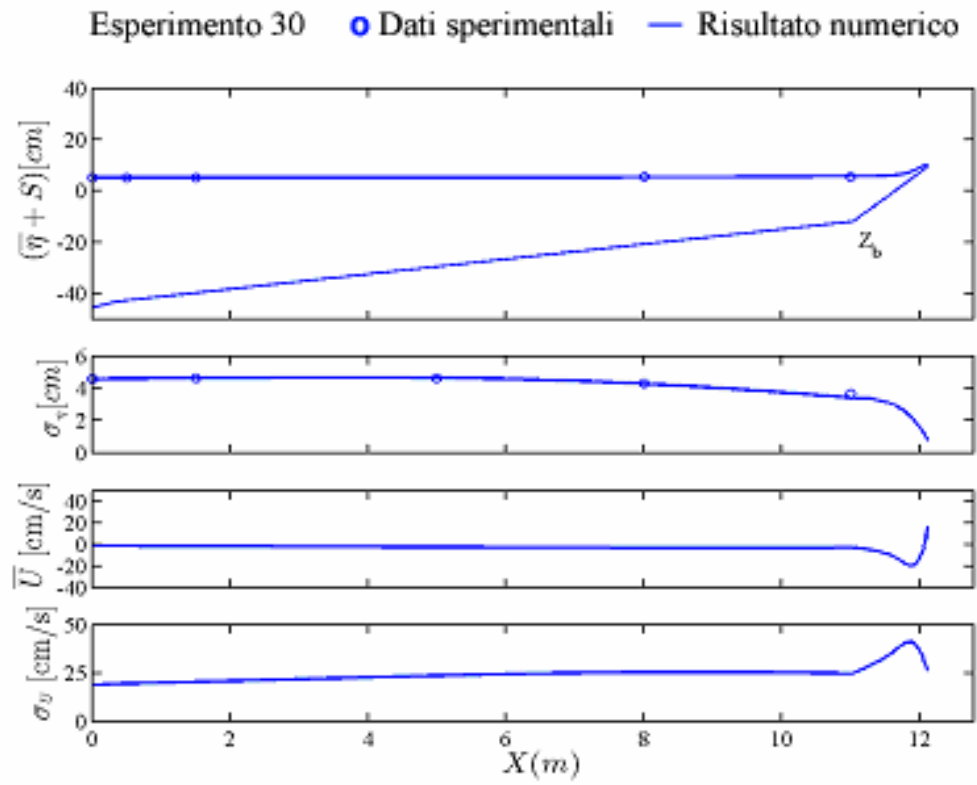


Figura B.30: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 30

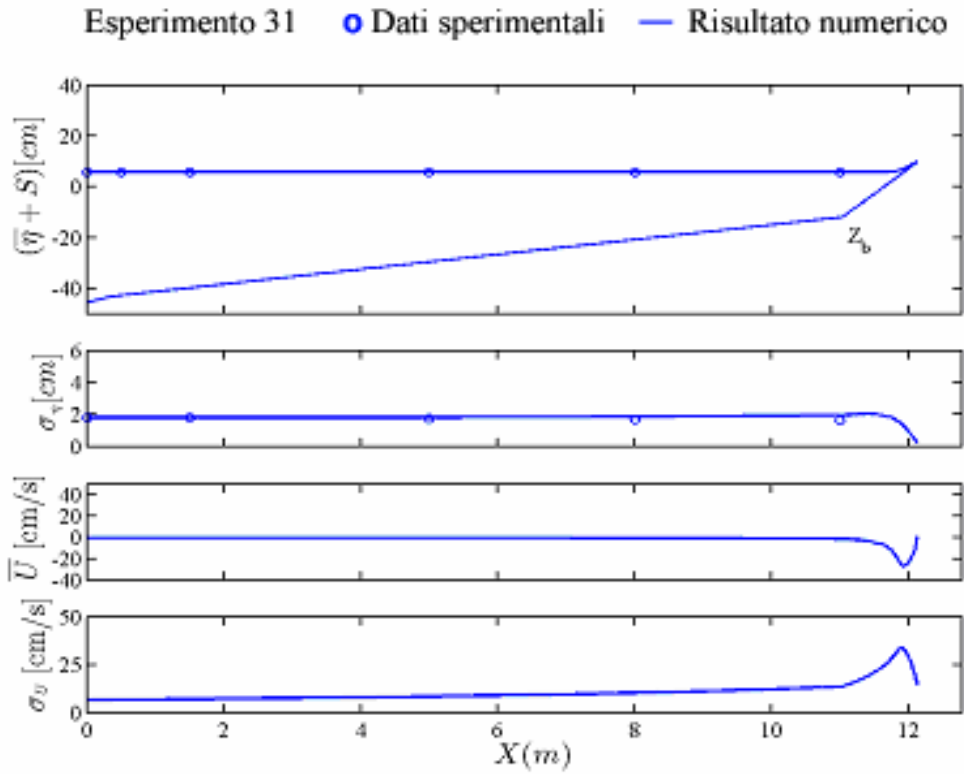


Figura B.31: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 31

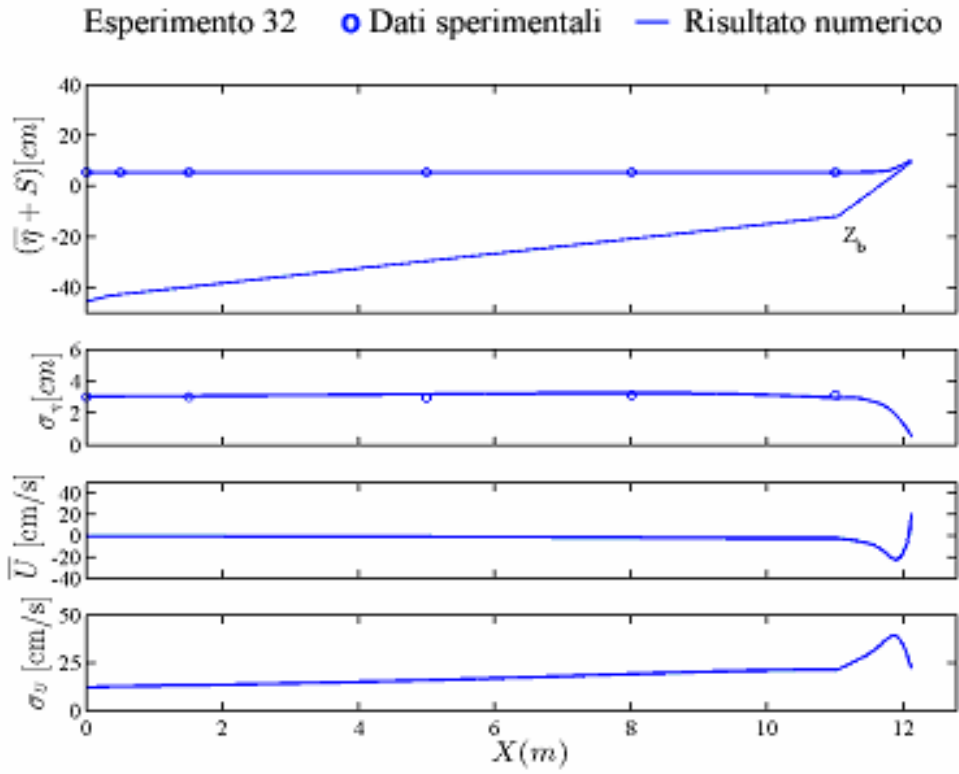


Figura B.32: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 32

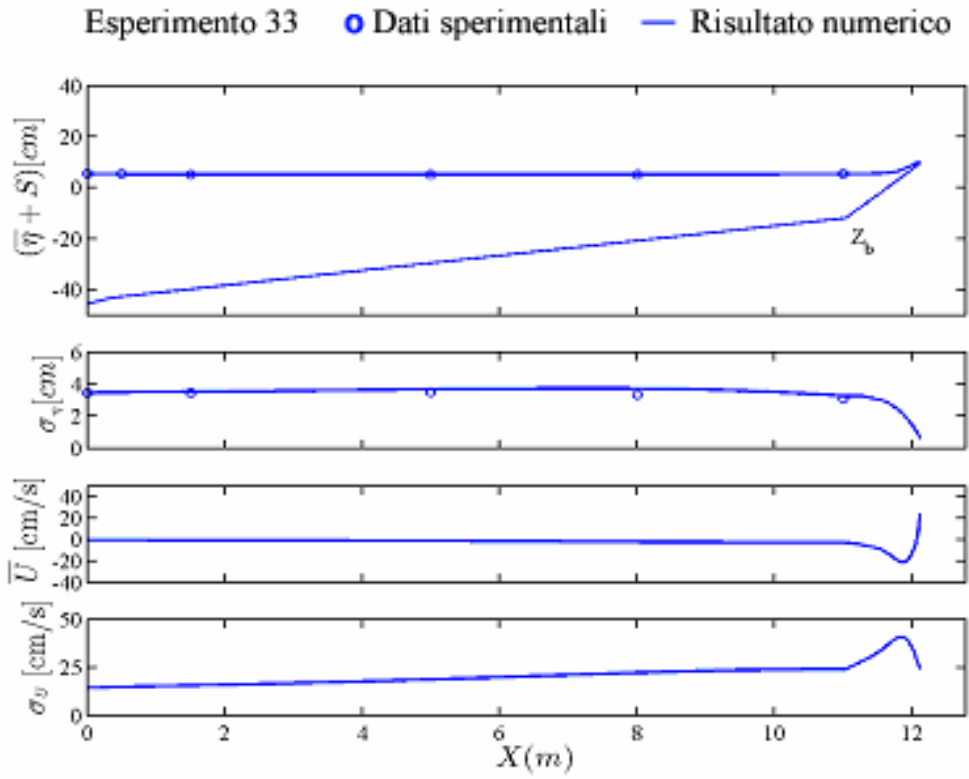


Figura B.33: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 33

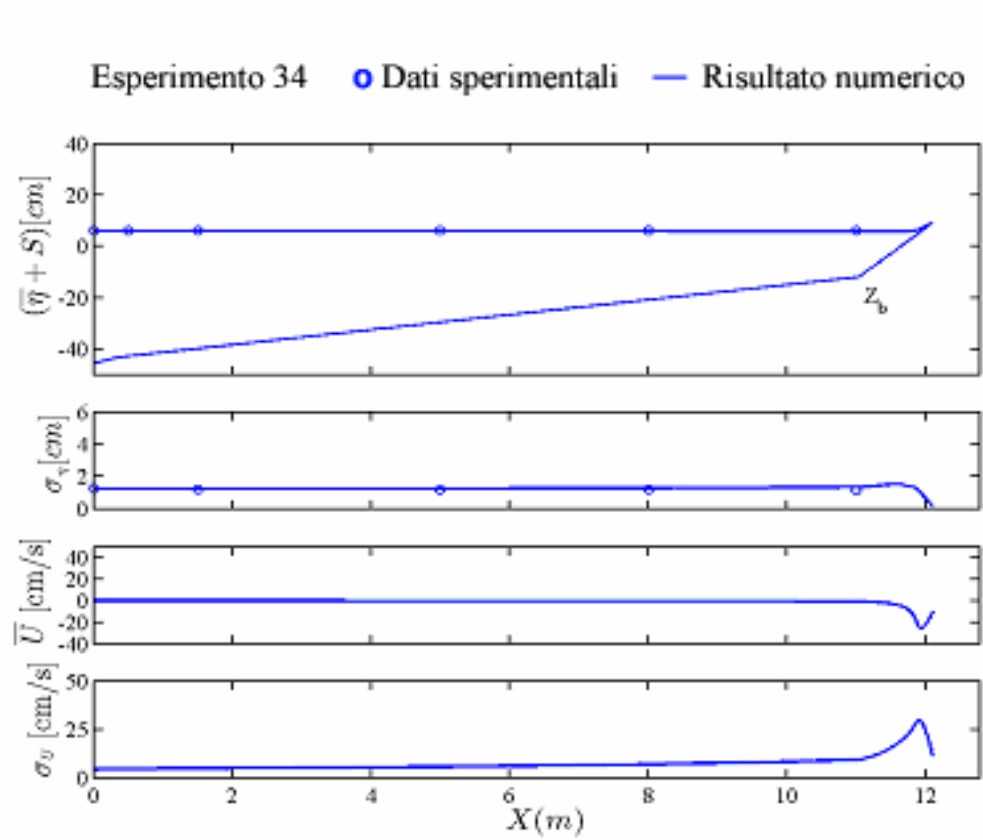


Figura B.34: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 34

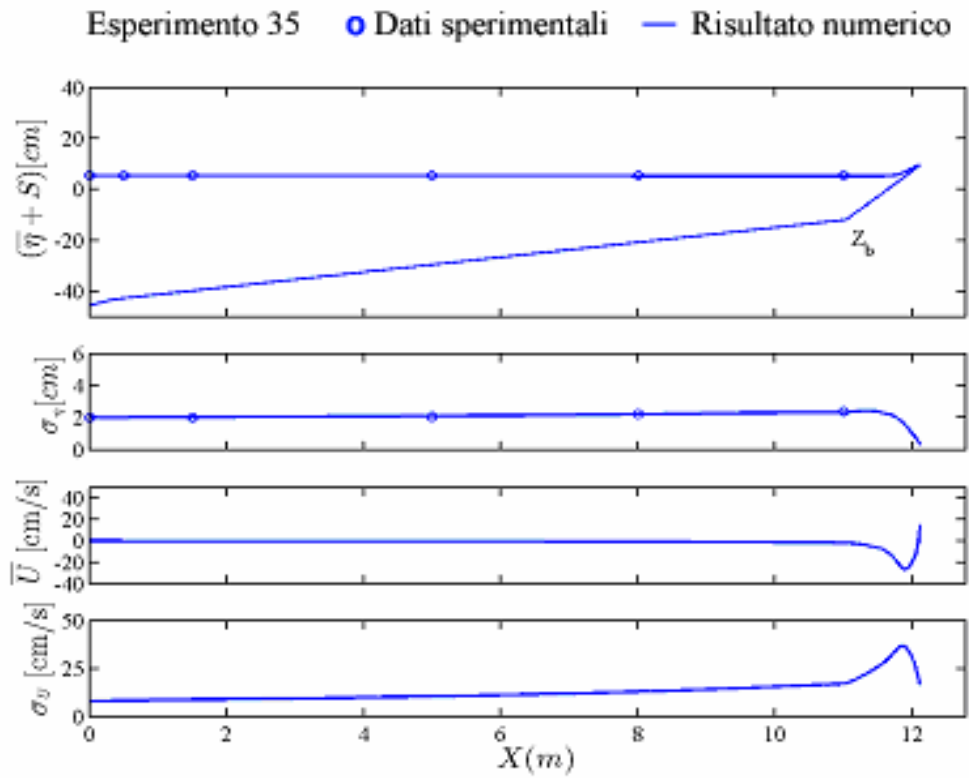


Figura B.35: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 35

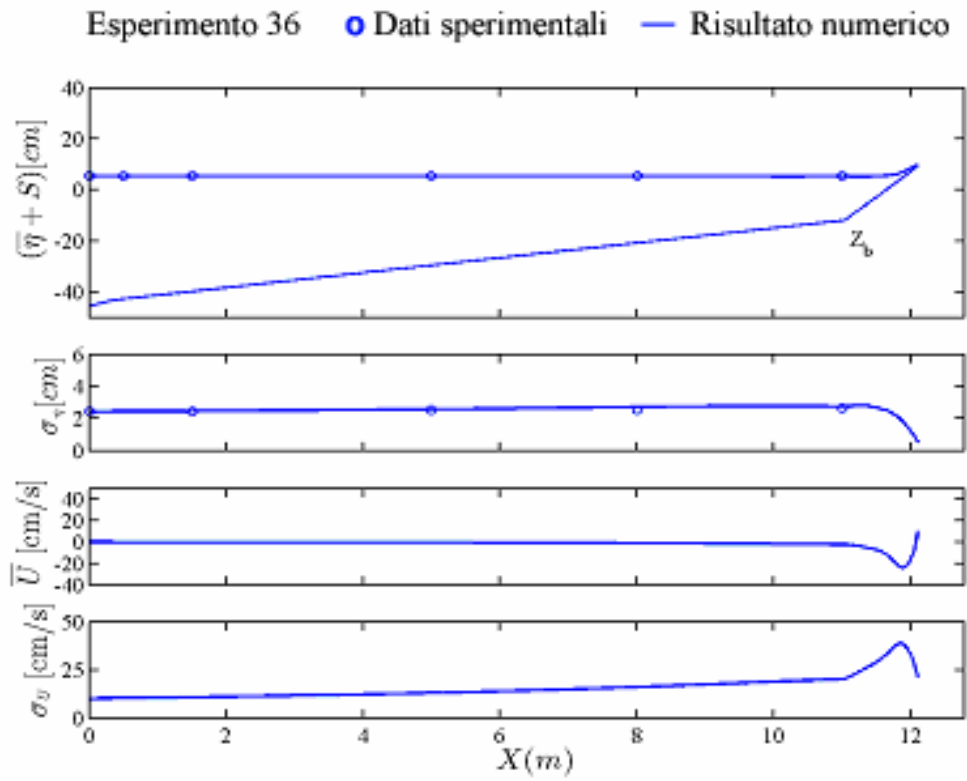


Figura B.36: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 36

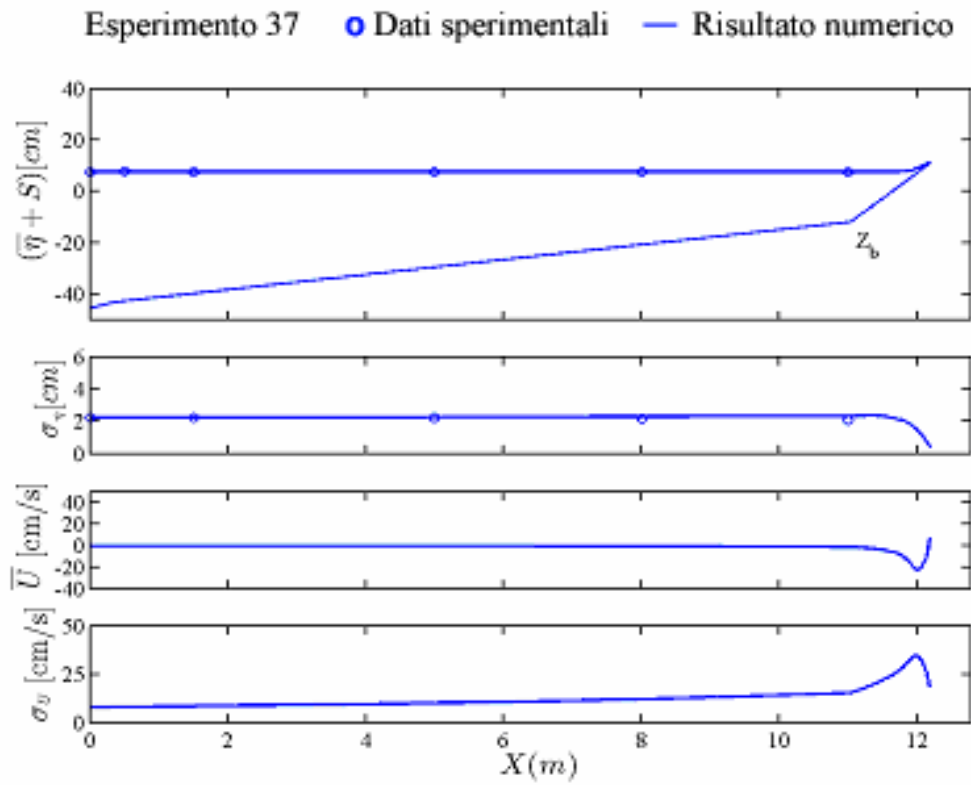


Figura B.37: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 37

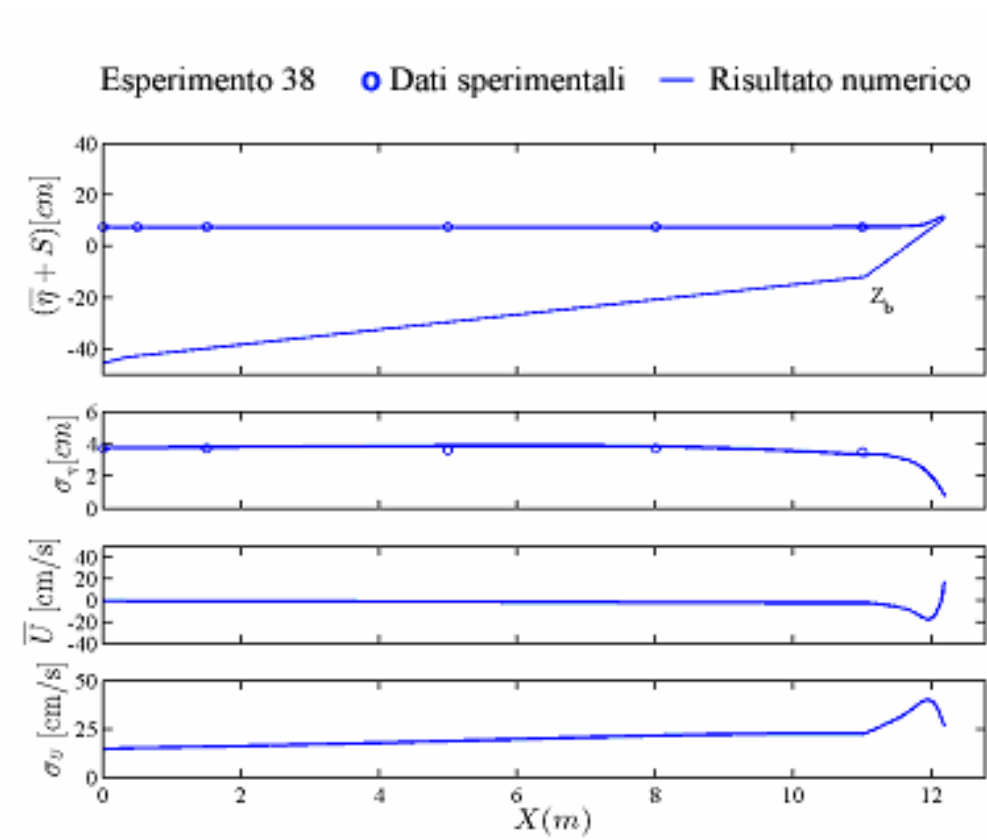


Figura B.38: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 38

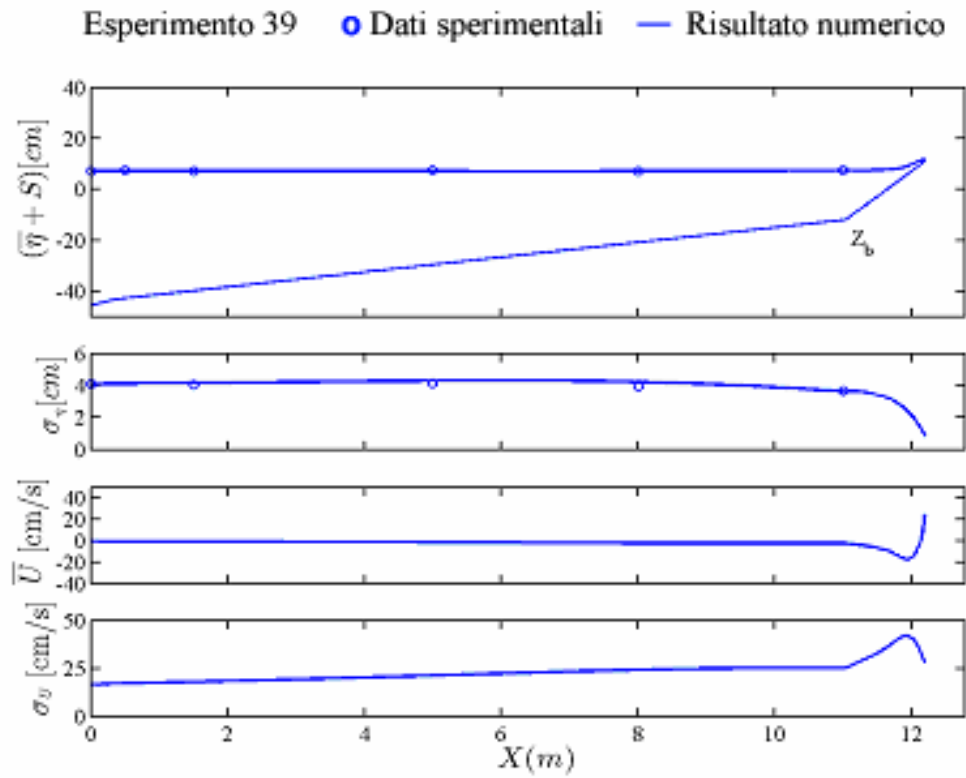


Figura B.39: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 39

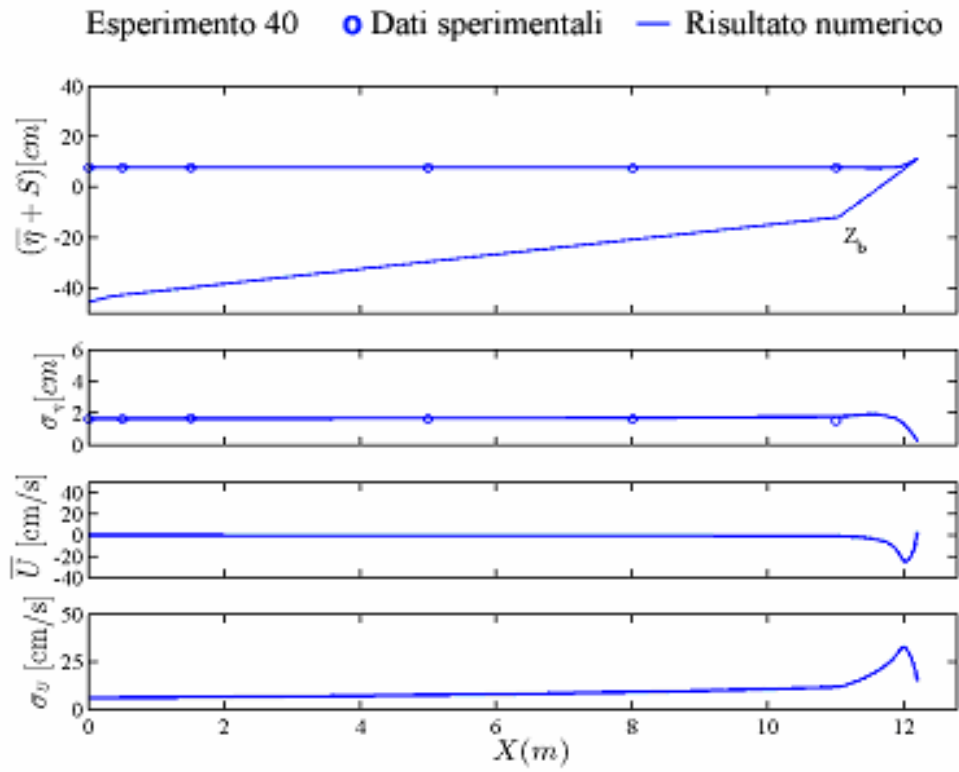


Figura B.40: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 40

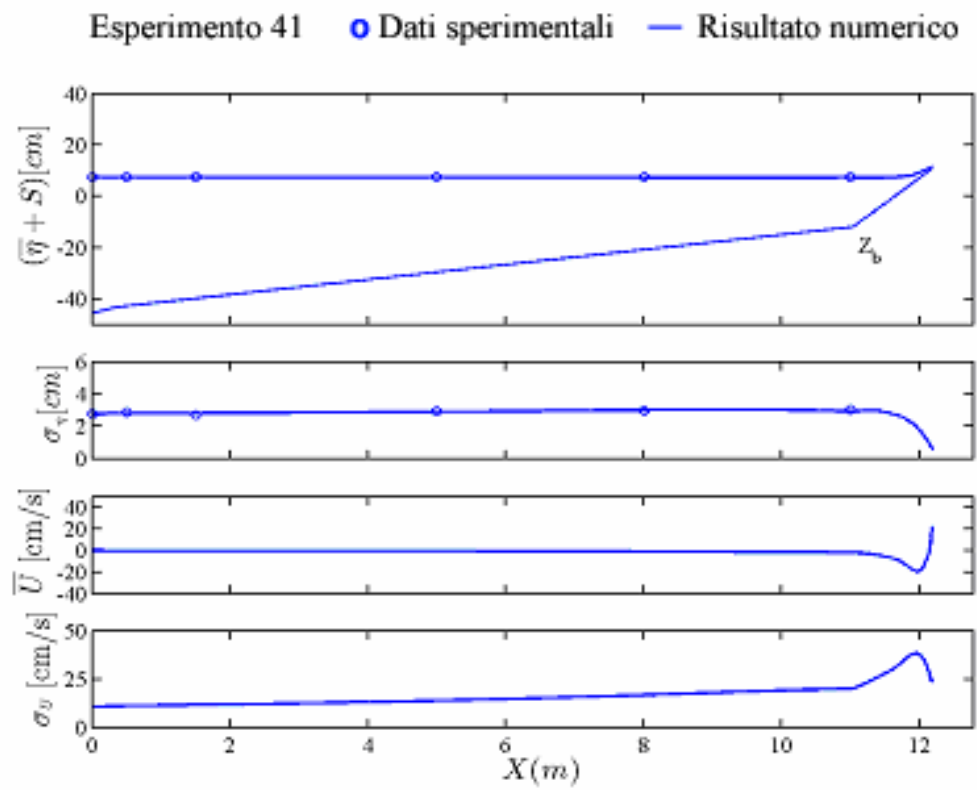


Figura B.41: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 41

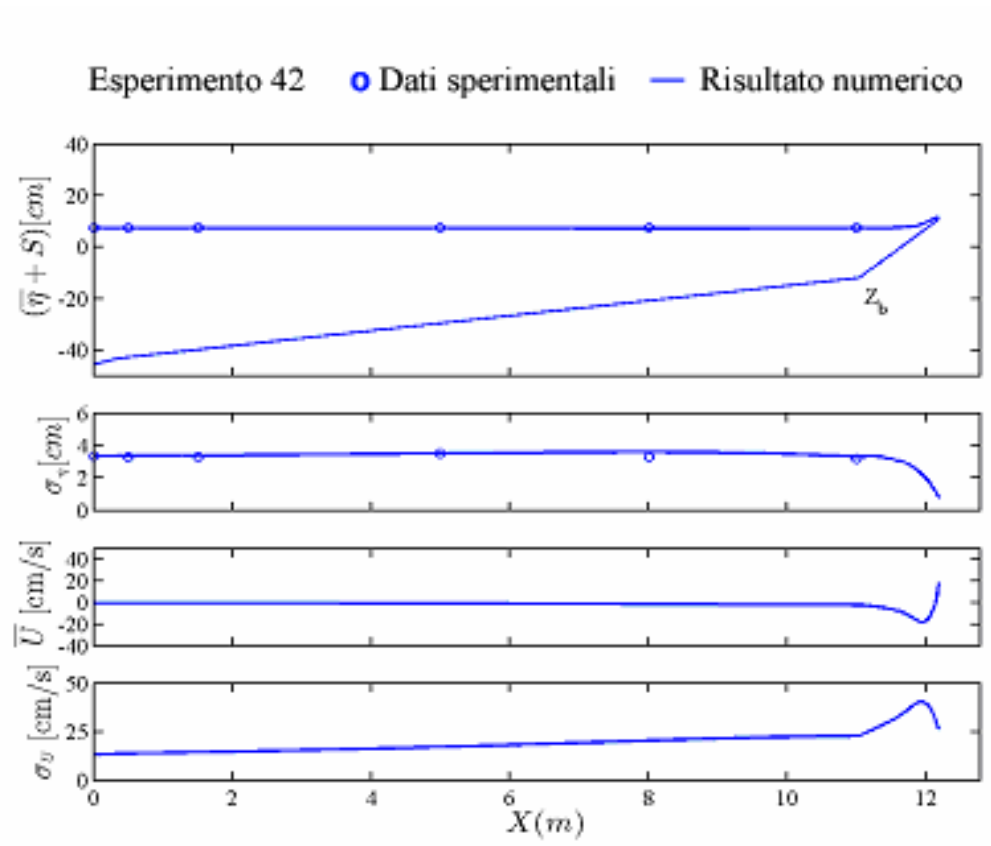


Figura B.42: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 42

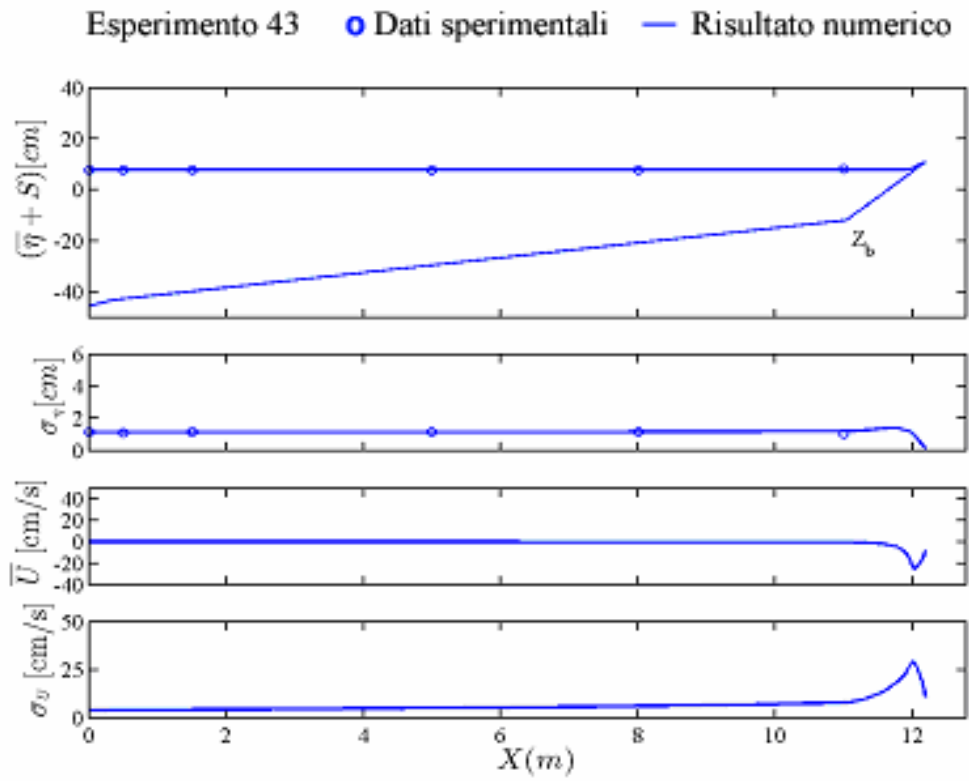


Figura B.43: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 43

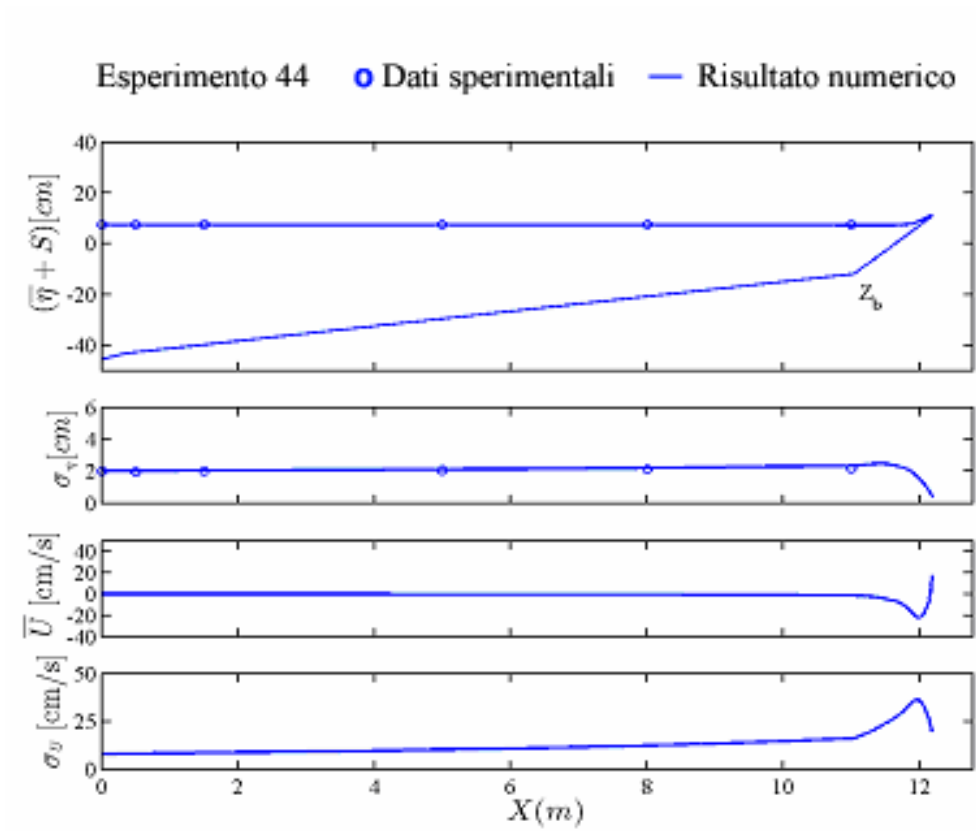


Figura B.44: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 44

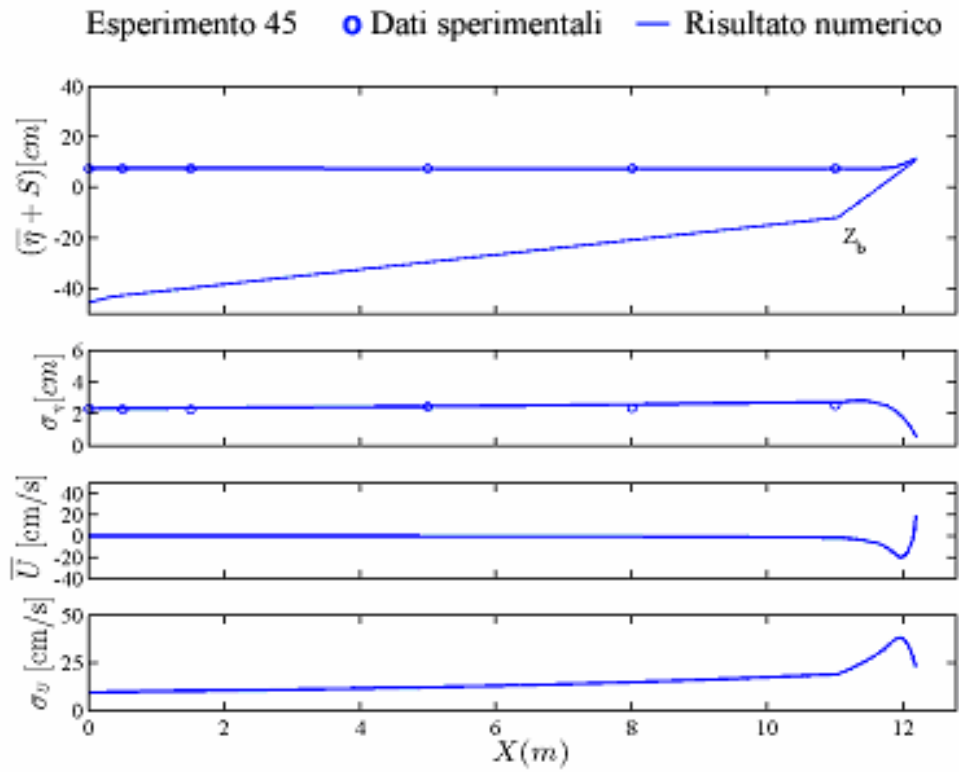


Figura B.45: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 45

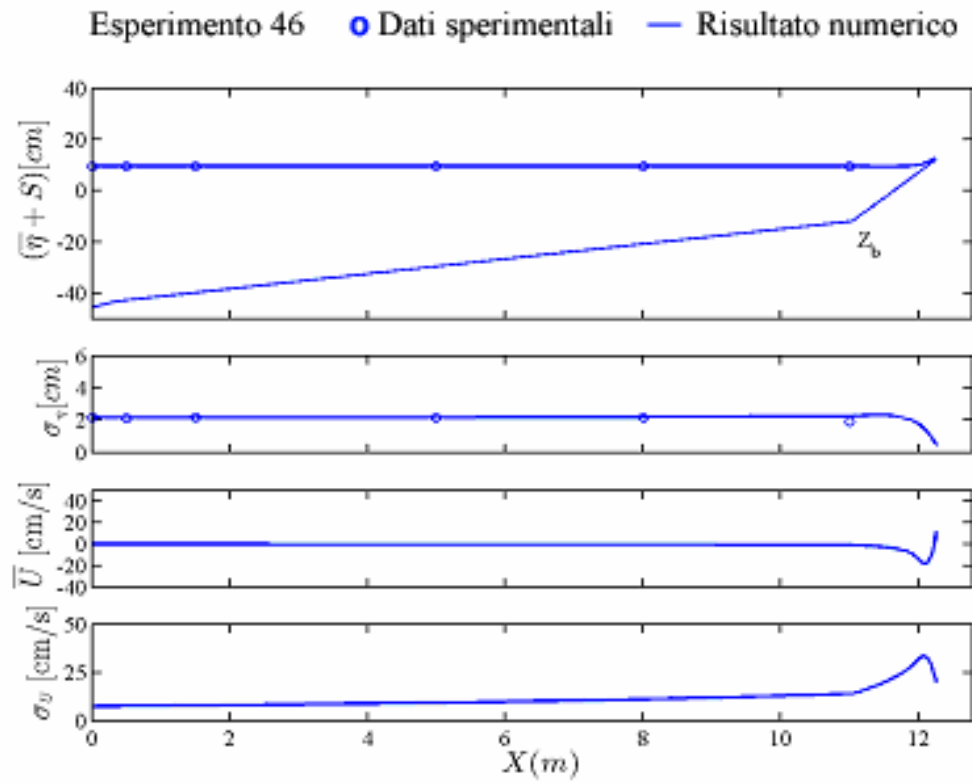


Figura B.46: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 46

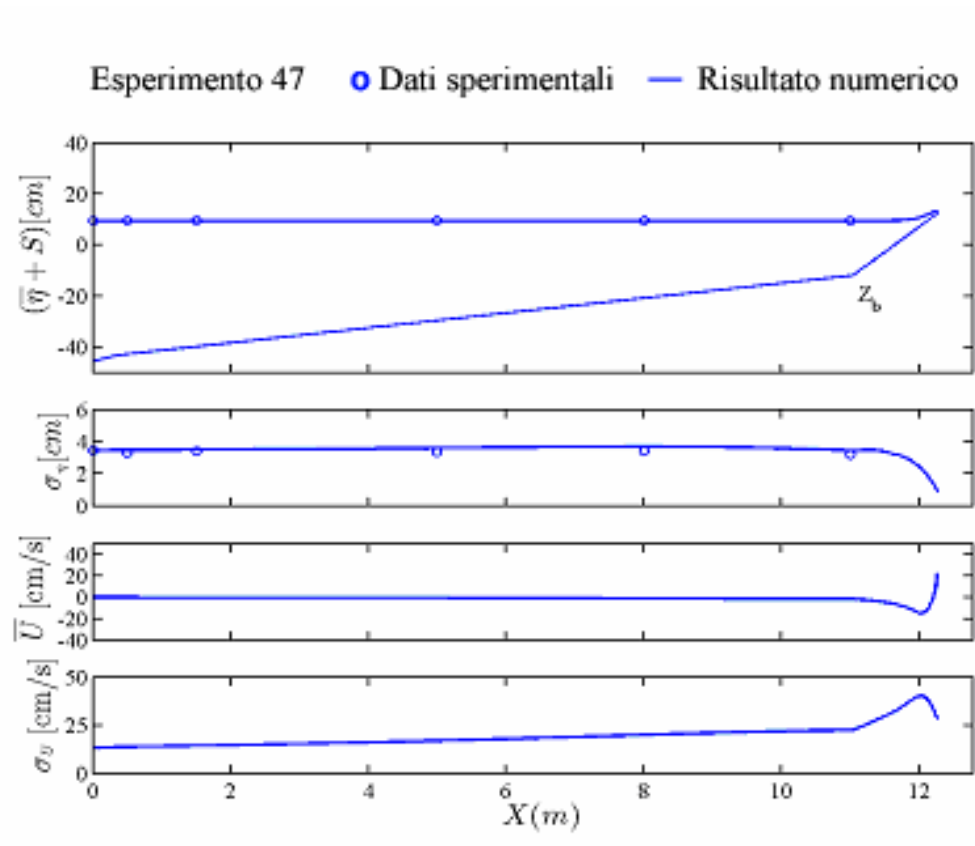


Figura B.47: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 47

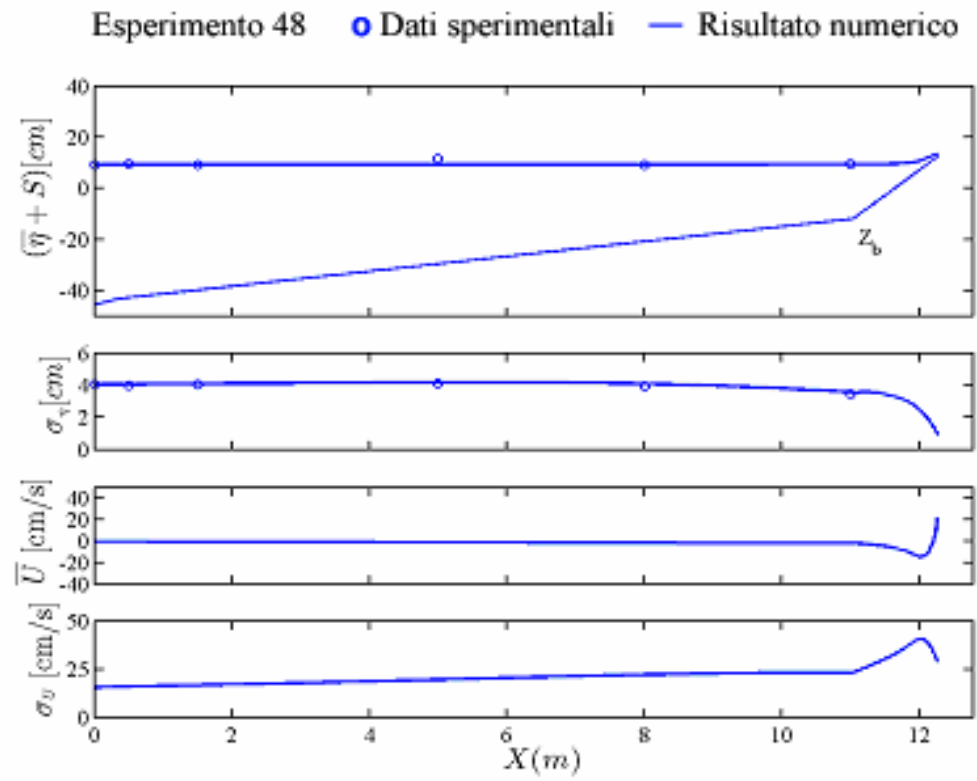


Figura B.48: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 48

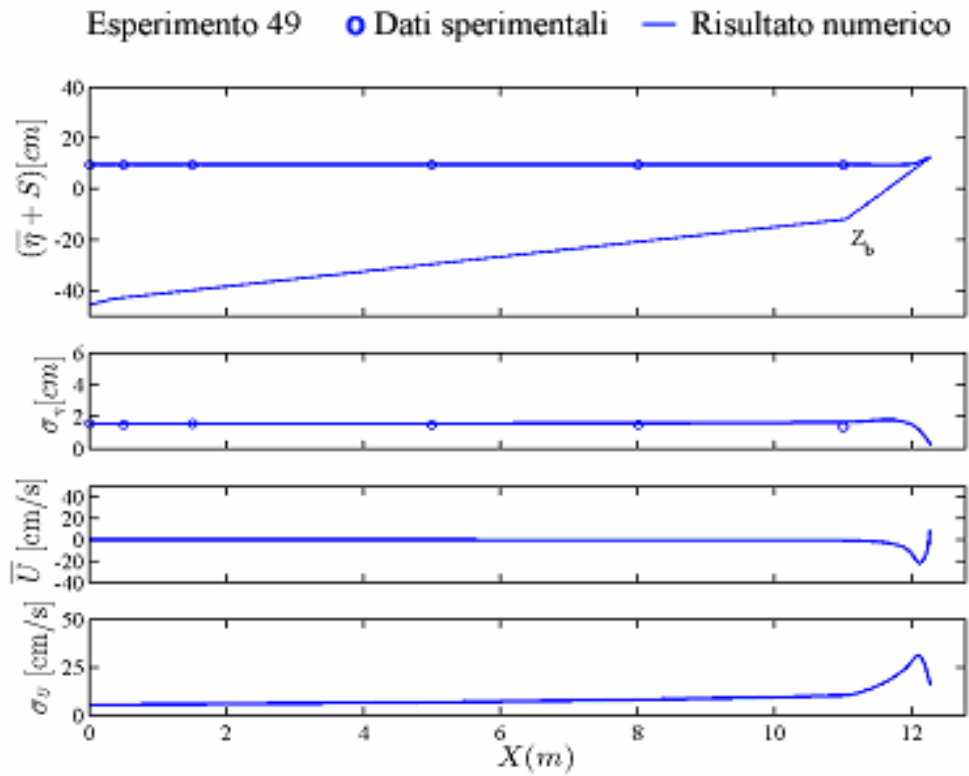


Figura B.49: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 49

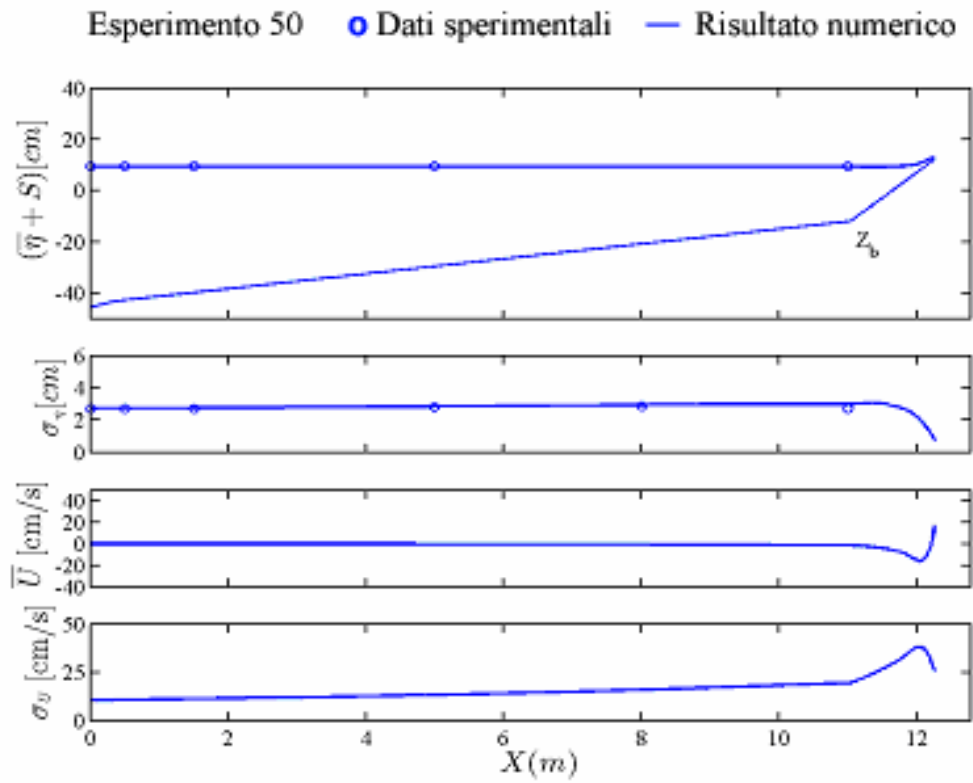


Figura B.50: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 50

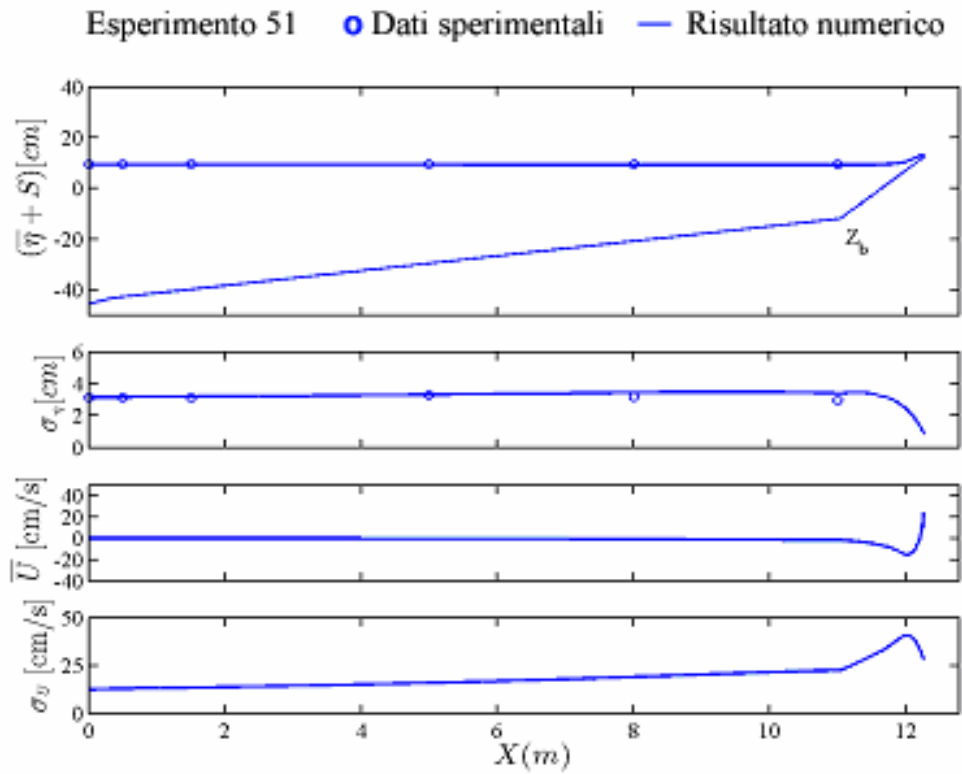


Figura B.51: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 51

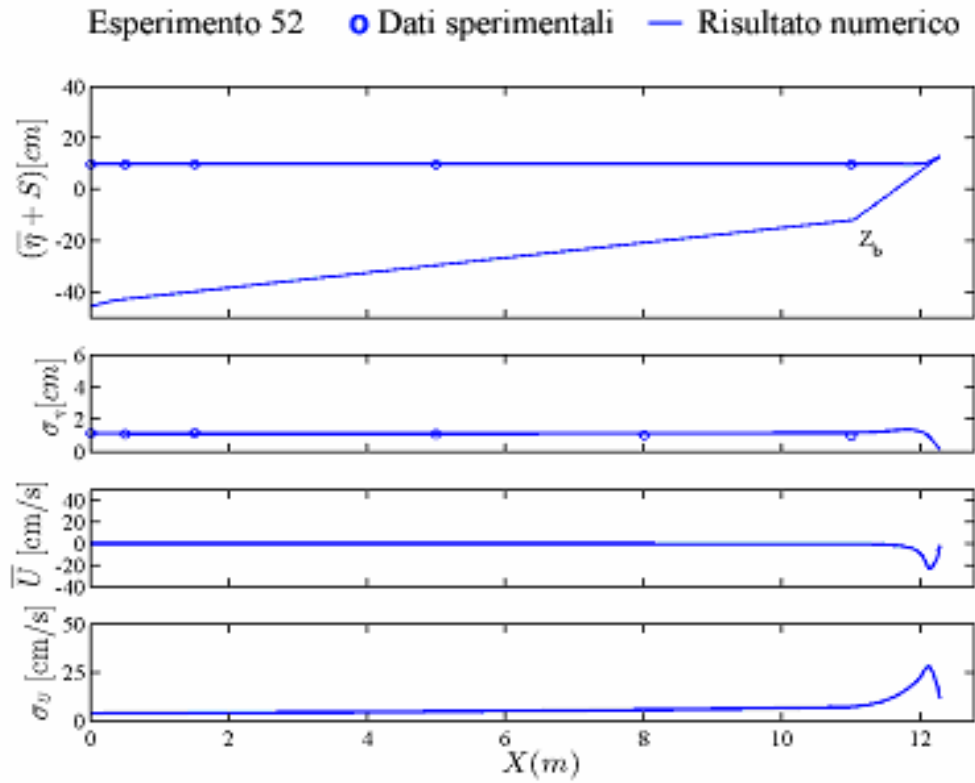


Figura B.52: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 52

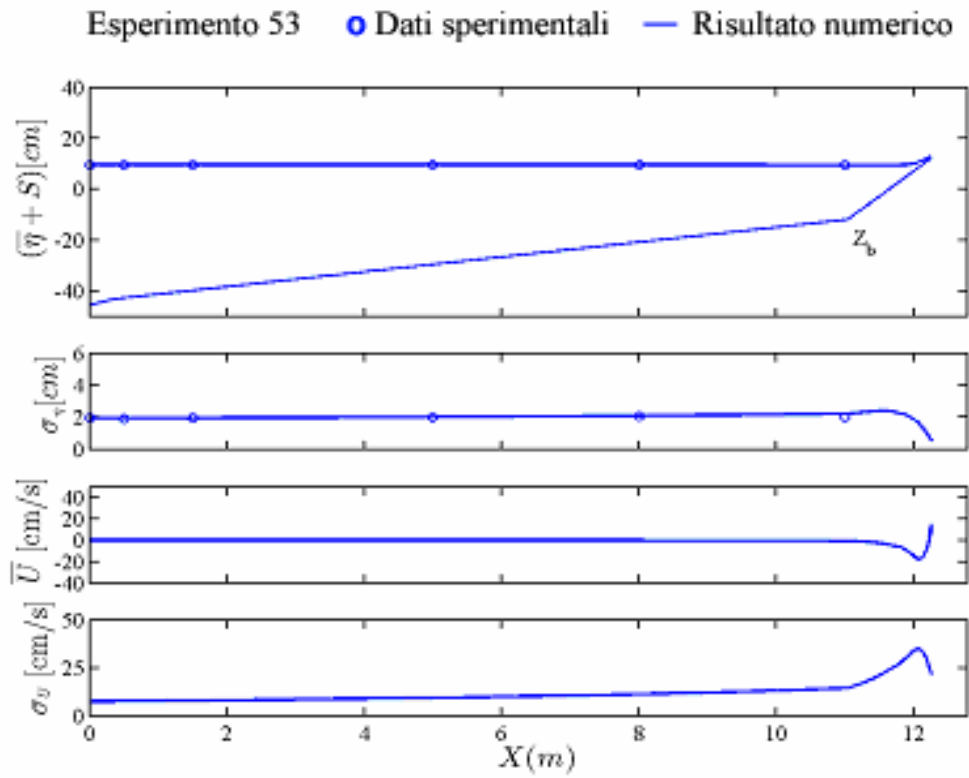


Figura B.53: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 53

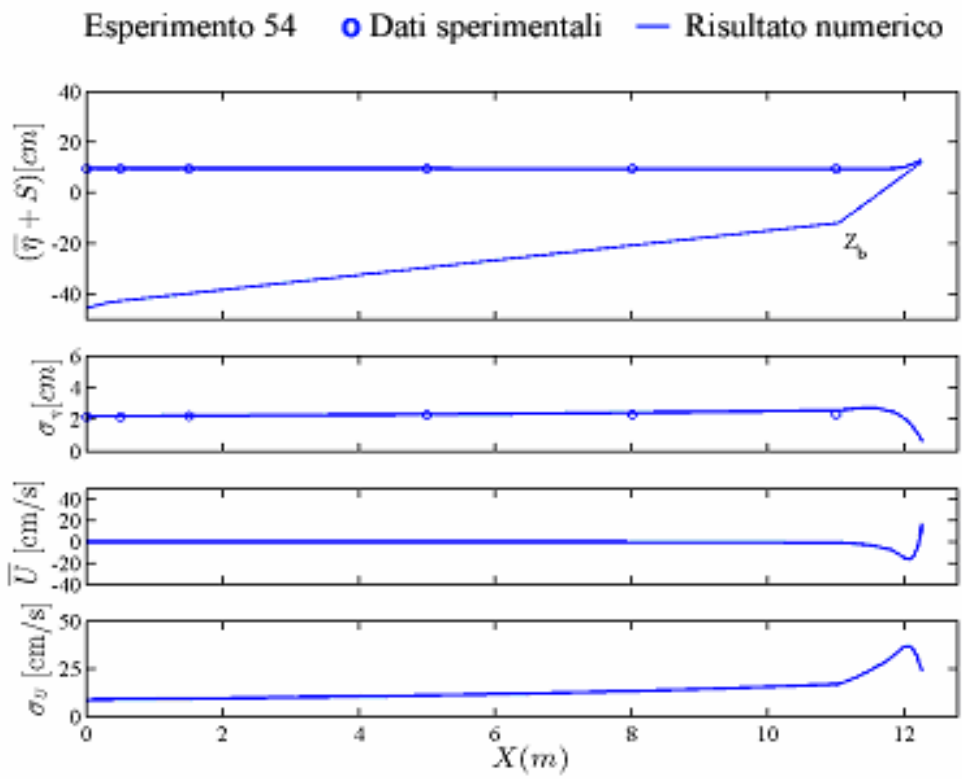


Figura B.54: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 54

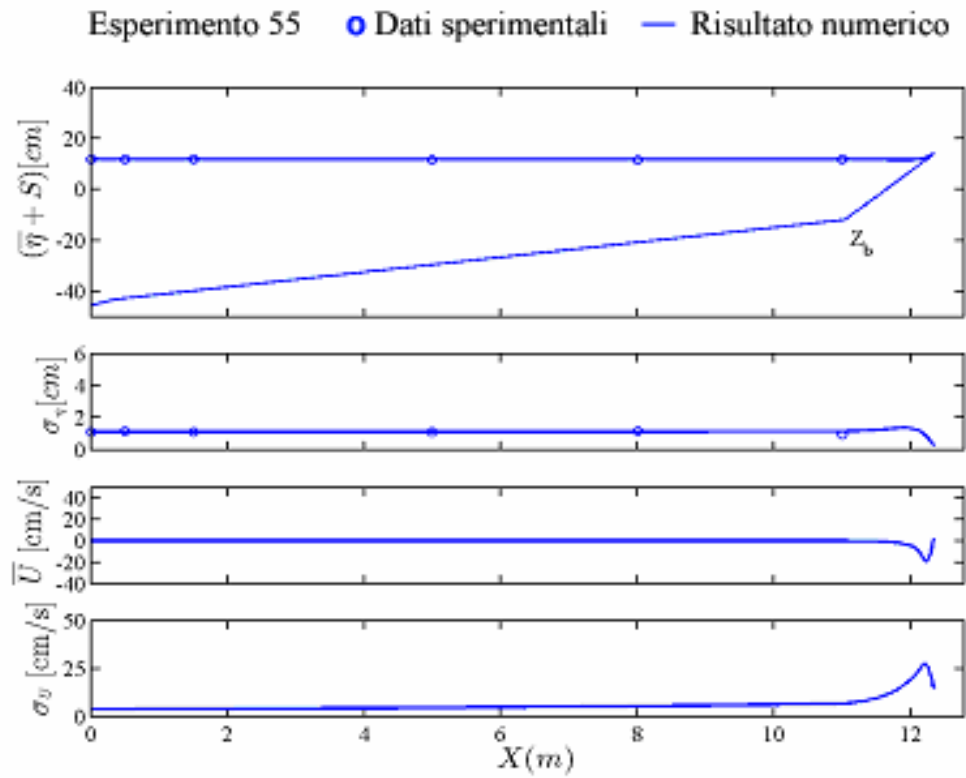


Figura B.55: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 55

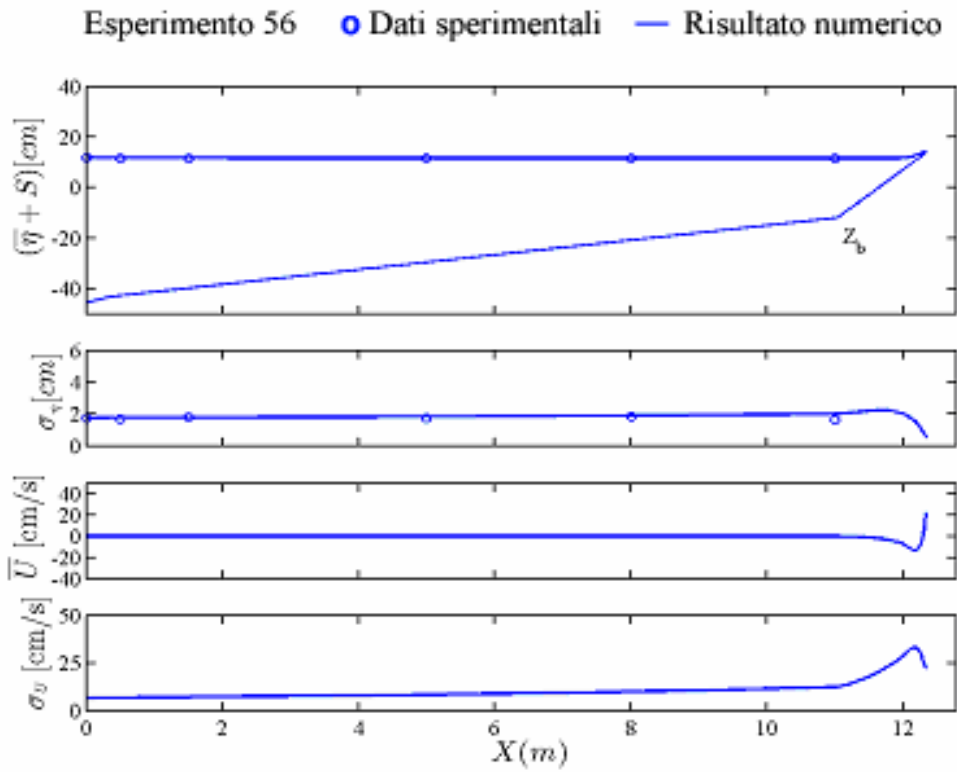


Figura B.56: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 56

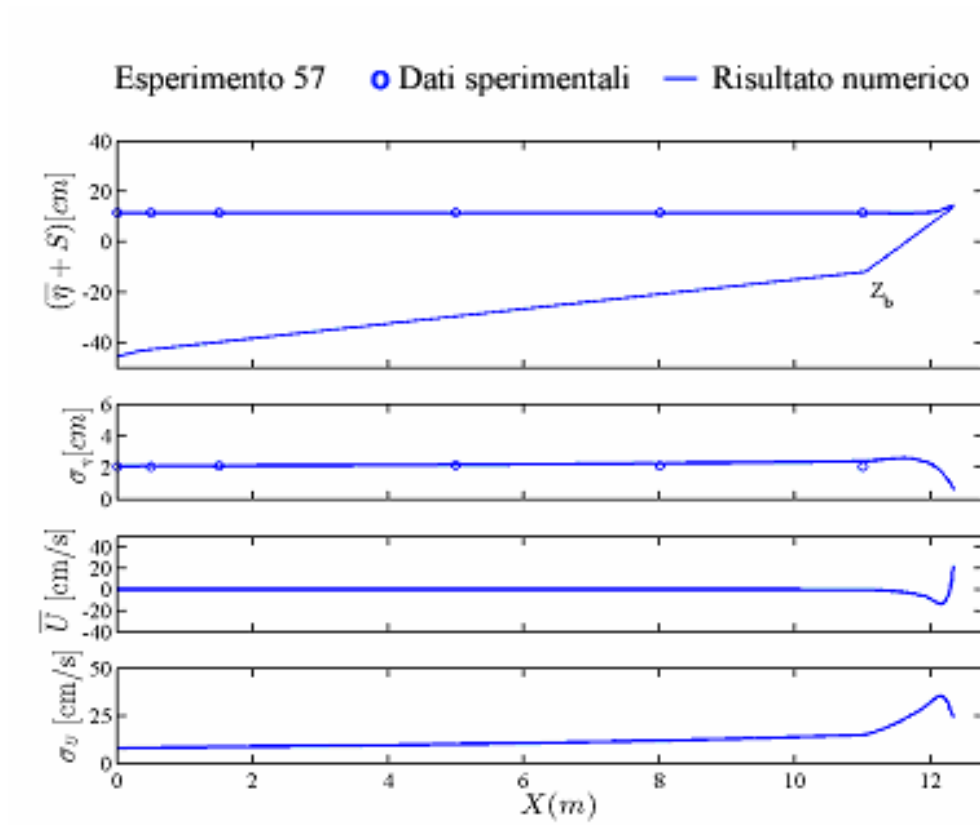


Figura B.57: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 57

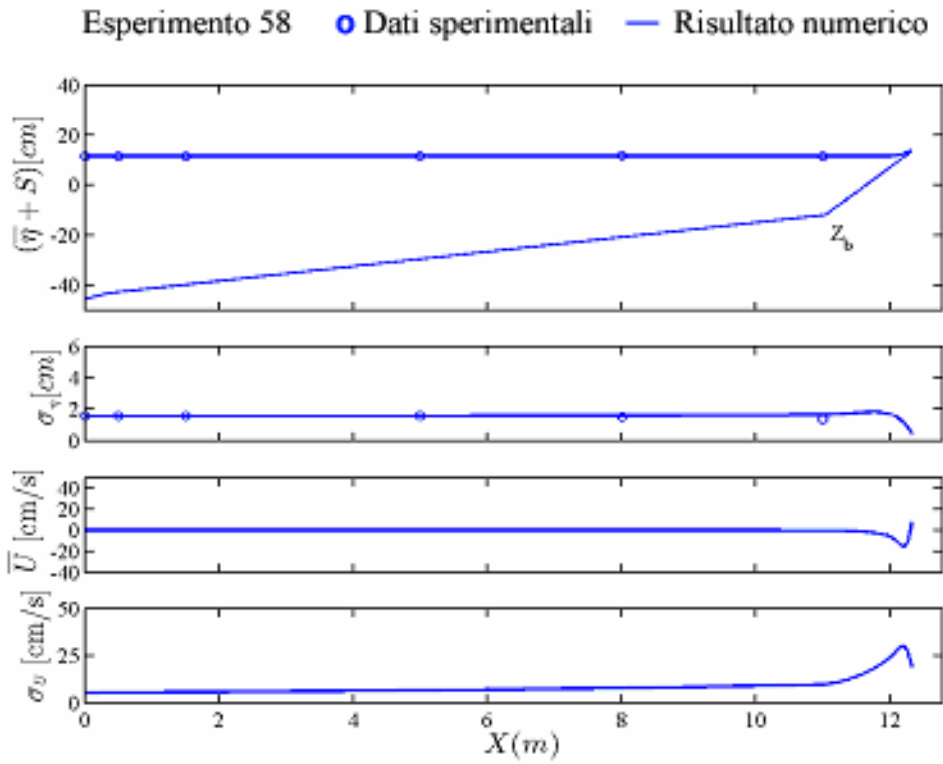


Figura B.58: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 58

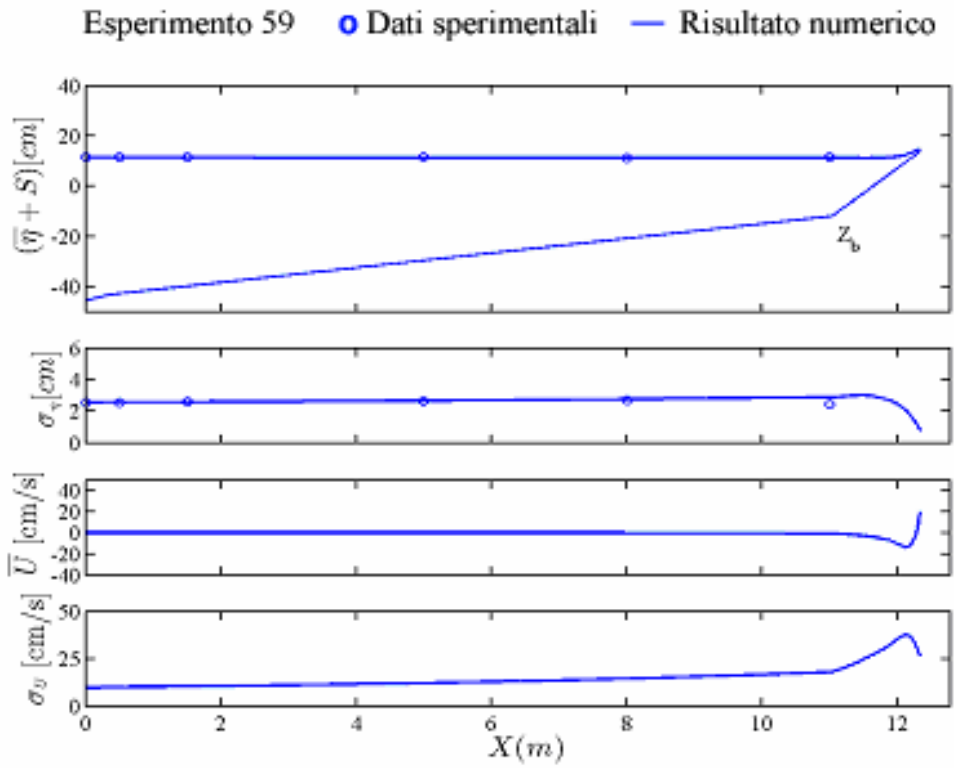


Figura B.59: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 59

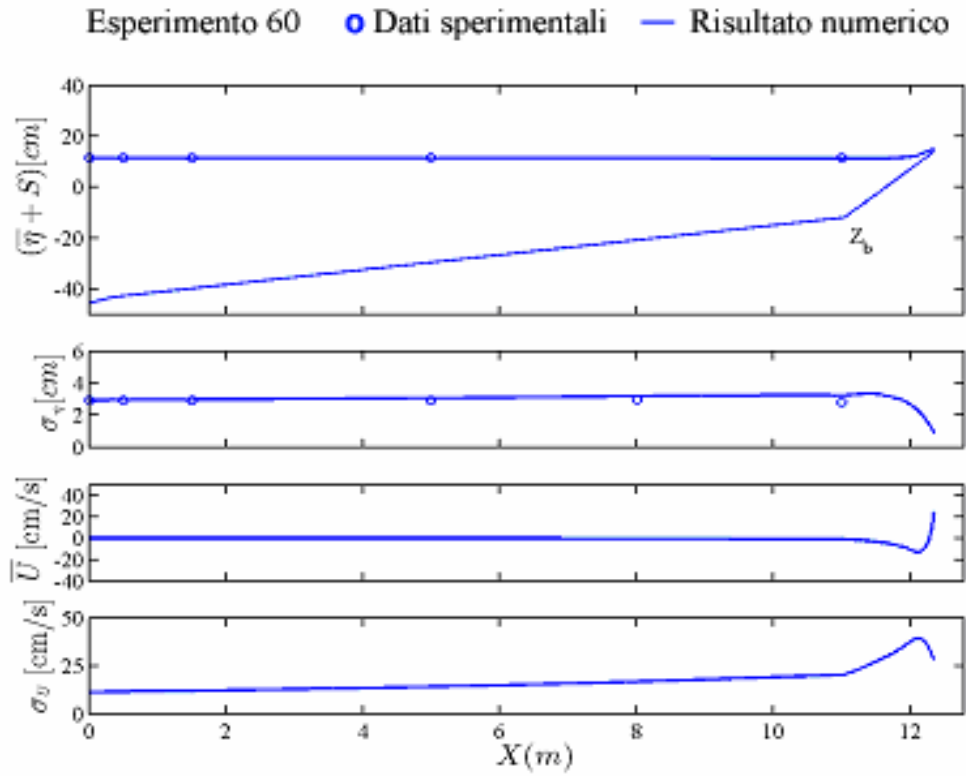


Figura B.60: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 60

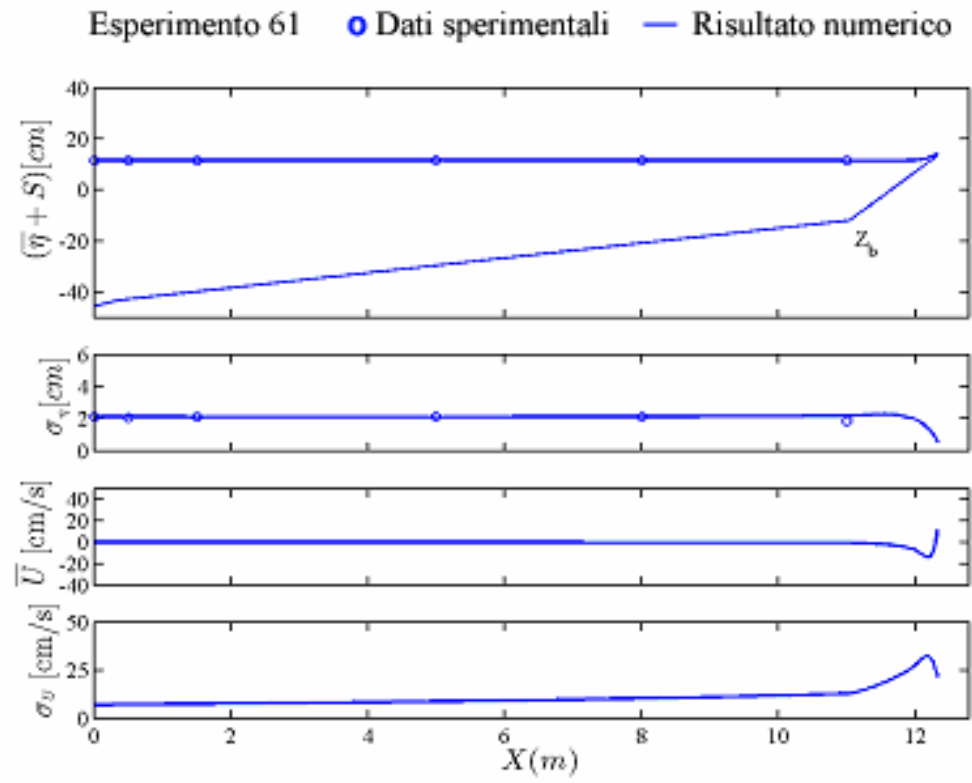


Figura B.61: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 61

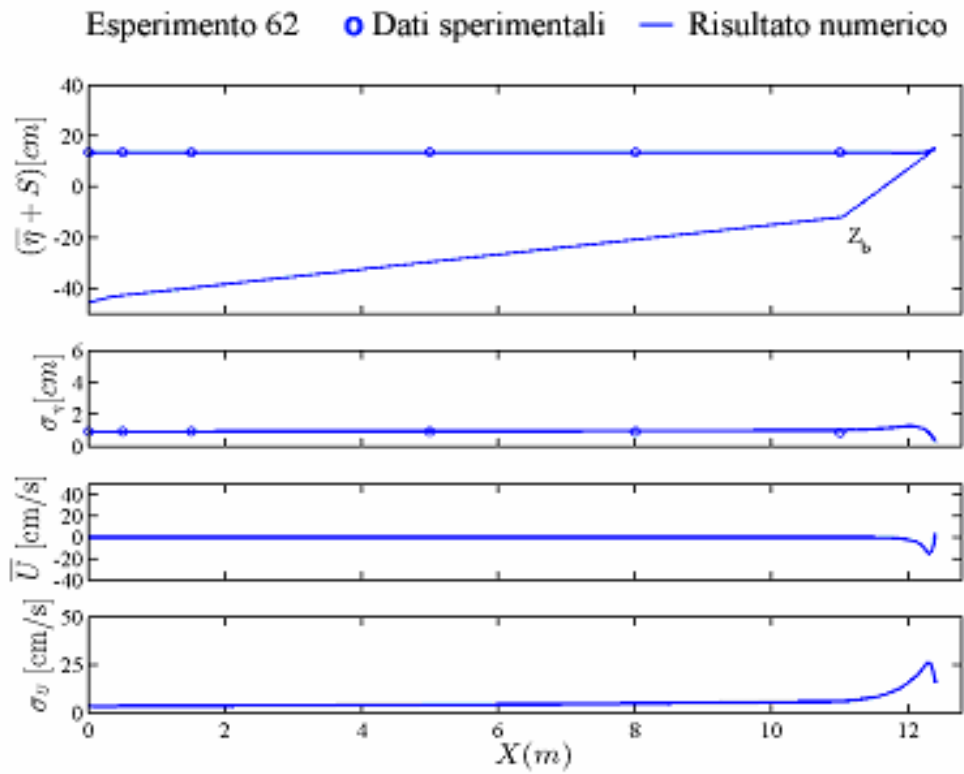


Figura B.62: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 62

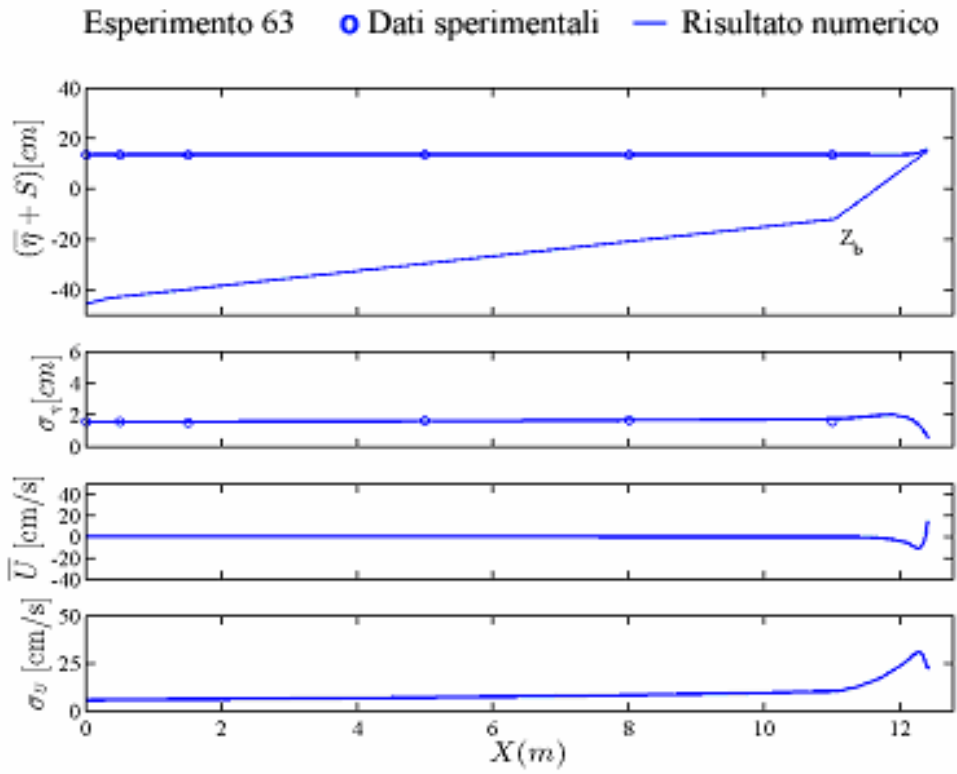


Figura B.63: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 63

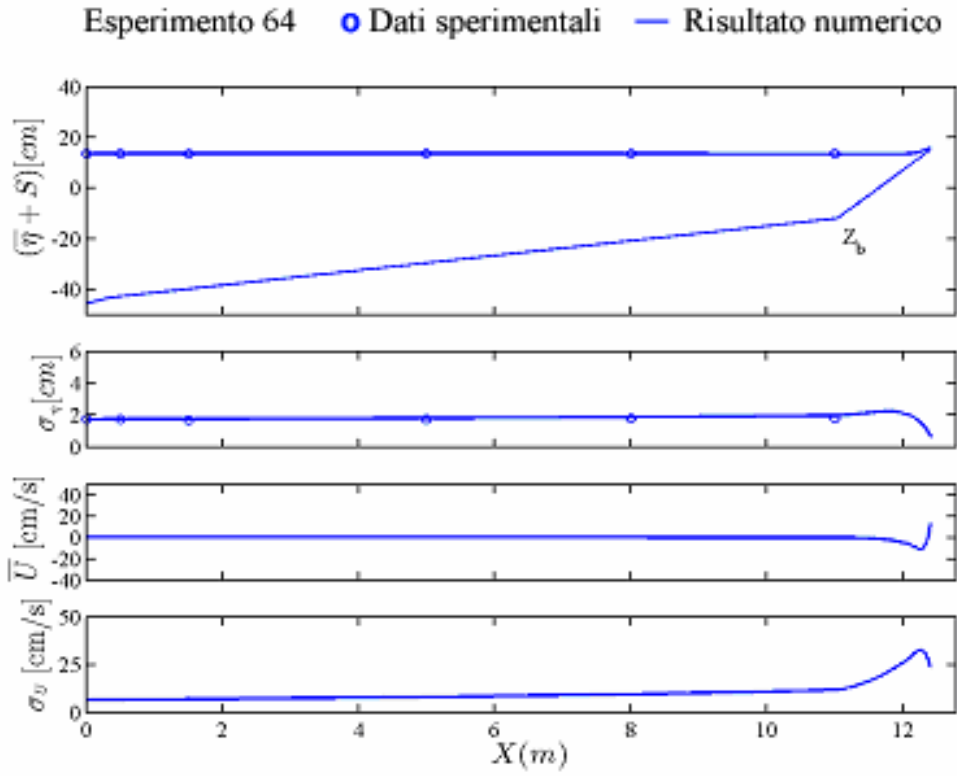


Figura B.64: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 64

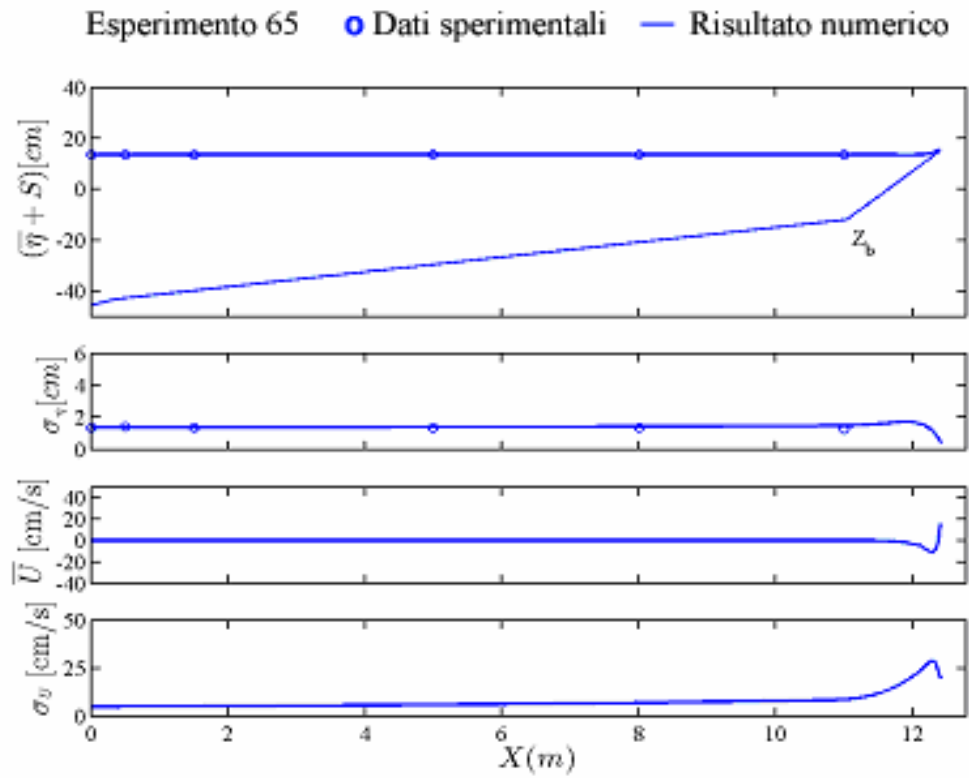


Figura B.65: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 65

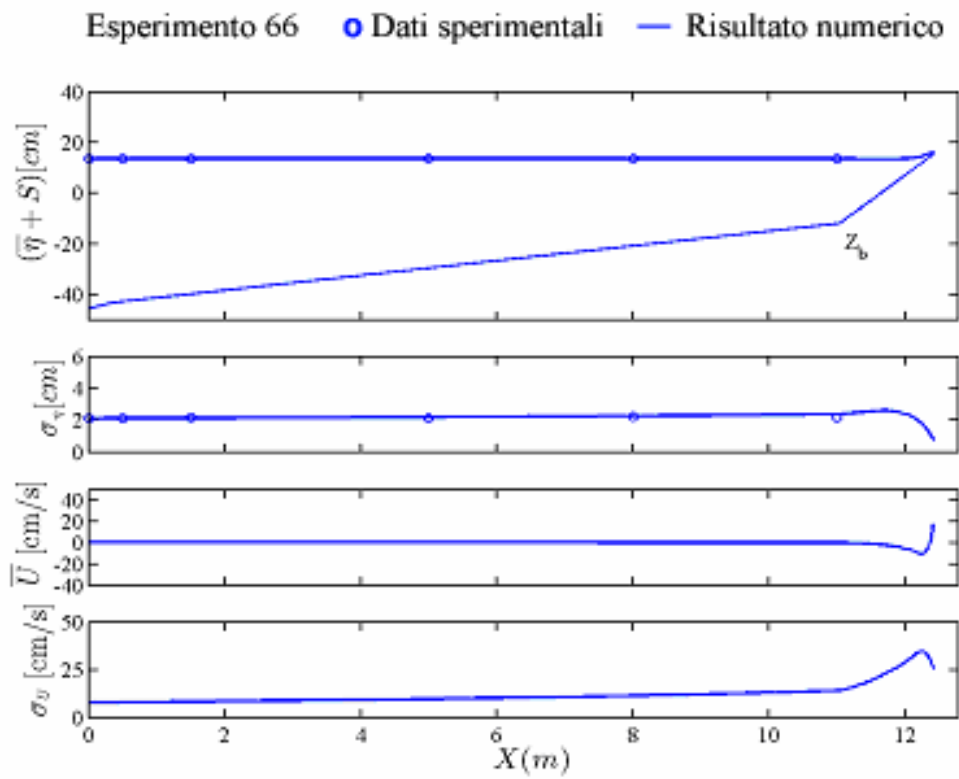


Figura B.66: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 66

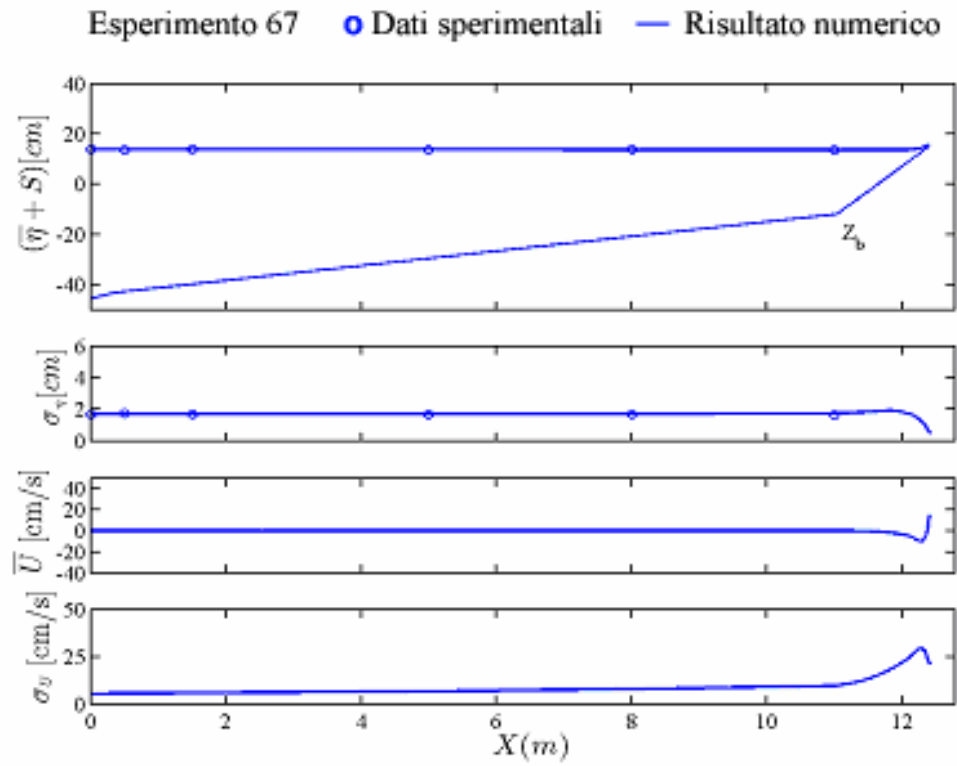


Figura B.67: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 67

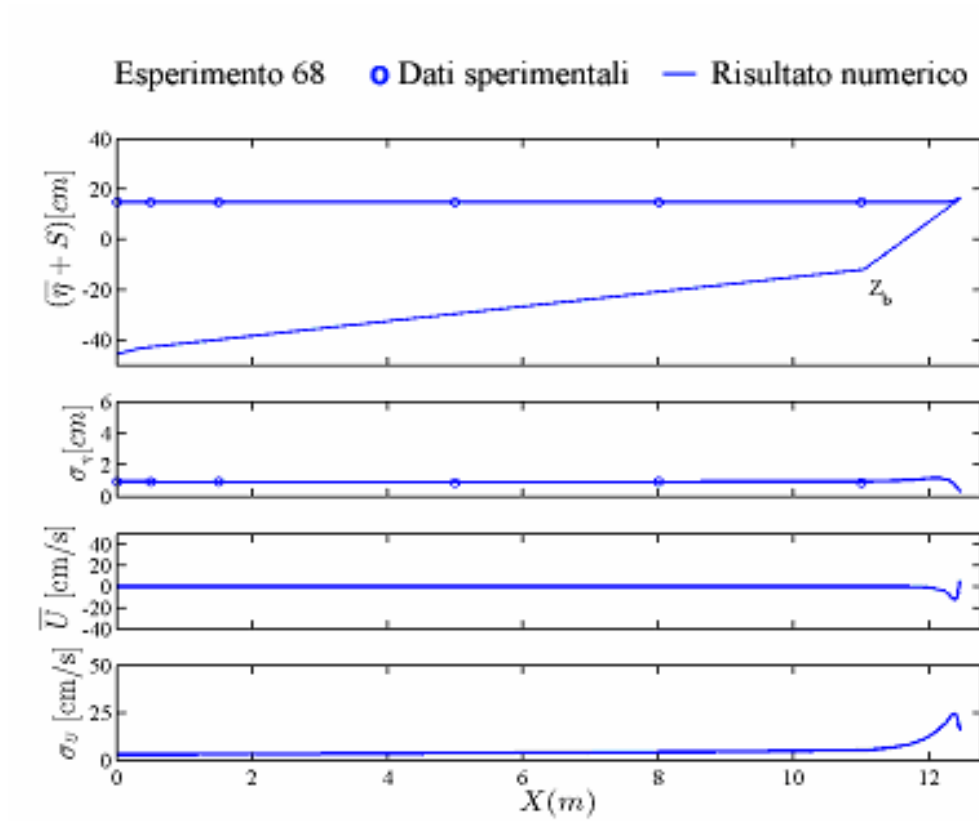


Figura B.68: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 68

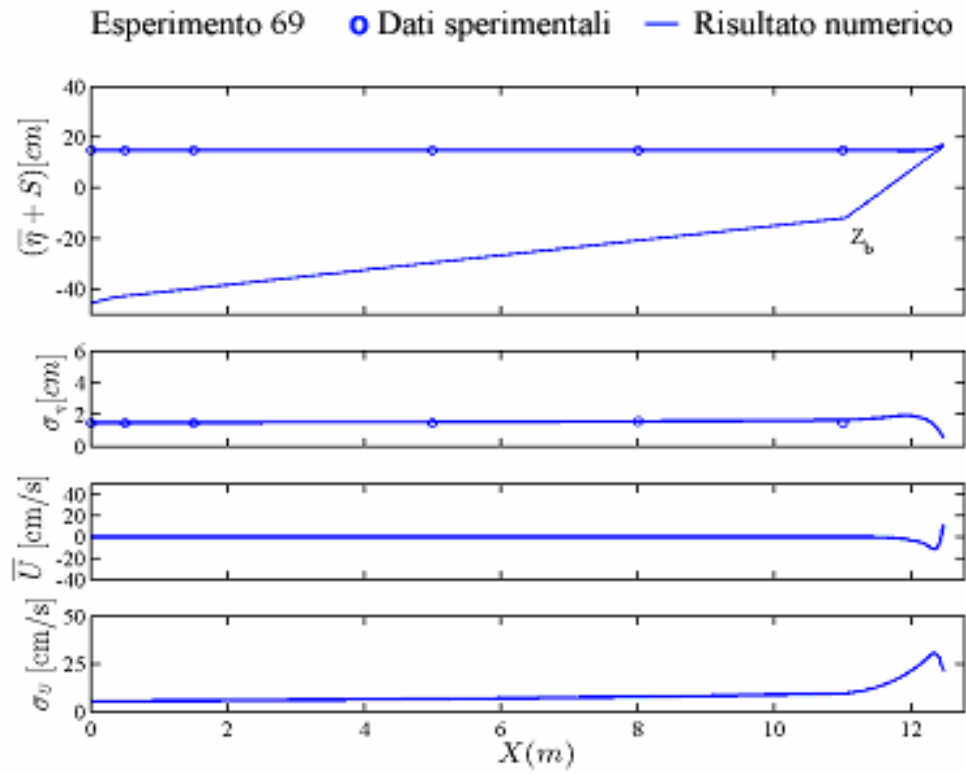


Figura B.69: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 69

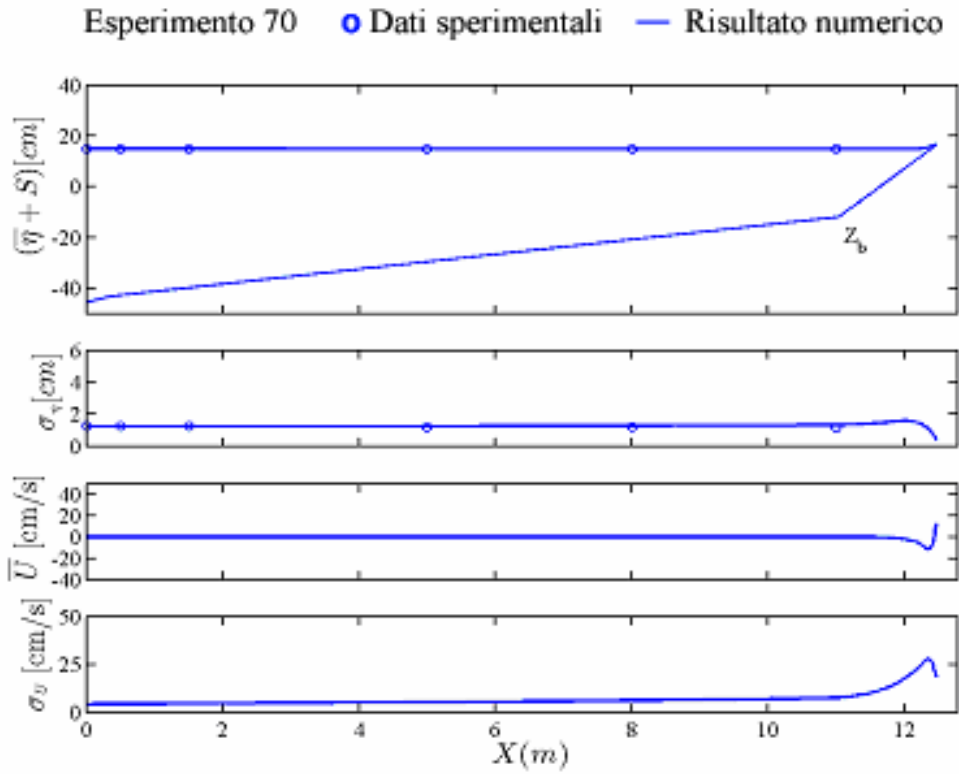


Figura B.70: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 70

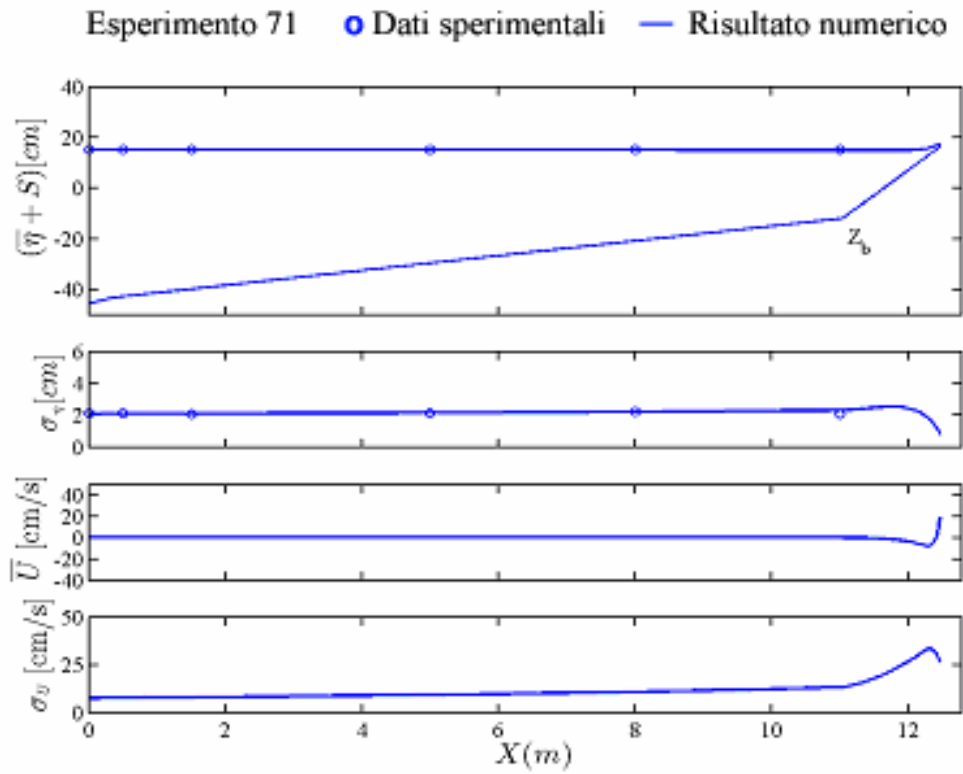


Figura B.71: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 71

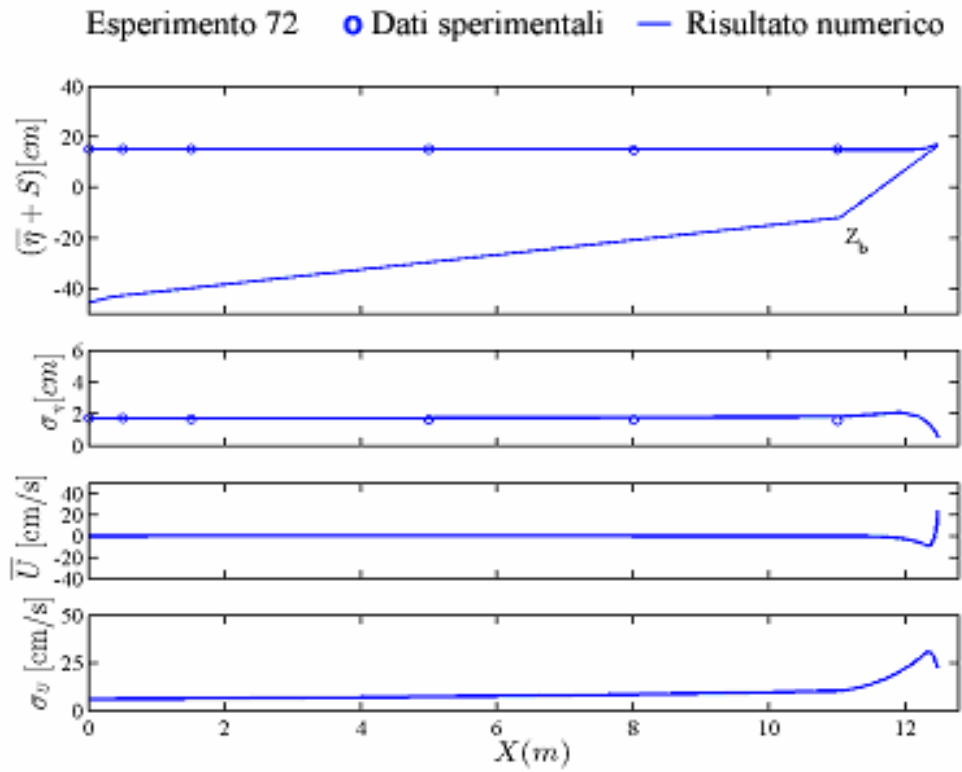


Figura B.72: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 72

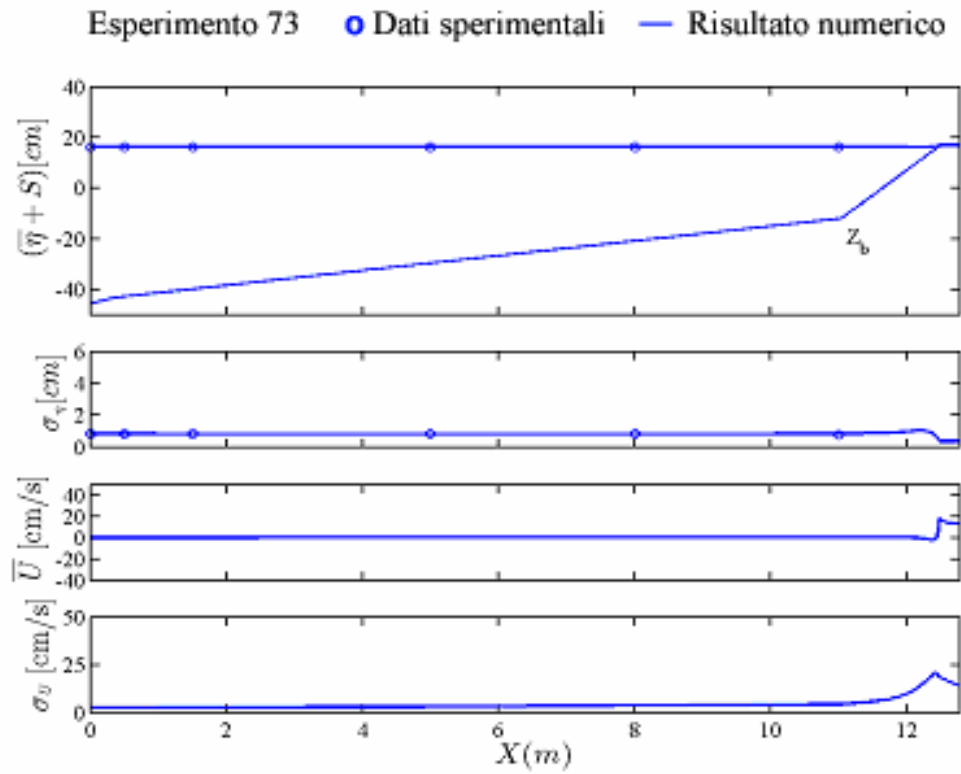


Figura B.73: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 73

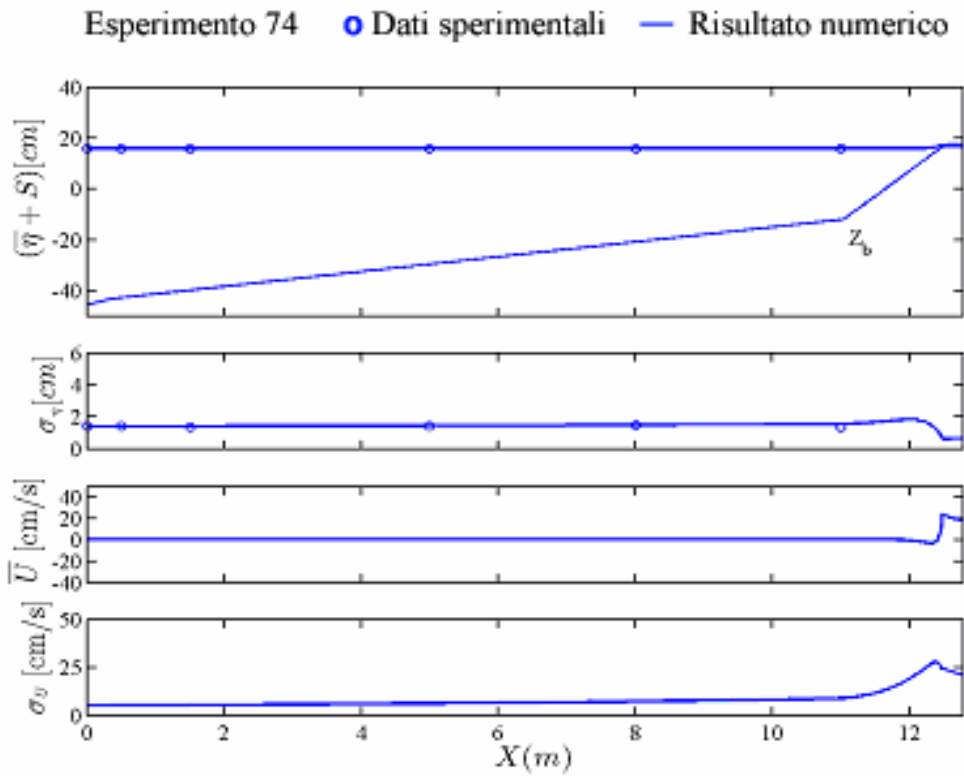


Figura B.74: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 74

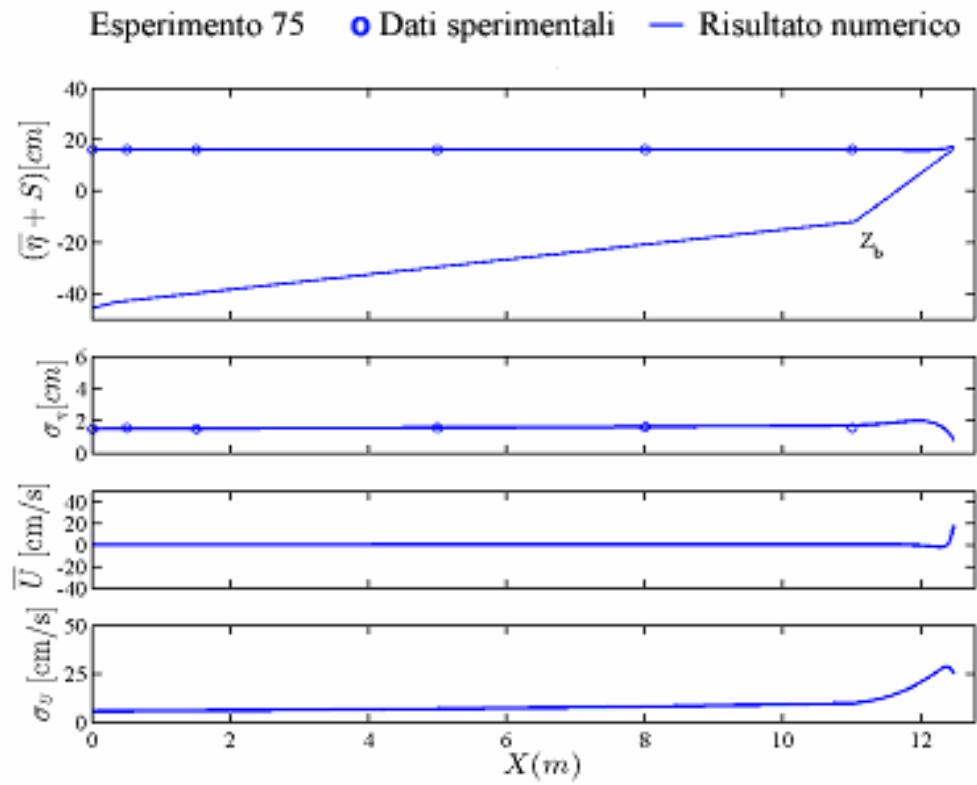


Figura B.75: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 75

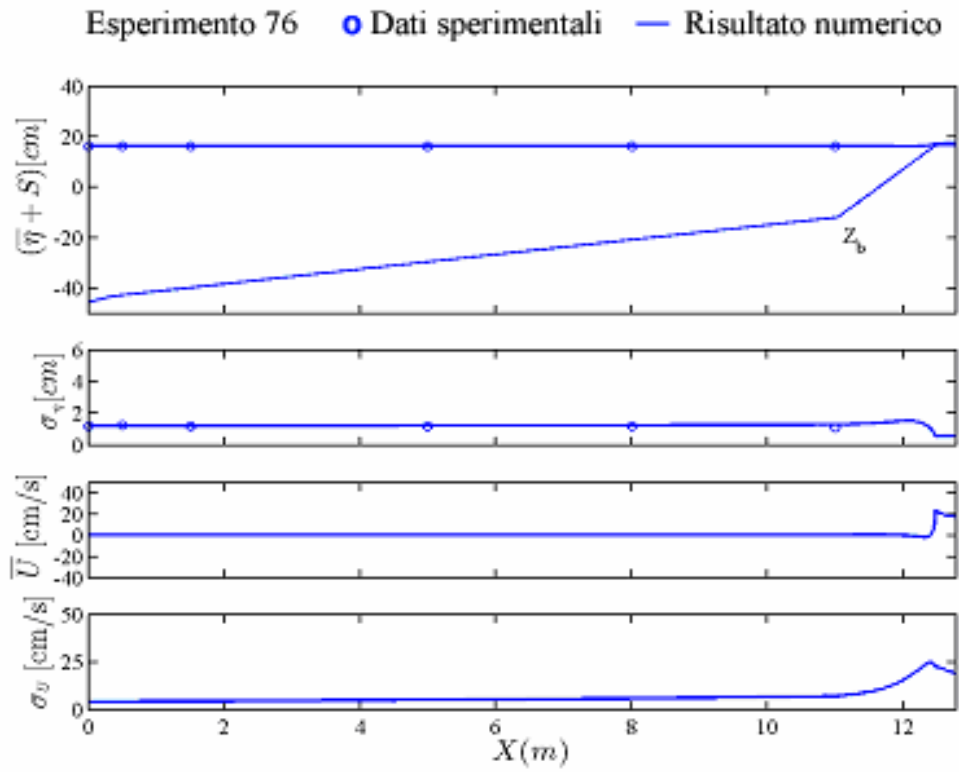


Figura B.76: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 76

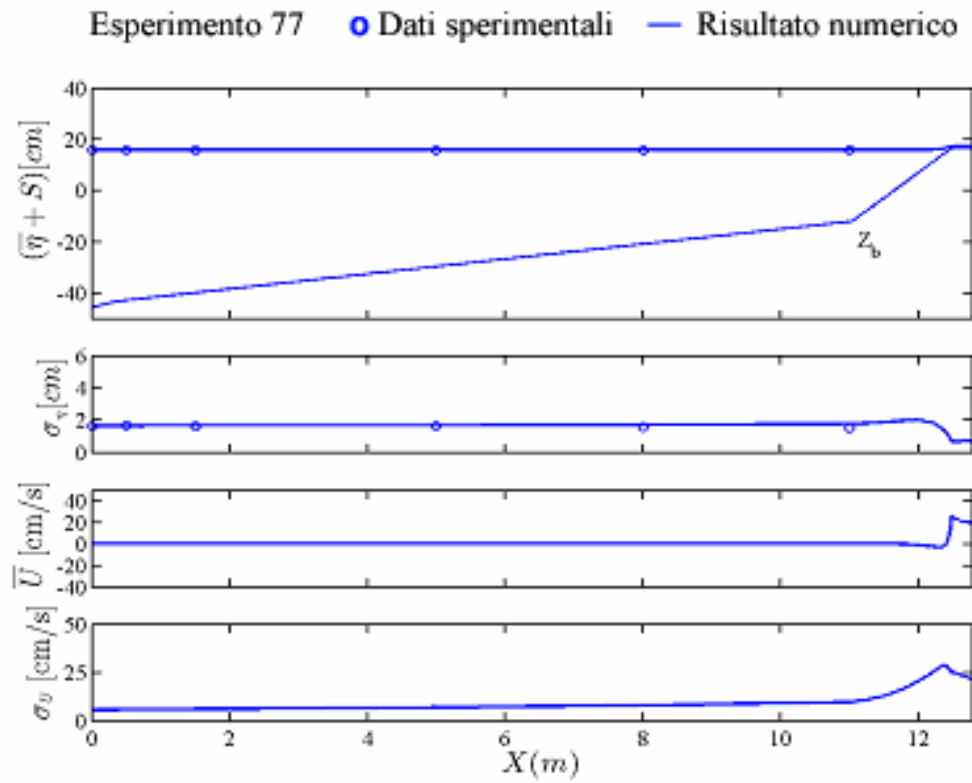


Figura B.77: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 77

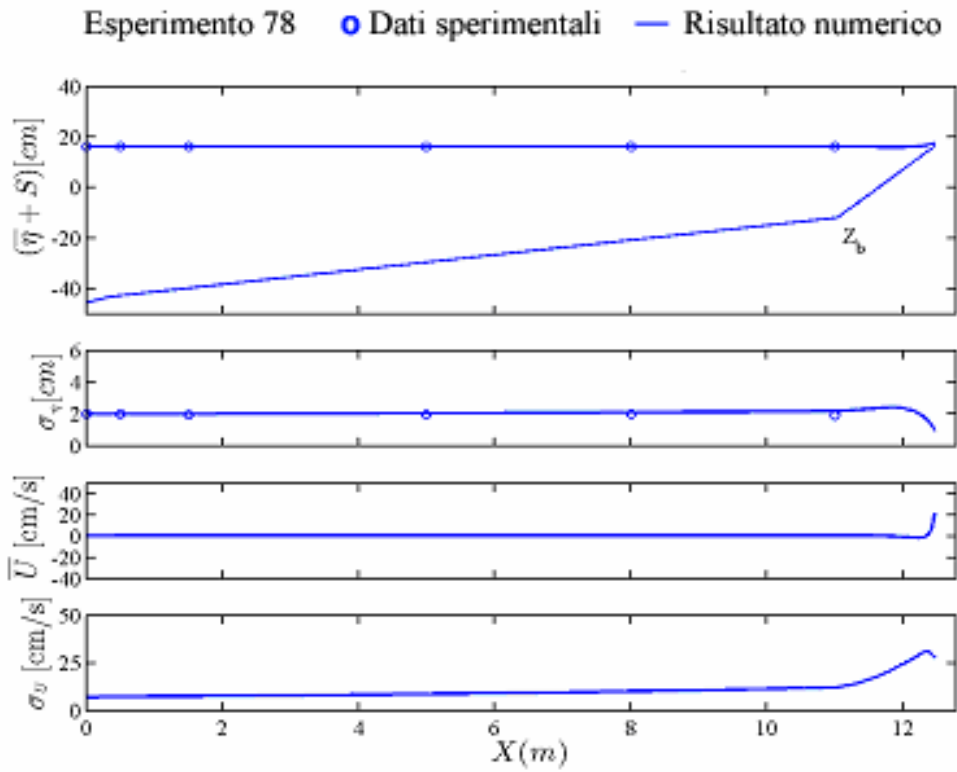


Figura B.78: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 78

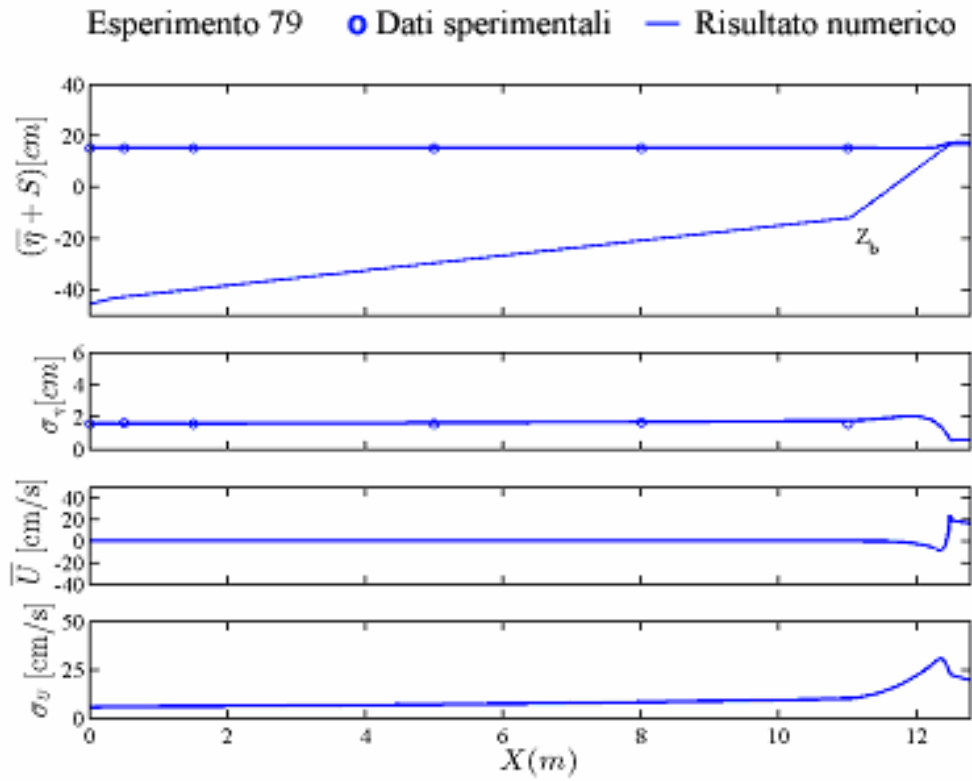


Figura B.79: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 79

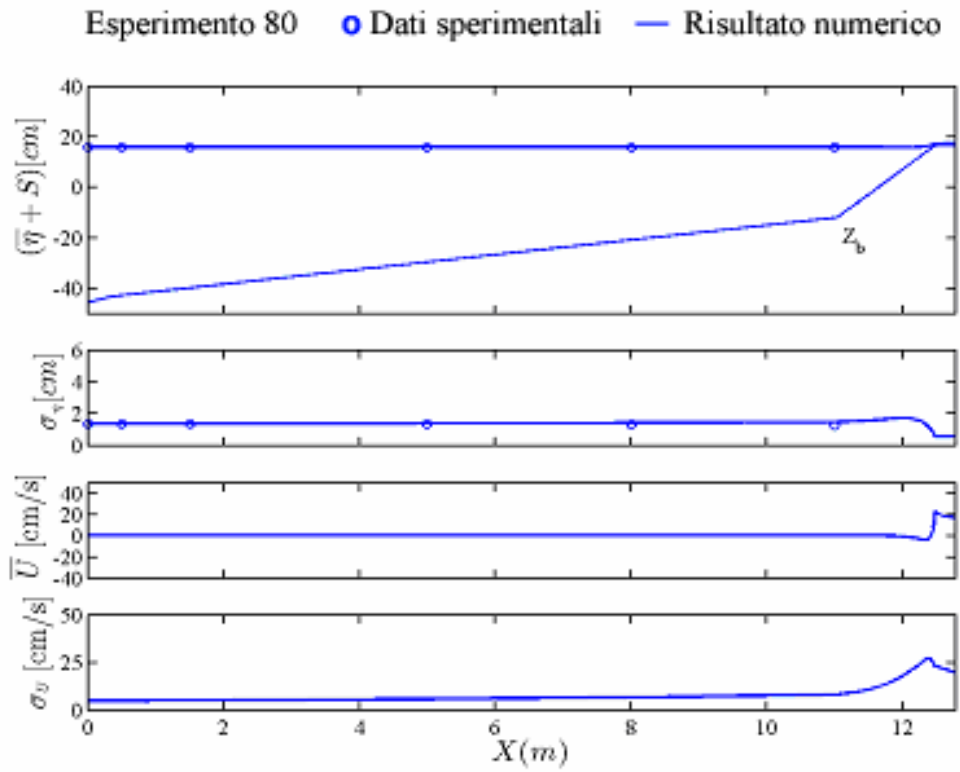


Figura B.80: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 80

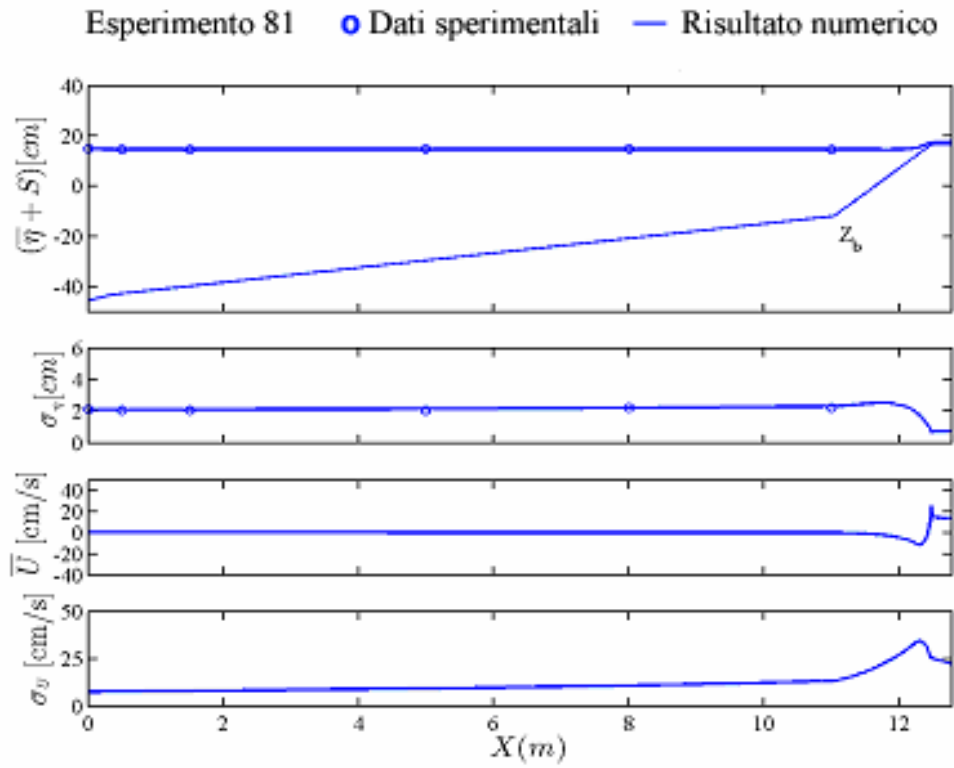


Figura B.81: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 81

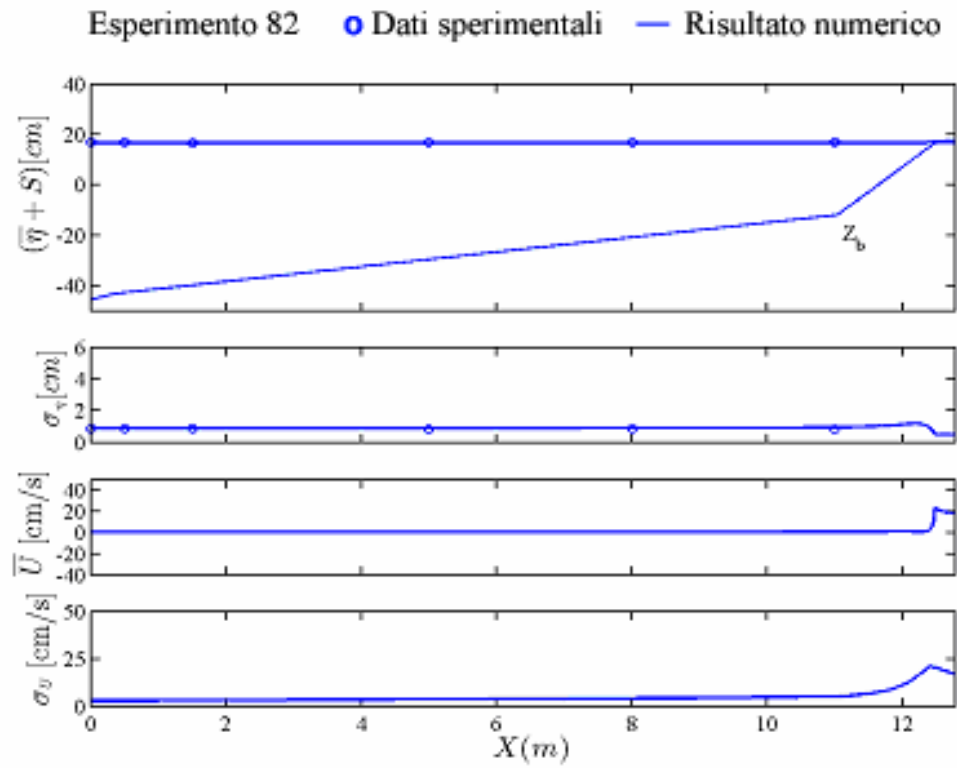


Figura B.82: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 82

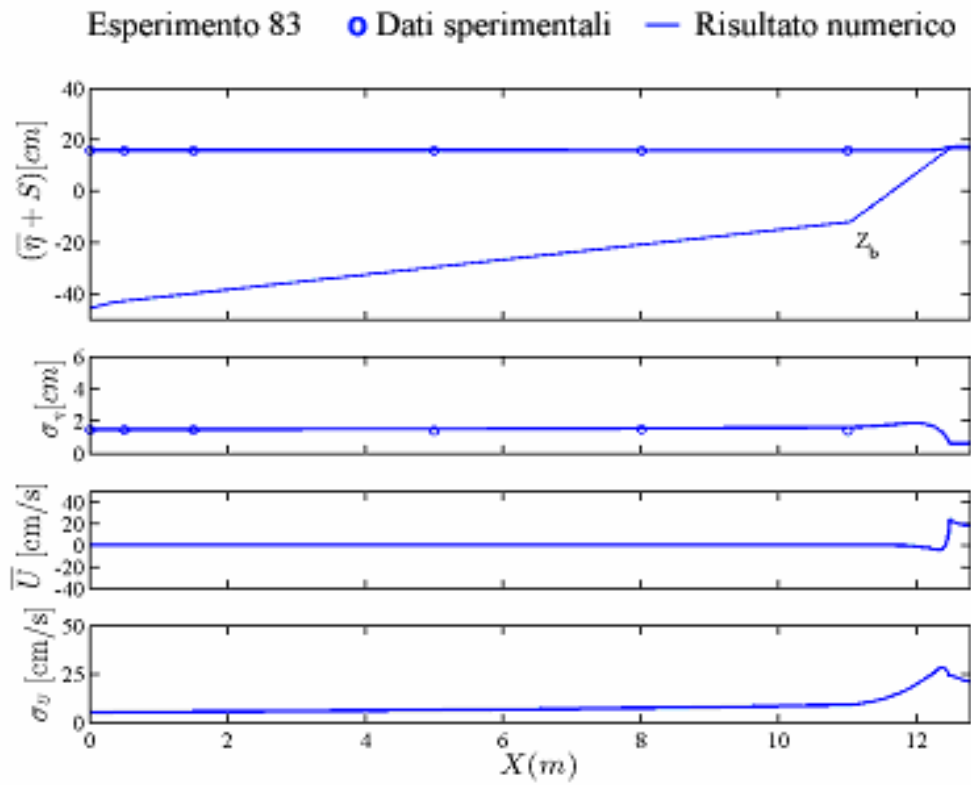


Figura B.83: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 83

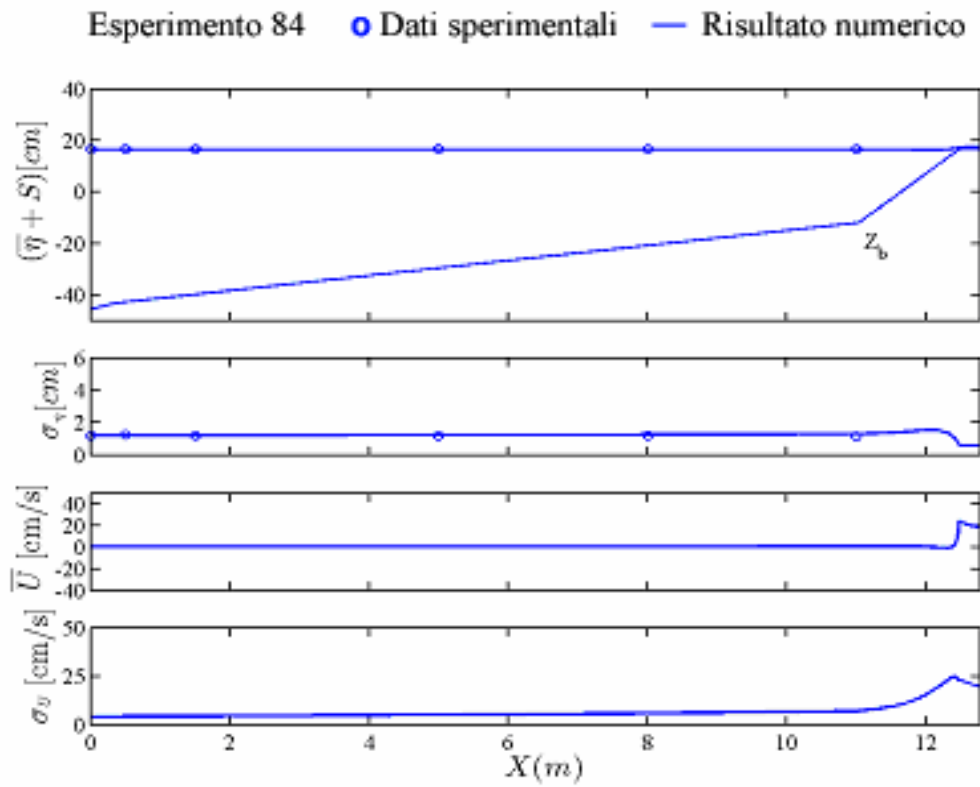


Figura B.84: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 84

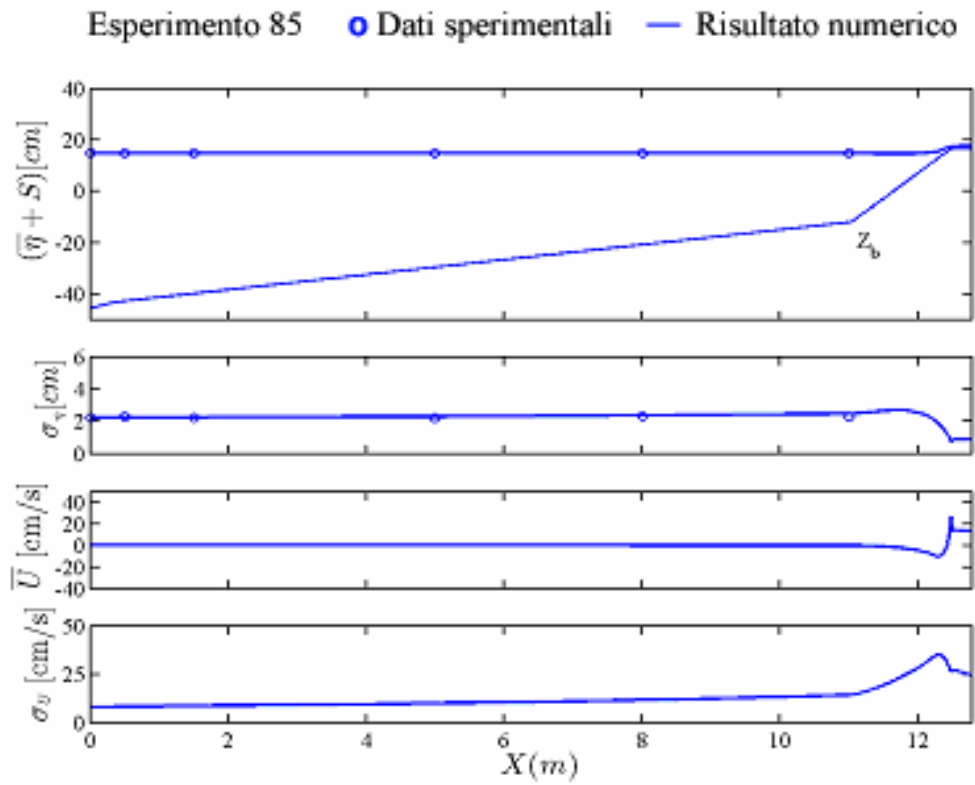


Figura B.85: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 85

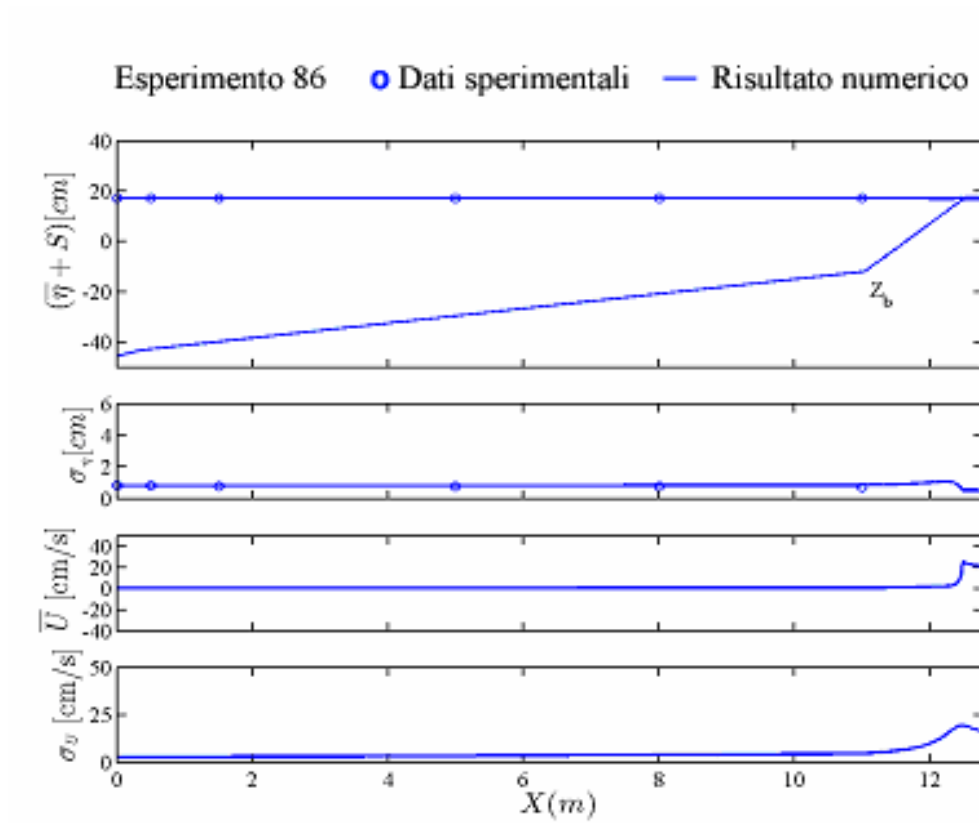


Figura B.86: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 86

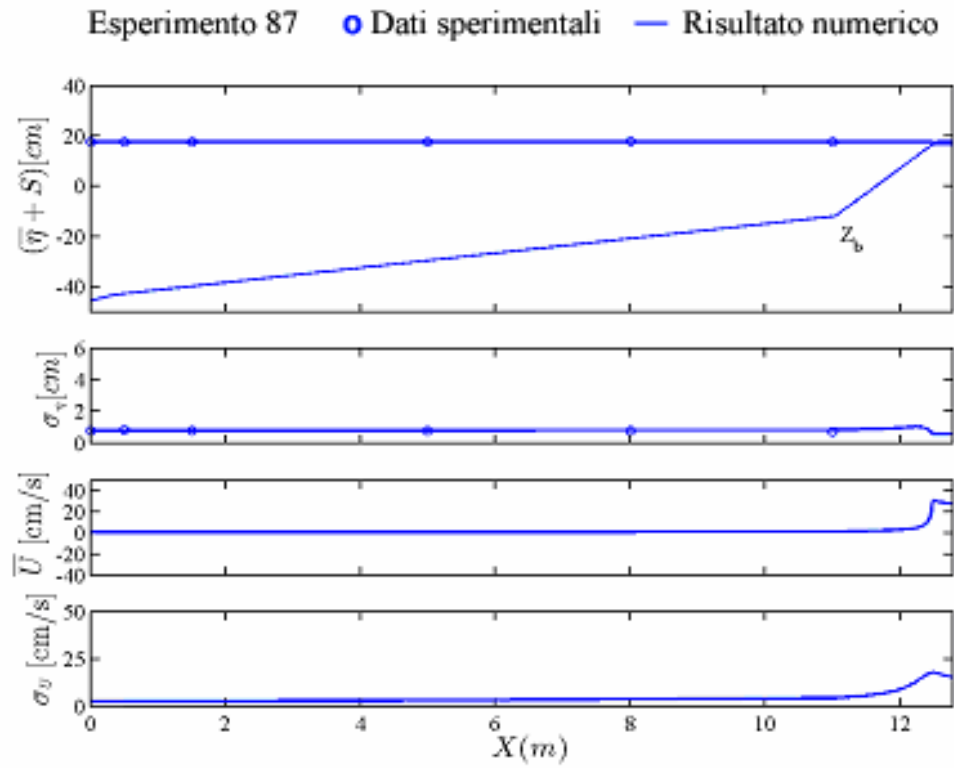


Figura B.87: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 87

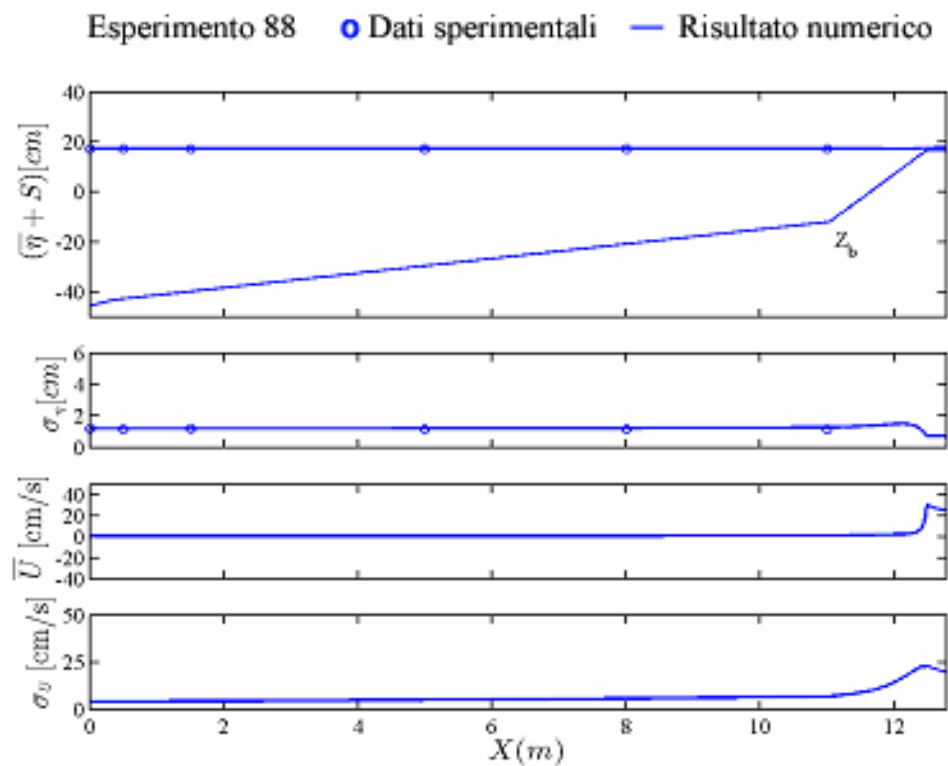


Figura B.88: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 88

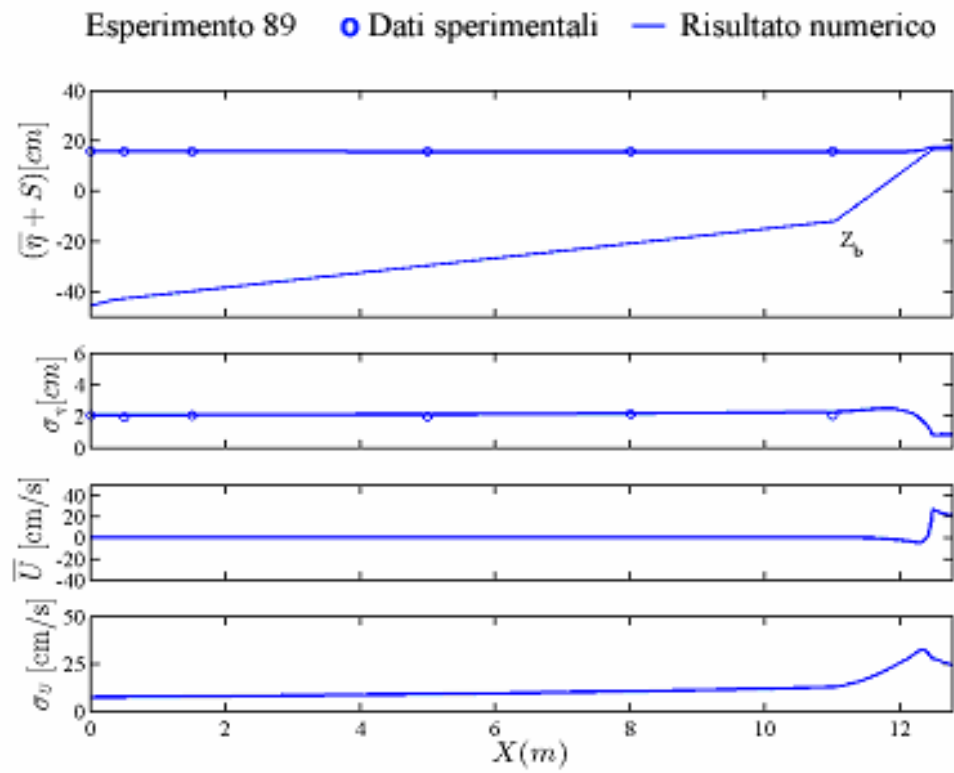


Figura B.89: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 89

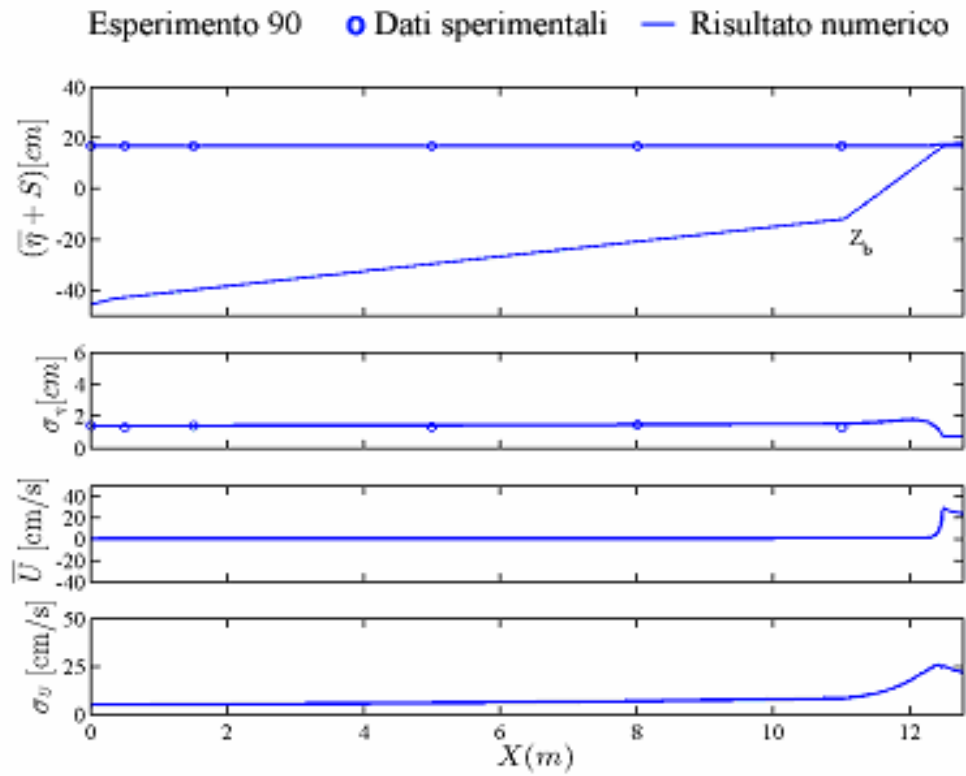


Figura B.90: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 90

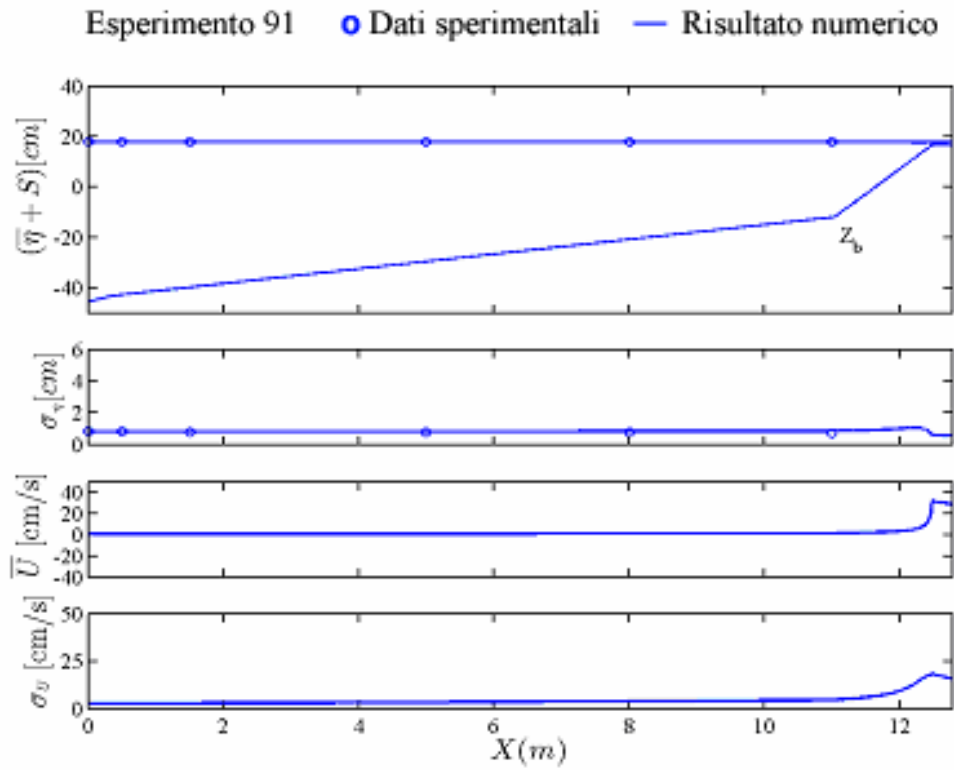


Figura B.91: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 91

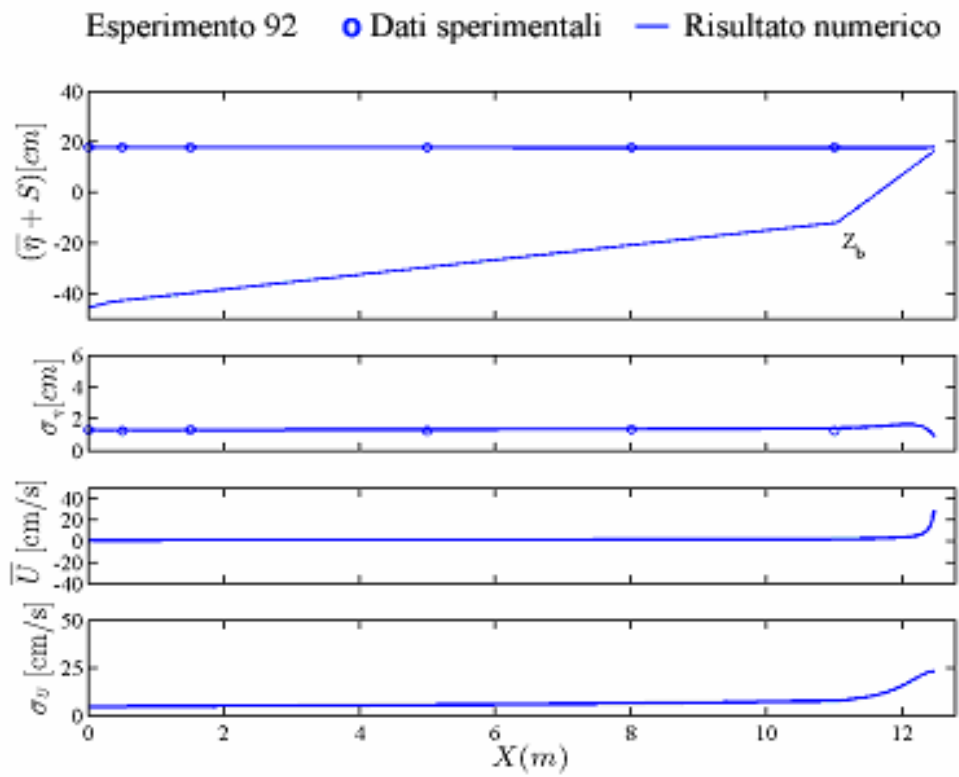


Figura B.92: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 92

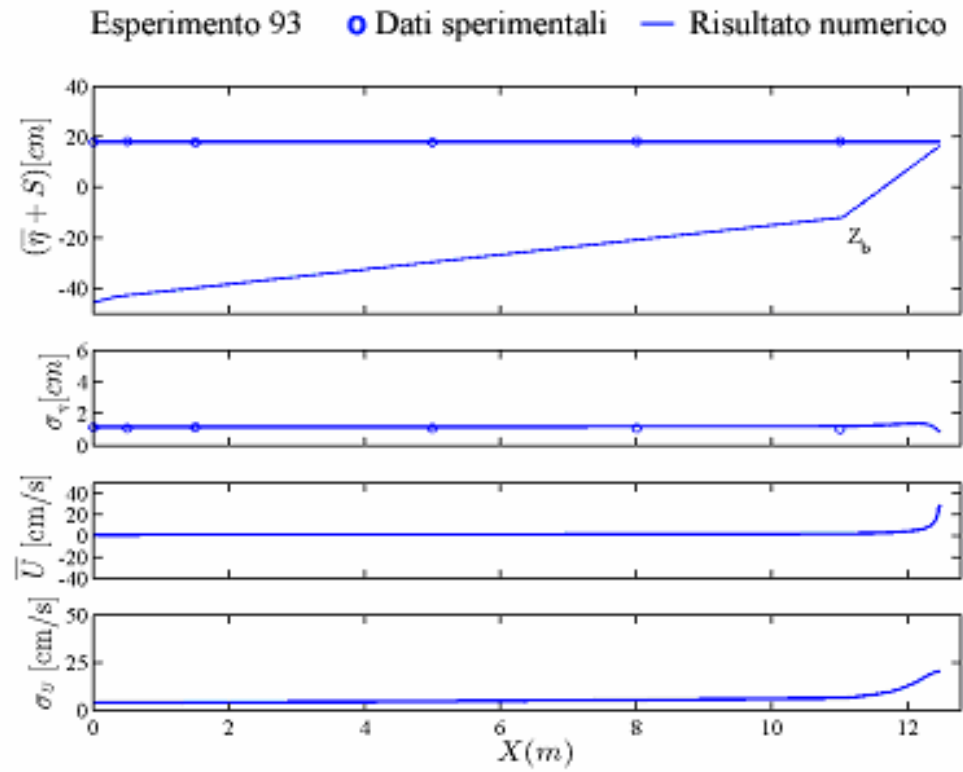


Figura B.93: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 93

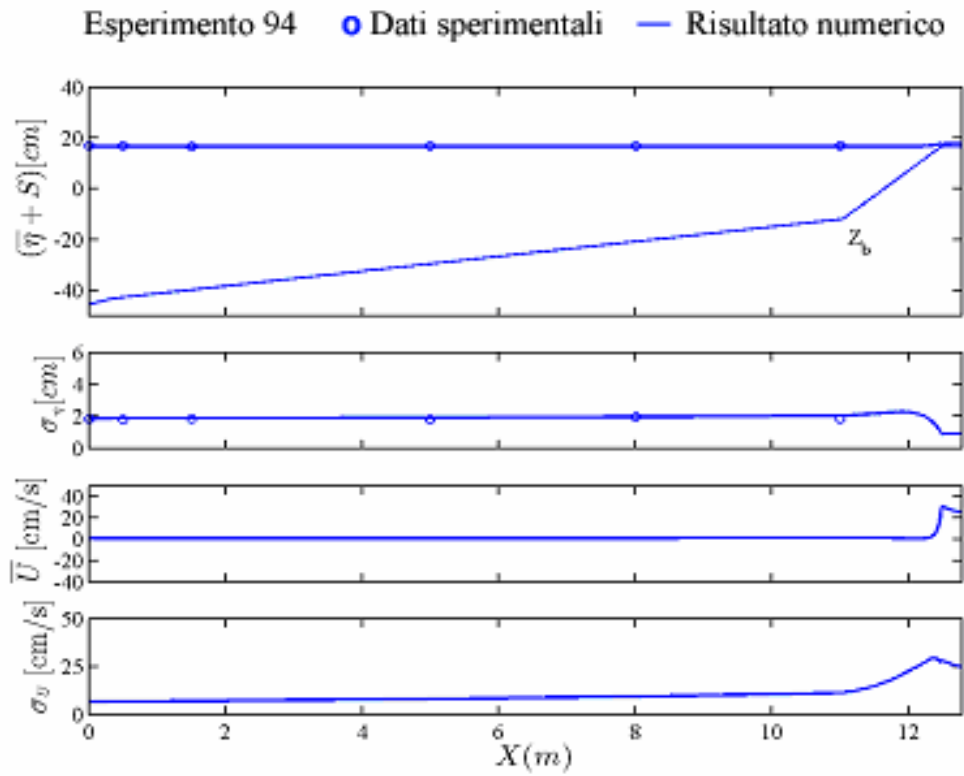


Figura B.94: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 94

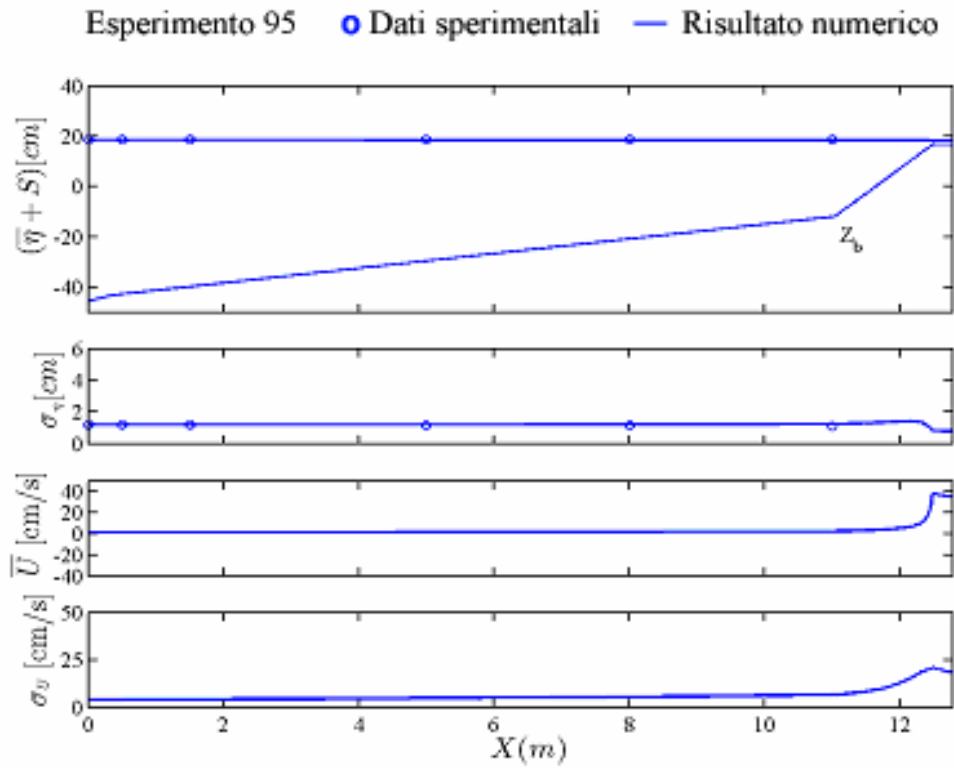


Figura B.95: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 95

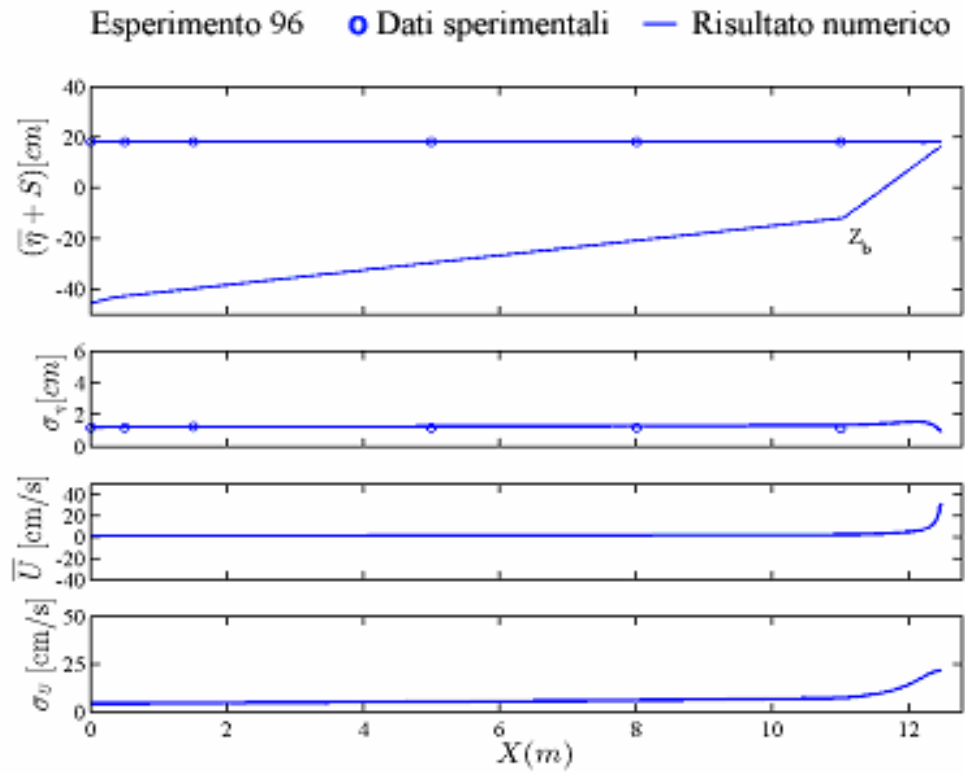


Figura B.96: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 96

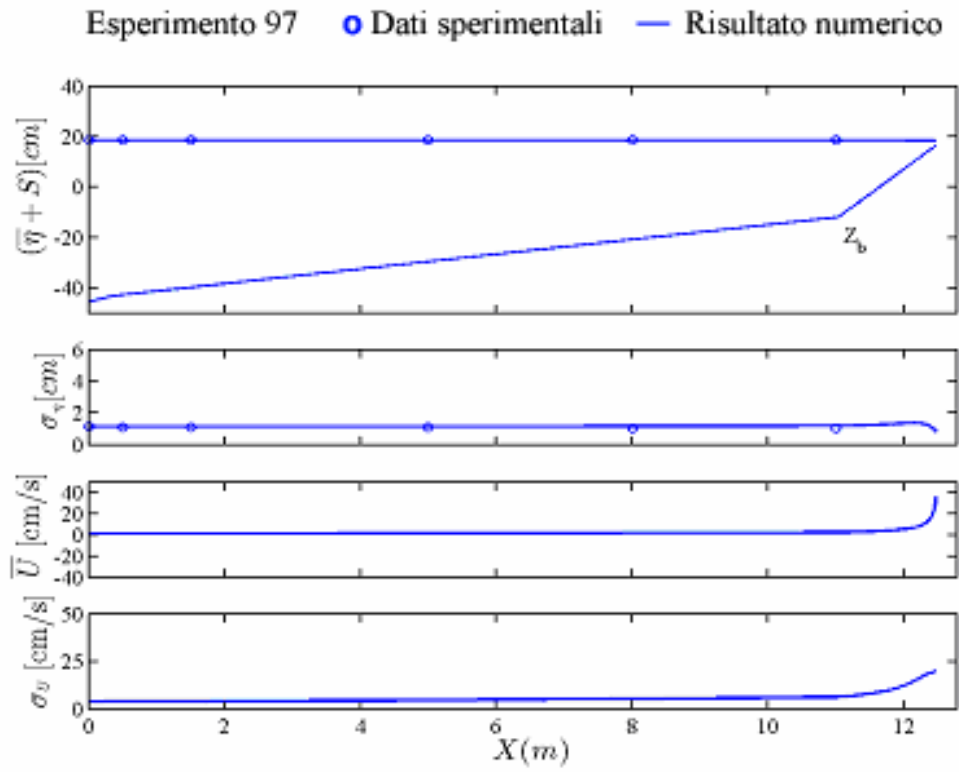


Figura B.97: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 97

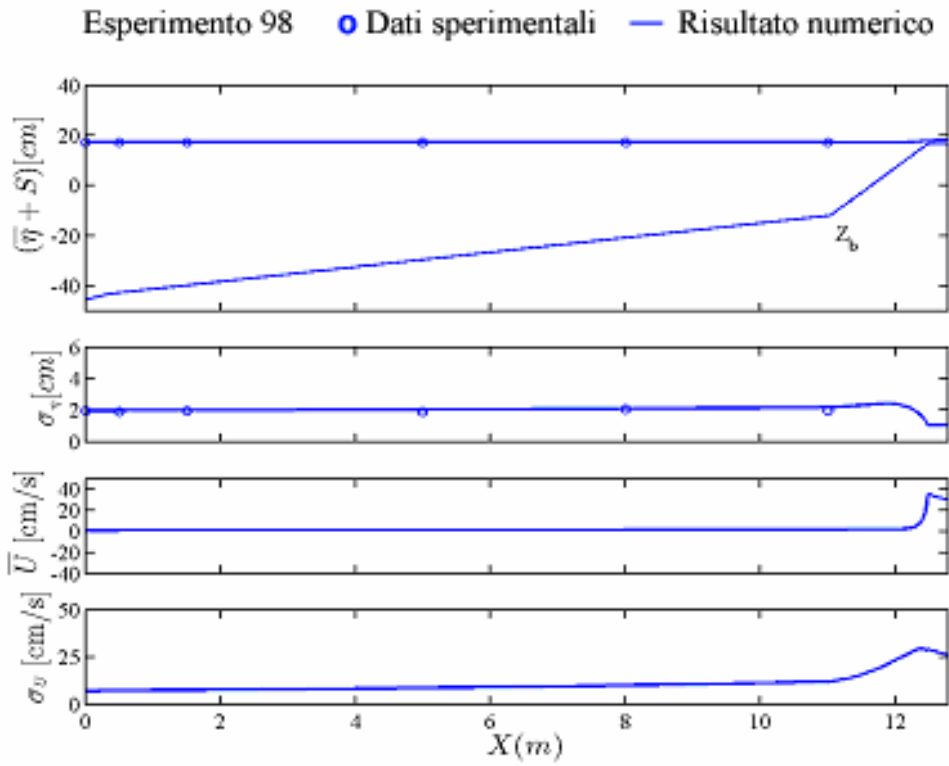


Figura B.98: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 98

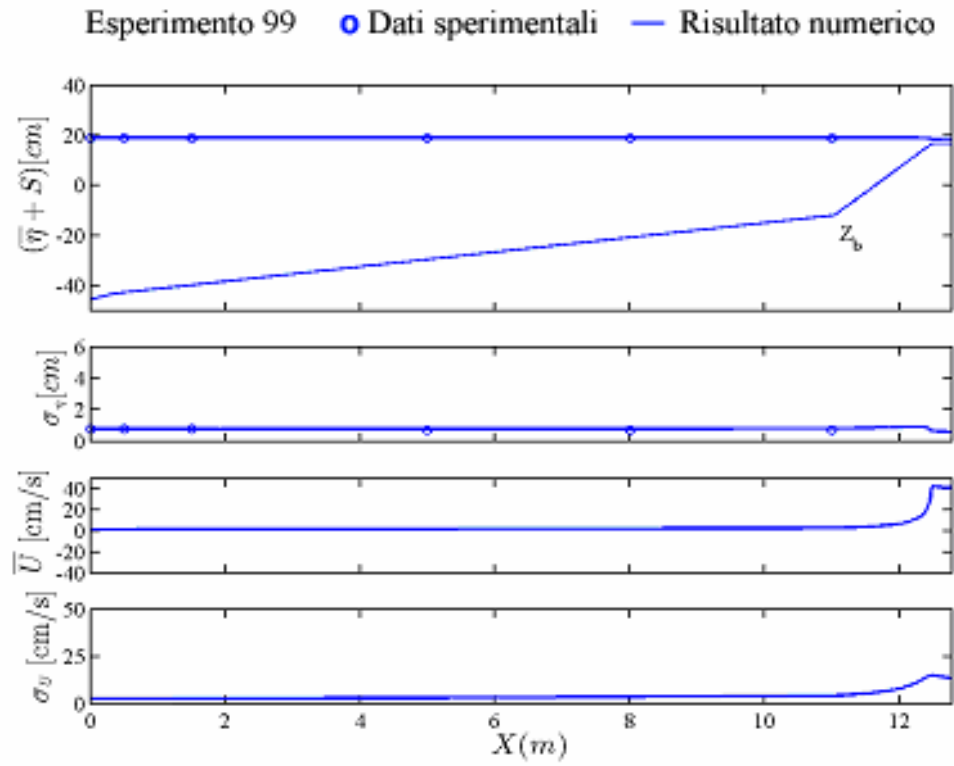


Figura B.99: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 99

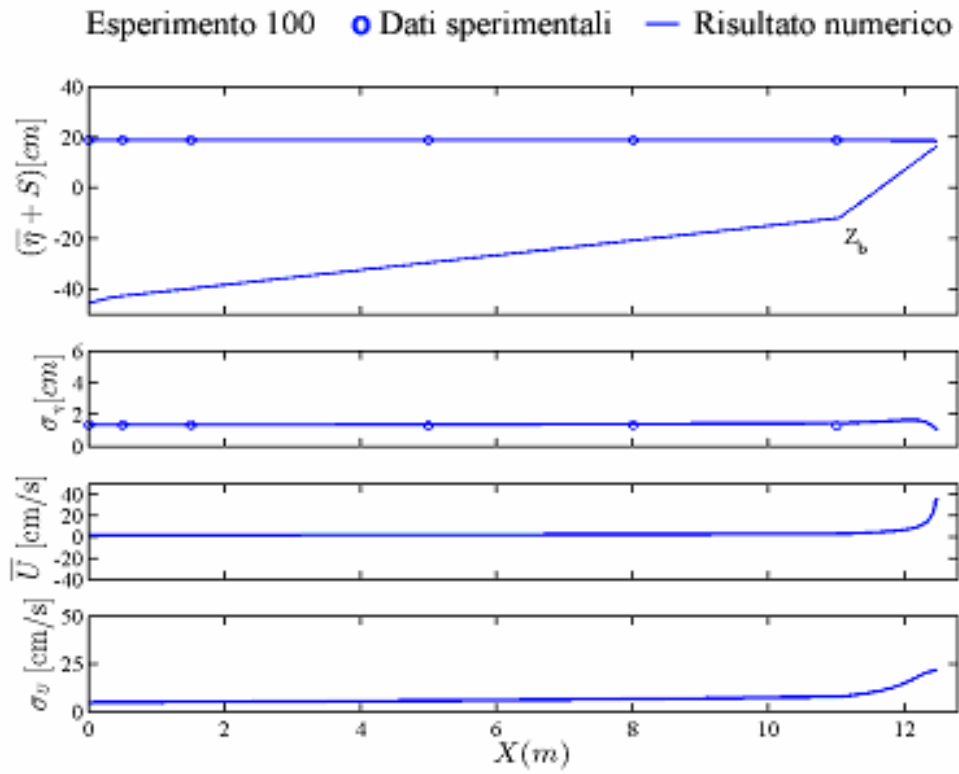


Figura B.100: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 100

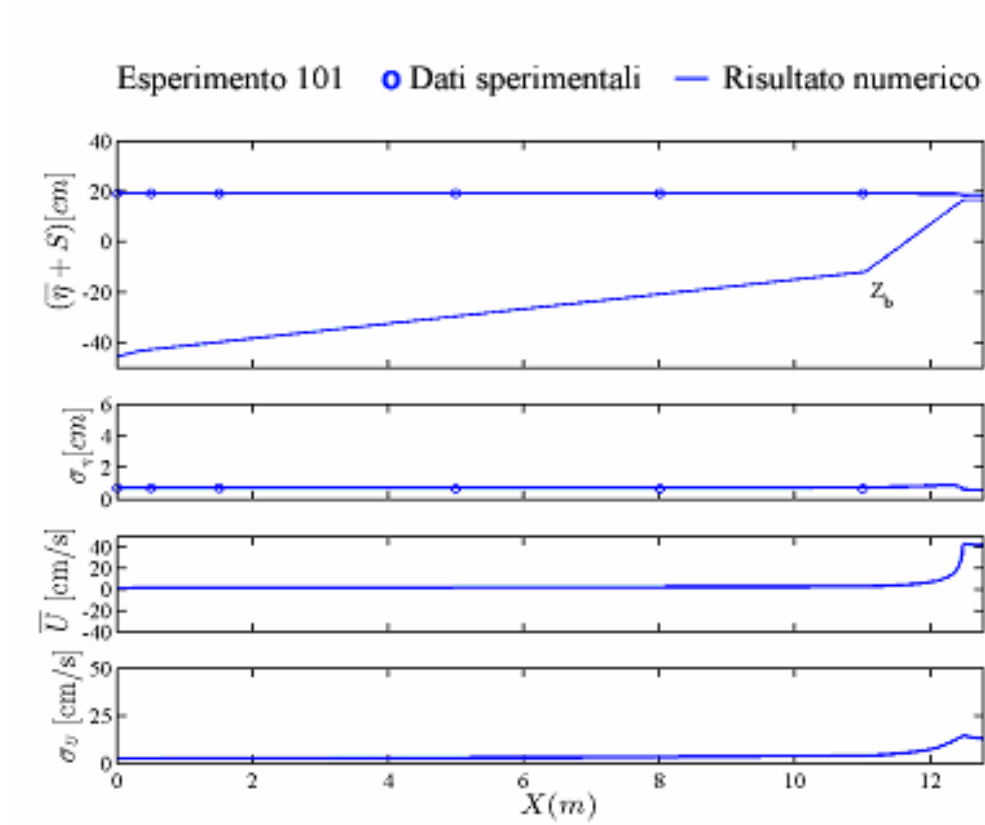


Figura B.101: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 101

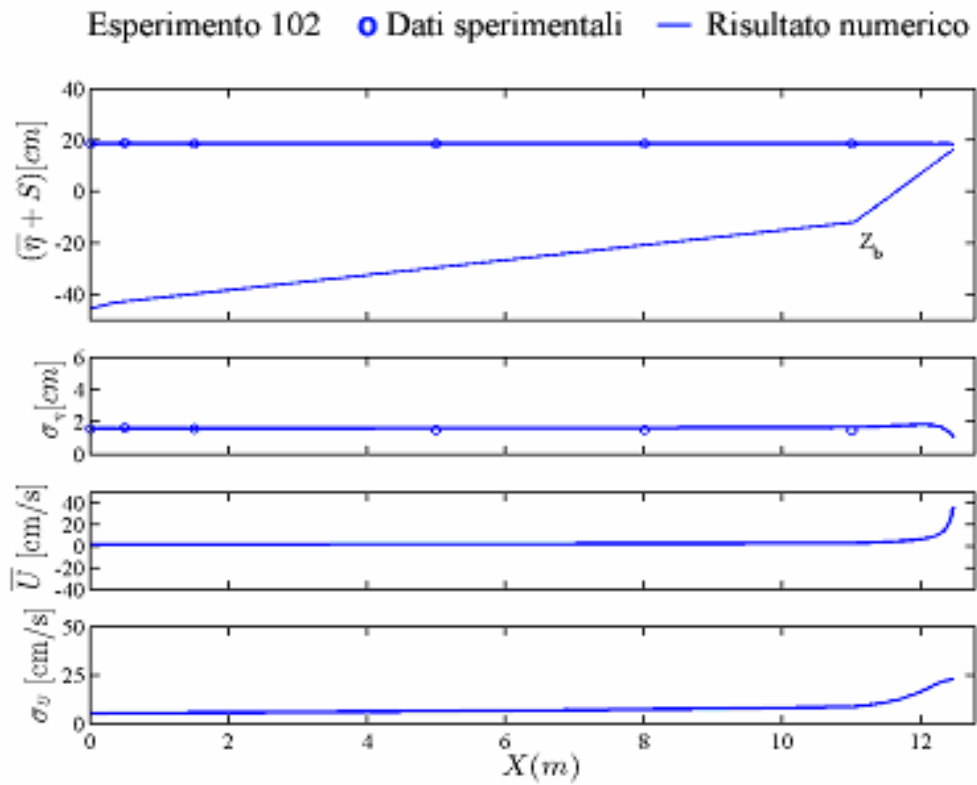


Figura B.102: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 102

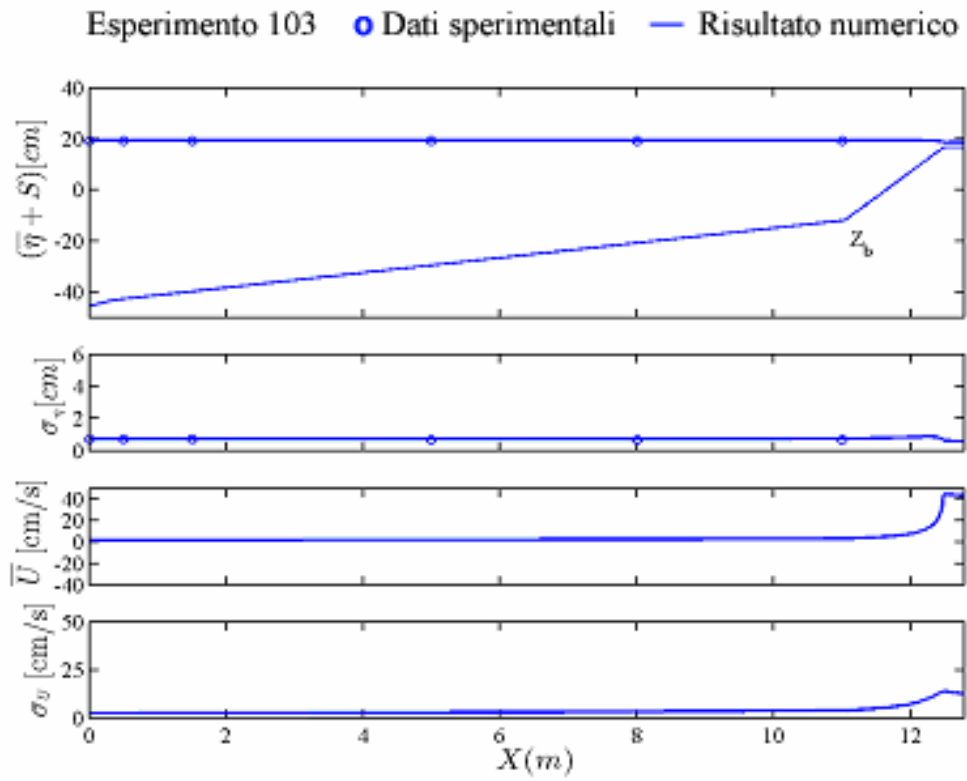


Figura B.103: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 103

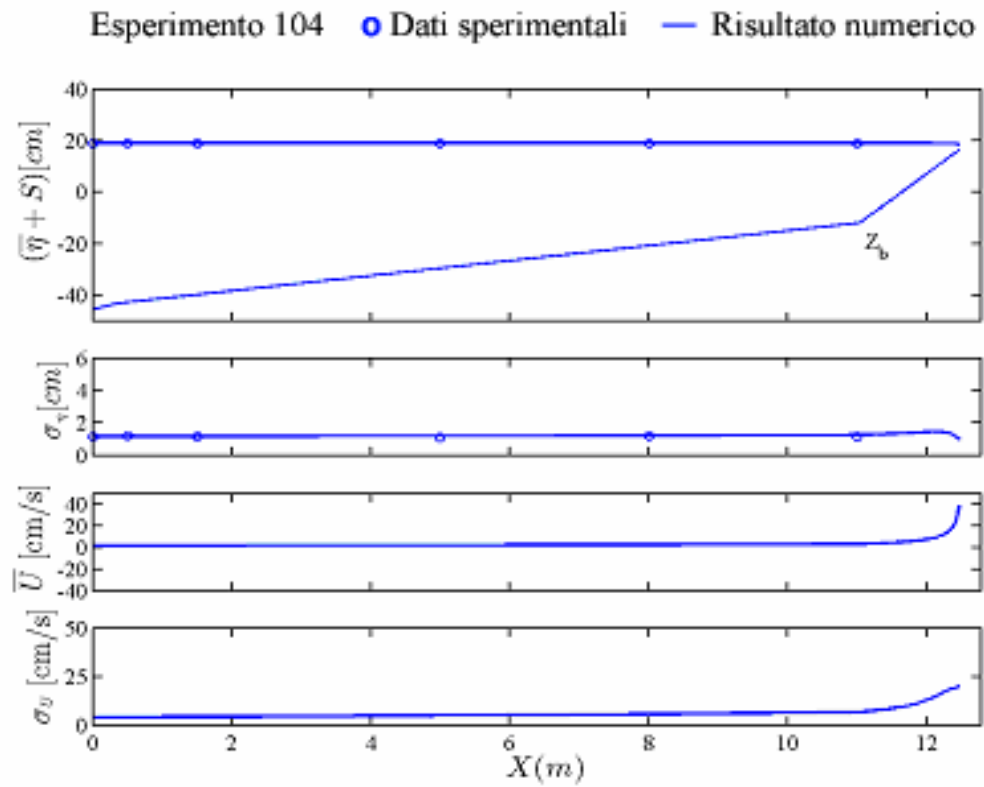


Figura B.104: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 104

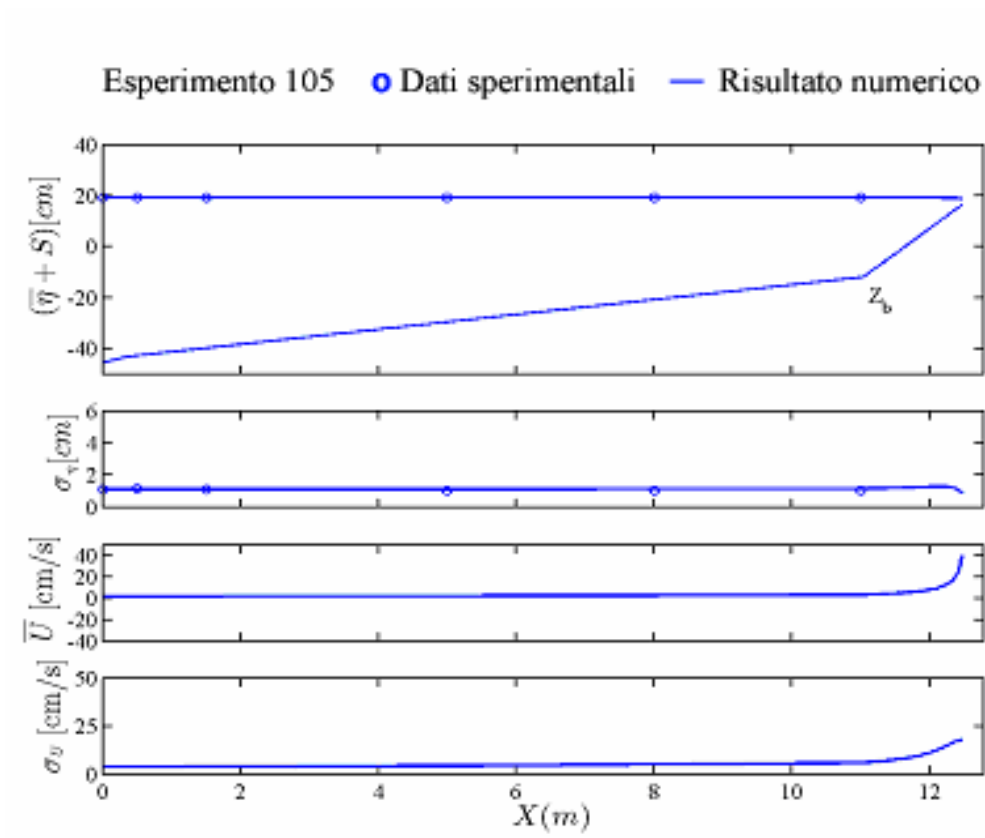


Figura B.105: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 105

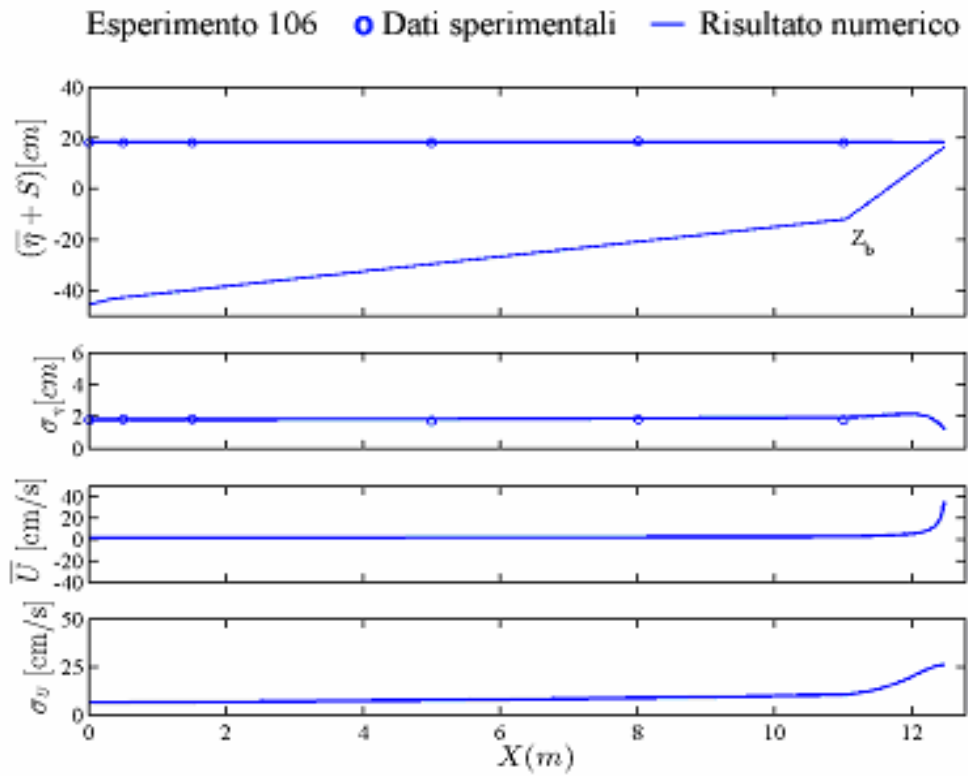


Figura B.106: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 106

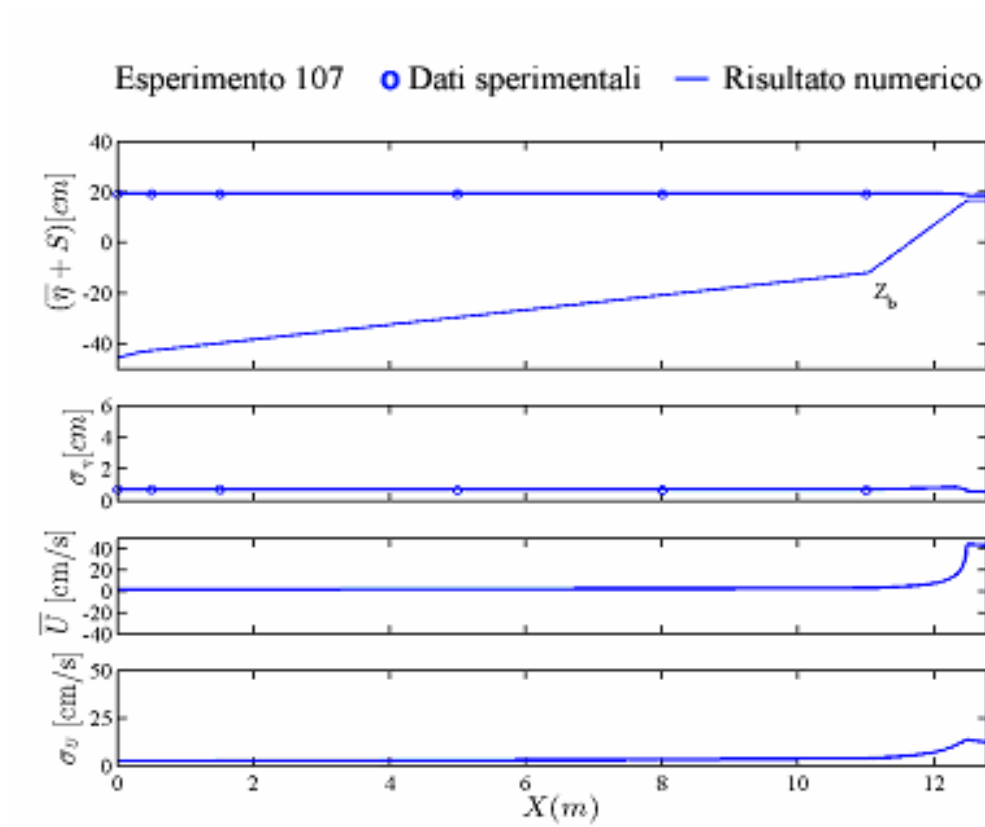


Figura B.107: variazione *cross-shore* della media e della deviazione standard dell'oscillazione della superficie libera η e della componente orizzontale di velocità U . Esperimento 107

BIBLIOGRAFIA

1. Battjes, J.A., and Stive, M.J.F (1985). "Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves" J. Geophys. Res., 90(C5), 9159-9167.
2. Benassai, E. (2006). "Le Dighe Marittime, Progettazione, Realizzazione, Dissesti, Manutenzione". Arti grafiche il cerchio, Napoli. (Edizione fuori commercio)
3. Besley, P. (1999). Overtopping of seawalls: design and assessment manual, HR Wallingford, Report W178.
4. Besley, P., Stewart, T. and Allsop, N. W. H. (1998). "Overtopping of vertical structures: new prediction methods to account for shallow water conditions." Proc. Conference on Coastlines, Structures and Beakwaters, Institute of Civil Engineers, U.K.
5. Burchartch, H. F. and Hughes, S. A. (2003). Coastal Engineering Manual, Fundamentals of design. Chapter 5, Part VI, Design of coastal project elements, Engineer Research and Development Centre, US Army Corps of Engineering, Vicksburg, USA.
6. Dean, R.G., and Dalrymple, R.A., (1991). Water wave mechanics for engineers and scientists. World Scientific, Singapore.
7. D'Eliso, C., Omeraci, H., and Kortenhuis, A. (2006). "Breaking of coastal dikes induced by wave overtopping." Coastal Engineering 2006, Proc. 30th Coastal Engineering Conf., World Scientific, Singapore, 2844-2856.

8. EurOtop Manual. (2007). "Wave overtopping of sea defenses and related structures: Assessment manual." www.overtopping-manual.com.
9. Farhadzadeh, A., Kobayashi, N., Melby, J. A., and Ricottilli, C. (2007). "Experiments and numerical modeling of wave overtopping and overflow on dikes." Research Rep. No. CACR-07-02, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, Del.
10. Goda, Y. (2000). Random seas and design of maritime structures. World Scientific, Singapore.
11. Hedges, T. S., and Reis M. T. (1999). "Wave overtopping models and seawall freeboards." Coastal engineering and marina developments (C.A. Brebbia and P. Anagnostopoulos (Eds.)), Computational Mechanics Publications: 567-576.
12. Henderson, F.M.(1966). Open channel flow. Macmillan, New York, N.Y.
13. Herbert D.M. (1996). "Overtopping of seawalls: a comparison between prototype and physical model data" HR Wallingford, Report TR 22.
14. Kobayashi, N., and de los Santos, F. J (2007). "Irregular wave seepage and overtopping of permeable slopes" J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 133(4), 296-304.
15. Kobayashi, N., and Raichle, A. W (1994). "Irregular wave overtopping of revetments in surf zones" J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 120(1), 56-73.

16. Kobayashi, N., and Wurjanto, A. (1989). "Wave overtopping on coastal structures" *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 115(2), 235-251.
17. Kobayashi, N., Cox, D. T. and Wurjanto, A. (1990). "Irregular wave reflection and runup on rough impermeable slopes" *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 116(6), 708-726.
18. Kobayashi, N., Farhadzadeh, A., and Melby, J.A. (2007). "Wave overtopping and overflow on levees" *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, (submitted in August 2007).
19. Kobayashi, N., Herrman, M.N., Johnson, B.D., and Orzech, M.D. (1998). "Probability distribution of surface elevation in surf and swash zones" *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 124(3), 99-107.
20. Kobayashi, N., Meigs, L.E., Ota, T., and Melby, J. A. (2007 b). "Irregular breaking wave transmission over submerged porous breakwater." *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 133(2), 104-116.
21. Kobayashi, N., Otta, A. K., and Roy, I. (1987). "Wave reflection and runup on rough slopes." *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 113(3), 282-298.
22. Longuet-Higgins, M. S., and Stewart, R. W. (1964) "Radiation stress in water waves, a physical discussion with implications". *Deep-Sea Research*, 75, 6790-6800.

23. Mei, C.C. (1989). The applied dynamics of ocean surface waves. World Scientific, Singapore.
24. Neves, M. G., Reis, M. T., Losada, I. J., and Hu, K. (2008). "Wave Overtopping of Póvoa de Varzim Breakwater: Physical and numerical simulation." J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 134(4), 226-236.
25. Oumeraci, H., Schüttrumpf, H., Moller, J., and Kudella, M. (2001), "Loading of inner slope of sea dikes by wave overtopping- Results from large scale model tests", LWI-Report No. 858
26. Oumeraci, H., Schüttrumpf, H., Sauer, W., Moller, J., and Droste, T.,(1999), "Physical model tests on wave overtopping with nature sea state – 2D model tests with single, double and multi-peaked wave energy spectra", LWI-Report No. 852
27. Owen, M. W. (1980) "Design of seawalls allowing for wave overtopping", HR Wallingford, UK., Technical Report EX-924.
28. Phillips, O.M. (1977). The dynamics of the upper ocean. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
29. Reeve, D. E., Soliman, A., Lin, P. Z. (2008) "Numerical study of combined overflow and wave overtopping over a smooth impermeable seawall." Coastal Engineering 55, (2008), 155-166.
30. Sakai, S., and Kobayashi, N. (1990). "Breaking condition of shoaling waves on opposing current." J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 116(2), 303-306.
31. Schüttrumpf, H (2001). "Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen – Experimentelle und theoretische untersuchungen." Ph.D. thesis,

Leichweiss-Institute for Hydraulics, Technical University of Braunschweig, Braunschweig, Germany.

32. Schüttrumpf, H., Moller, J., Oumeraci, H., Grune, J., and Weissmann, R. (2001). "Effects of natural sea states on wave overtopping of sea dikes." Proceeding of international symposium on Ocean wave measurements and analysis. (Waves 2001), San Francisco.
33. Schüttrumpf, H., and Oumeraci, H. (2005). "Layer thickness and velocities of the wave overtopping flow at sea dikes." *Coastal Engineering*, 52, 473-495.
34. Shankar, N.J., and Jayaratne, M.P.R. (2003). "Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures.", *Ocean Engineering*, 30, 221–238.
35. Soliman, A. (2003). Numerical study of irregular wave overtopping and overflow, Ph.D thesis, Nottingham University, UK
36. Stanczak, G., Oumeraci, H., and Kortenhaus, A. (2006). "Breaching of sea dikes initiated by breaking wave impact on seaward slope." *Coastal Engineering 2006, Proc. 30th Coastal Engineering Conf.*, World Scientific, Singapore, 2880-2892.
37. van der Meer, J. (2002). Wave run-up and wave overtopping at dikes. Technical Advisory Committee for Flood Defense in the Netherlands (TAW), Delft, The Netherlands.
38. van der Meer, J.W., and Janssen J.P.F.M. (1995). "Wave run-up and wave overtopping at dikes.", *Wave forces on inclined and vertical*

wall structures , pp 1- 26, ed. Kobayashi N. & Demirbilek Z., ASCE, New York, N.Y.

39. van der Meer, J. W., Bernardini, P., Snijders, W., and Regeling, E. (2006). "The wave overtopping simulator." Coastal Engineering 2006, Proc. 30th Coastal Engineering Conf., World Scientific, Singapore, 4654-4666.
40. van Gent, M.R. A. (1999). "Physical model investigation on coastal coastal structures with shallow foreshores 2D model tests with single and double peak wave energy spectra". Delft Hydraulics, Report H3608.
41. van Gent, M.R. A. (2001). "Wave runup on dikes with shallow foreshores." J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 127(5), 254-262.
42. van Gent, M.R. A. (2002). "Low exceedance wave overtopping event: Measurements of velocities and the thickness of water-layers on the crest and inner slope of dikes." Delft Cluster Report DC030202/H3803, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
43. Waal J., and van der Meer, J. (1992). "Wave runup and overtopping on coastal structures." Coastal Engineering 1992, Proc. 23rd Coastal Engineering Conf., World Scientific, Singapore, 1758-1771.
44. Wang, Z., and Bowles, D. S. (2006). "Dam breach simulations with multiple breach locations under wind and wave actions.", Advances in Water Resources, 29, 1222–1237.